

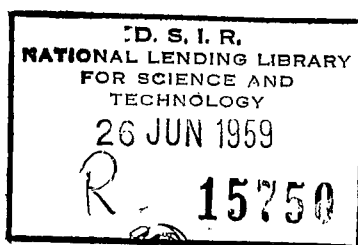
6253 60133
К. Г. МАРКВАРДТ
ПРОФЕССОР, ДОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Введенный
в 1958 г.

ВТОРОЕ ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Допущено
Министерством высшего образования
в качестве учебника для институтов
инженеров железнодорожного
транспорта



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ТРАНСПОРТНОЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА
1958

В книге дается описание системы энергоснабжения электрических железных дорог, схем питания и секционирования контактной сети; разбираются условия работы системы энергоснабжения, влияние ее на работу локомотивов и на показатели эксплуатируемой линии, а также излагаются методы расчета параметров системы энергоснабжения и защиты от токов короткого замыкания.

Книга утверждена Министерством высшего образования в качестве учебника для институтов инженеров железнодорожного транспорта.

Редактор канд. техн. наук доц. *М. Е. КРЕСТЬЯНОВ*

ОТ АВТОРА

Настоящая книга представляет собой второе издание курса «Энергоснабжение электрифицированных железных дорог», выпущенного в 1948 г.

Со времени выхода в свет первого издания накоплен большой материал, отражающий практику работы электрифицированных дорог. Особенно это относится к линиям с большими размерами движения. Накопленный материал значительно расширил имевшиеся представления о режимах работы электрических железных дорог и методах расчета параметров системы энергоснабжения.

Новым за этот период явились также большие перспективы электрификации железных дорог в нашей стране на однофазном токе промышленной частоты.

Все это потребовало коренной переработки изданного в 1948 г. курса.

Во втором издании освещены почти все вопросы, входившие в первое издание. Изъяты лишь имевшиеся ранее краткие описания устройств тяговых подстанций и контактной сети, поскольку за это время вышли в свет пособия, специально посвященные этим вопросам. Отнесены в специальную часть вопросы защиты устройств связи от влияний электрических железных дорог.

Одновременно с этим расширено описание различных методов расчета системы энергоснабжения. Значительно расширен и углублен материал, посвященный вопросам влияния неравномерности движения на условия работы и необходимые параметры системы энергоснабжения, и дан более простой вывод соответствующих формул.

Заново переработан раздел, посвященный определению параметров системы энергоснабжения на дорогах однофазного тока промышленной частоты. В соответствии с новейшими воззрениями в области оценки эффективности капиталовложений коренным образом переработан раздел, посвященный экономическим расчетам системы энергоснабжения.

Вопросы истории развития электрической тяги и электрификации железных дорог в СССР опущены, так как они излагаются в соответствии с утвержденным учебным планом в других дисциплинах, изучаемых ранее курса «Энергоснабжение электрических железных дорог».

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить признательность доцентам И. И. Бенешевичу и В. Н. Пупынину, оказавшим помощь в написании гл. IX, и доц. М. Е. Крестьянову за его большой труд при создании настоящей книги.

Автор будет благодарен за все замечания и указания по книге, которые просит направлять в Трансжелдориздат по адресу: Москва, Б-174, Басманный тупик, дом 6а.

СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

§ 1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Электрическая энергия, необходимая для приведения в действие тяговых двигателей электрического локомотива, вырабатывается на районной электрической станции (т. е. на станции, обслуживающей и других потребителей), затем через повышающую подстанцию и

линию передачи высокого напряжения передается на тяговую подстанцию (рис. 1). Питание же электрических локомотивов осуществляется через провода контактной сети (контактные подвески) и рельсовый путь. Таким образом, на всех электрических железных дорогах в качестве одного из проводов используется рельсовый путь, а так как он не изолирован от земли, то используется и земля.

При рассмотрении элементов, входящих в систему энергоснабжения электрических железных дорог, схему питания разбивают на две части:

1) первичную, или внешнюю, часть системы энергоснабжения, включающую в себя все устройства, начиная от электрической станции до линий передач (включительно), подводящих энергию к тяговым подстанциям;

2) тяговую часть системы энергоснабжения, включающую в себя тяговые

подстанции и тяговую сеть. Тяговая сеть в свою очередь состоит из контактной сети, рельсового пути, питающих и отсасывающих линий (фидеров) и т. п.

На рис. 1 в качестве наиболее типичного случая рассмотрено питание электрической железной дороги от электрической станции трехфазного тока и поэтому линии передачи здесь также трехфазные (на рис. 1 это обозначено пересечением линий передачи тремя штрихами). Подстанция 2 также является трансформаторной подстанцией трехфазного тока. Что касается тяговой подстанции 4, то ее устройство зависит от системы электрической тяги, применяемой на железной дороге.

Основным элементом оборудования тяговой подстанции являются преобразовательные агрегаты. Тип преобразовательного агрегата определяется системой электрической тяги, т. е. родом тока и напряжения, применяемого в контактной сети, а также напряжением и системой тока источника энергии первичной части схемы питания.

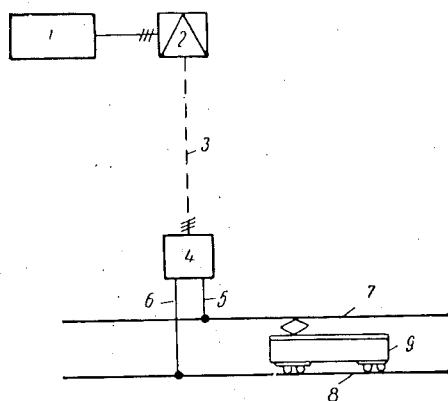


Рис. 1. Принципиальная схема питания электрифицированного участка от центральной станции:

1 — районная электрическая станция; 2 — повышающая трансформаторная подстанция; 3 — линия передачи; 4 — тяговая подстанция; 5 — питающая линия (фидер); 6 — отсасывающая линия; 7 — контактная сеть; 8 — рельсы; 9 — электрический локомотив

Питание участков железных дорог постоянного тока в большинстве случаев производится от районных электрических станций трехфазного тока или энергосистем, а преобразование энергии может осуществляться при помощи ртутных выпрямителей, двигатель-генераторов или одноякорных преобразователей.

Первые подстанции постоянного тока оборудовались в основном двигатель-генераторами. Невысокий к. п. д. двигатель-генераторов привел к тому, что уже до 1914 г. их стали вытеснять одноякорные преобразователи (при напряжениях не выше 1 200 в, так как на большую величину напряжения трудно было строить эти машины). В последующем двигатель-генераторные подстанции начали применяться более широко. Возвращение к этим машинам объяснялось тем, что на электрифицированных участках стали применяться более высокие напряжения постоянного тока: 1 500, 2 000, 2 400, 3 000 и даже 4 000 в.

Двигатель-генераторы представляют собой механически соединенный двигатель трехфазного тока (синхронный или асинхронный) и генератор постоянного тока необходимого напряжения. При напряжении постоянного тока в контактной сети выше 1 500 в последовательно соединяются два генератора, сидящие на одном валу с двигателем. Питание двигателя при напряжении в сети переменного тока выше 6÷10 кВ производится через трансформатор. Двигатель-генераторы устанавливались главным образом на подстанциях тех участков магистральных железных дорог, где применялась рекуперация энергии, так как в то время только этим способом обеспечивался возврат энергии во внешнюю часть системы энергоснабжения. Двигатель-генераторы обладают серьезными достоинствами: независимость напряжения постоянного тока от напряжения переменного тока; широкие пределы регулирования напряжения постоянного тока; высокий коэффициент мощности и возможность его регулирования у двигатель-генераторов с синхронными двигателями; удобство возврата энергии в первичную сеть при рекуперации и большой запас энергии, облегчающий условия работы первичной сети при толчкообразных нагрузках. Однако эти достоинства не перекрывают их недостатков по сравнению с ртутными преобразователями: большую стоимость, большие габариты и вес, требующие тяжелых фундаментов (т. е. также приводящие к увеличению стоимости) и низкий к. п. д. (особенно при малых нагрузках).

По этим причинам ртутные выпрямители получили наибольшее распространение в качестве преобразователей переменного тока в постоянный. Наличие сеточного управления в ртутных преобразователях позволяет регулировать напряжение выпрямленного тока, осуществлять защиту при коротких замыканиях и обратных зажиганиях, а также преобразовывать постоянный ток в переменный, в чем может возникнуть необходимость при применении на линии рекуперативного торможения.

Питание дорог, работающих на переменном токе пониженной частоты, производится или от электростанций, вырабатывающих ток пониженной частоты, или от районных сетей с преобразованием частоты. При питании тяговой сети дорог пониженной частоты от промышленной сети, работающей на промышленной частоте, на тяговых подстанциях устанавливаются специальные преобразователи; присоединение преобразователей к первичной сети обычно приходится производить через трансформаторы, так как районные и промышленные сети имеют напряжение, значительно превышающее допустимое для преобразователя. Точно так же и к контактной сети преобразователи присоединяют через трансформаторы по той же причине. Преобразование частоты может происходить при помощи синхронно-синхронного двигатель-генератора или асинхронно-синхронного двигатель-генератора. Для преобразования числа фаз и частоты применяются и другие вращающиеся машины, как, например, коллекторный и одноякорный преобразователи.

Как и при выпрямлении переменного тока, существенным недостатком вращающихся преобразователей, кроме больших капиталовложений, связанных с их применением (высокая стоимость, вес, большая занимаемая площадь и т. п.), является еще и низкий к. п. д., значительно увеличивающий расходы

по эксплуатации. Поэтому была исследована возможность преобразования частоты при помощи статических (ртутных) преобразователей.

Ртутный преобразователь с управляющими сетками при соответствующей схеме включения принципиально может служить для преобразования трехфазного переменного тока с частотой 50 гц в однофазный с частотой $16^{2/3}$ гц, т. е. работать в качестве преобразователя числа фаз и частоты. Однако эта задача еще не получила удовлетворительного технического решения и такие преобразователи не применяются на электрических железных дорогах.

Питание тяговой сети однофазного тока нормальной частоты от промышленной сети трехфазного тока производится при помощи однофазных или трехфазных трансформаторов или трехфазно-двухфазных трансформаторов, дающих более равномерную нагрузку всех фаз трехфазной сети. Тяговые подстанции при этом обращаются в простые трансформаторные подстанции. Если в тяговой сети применяется трехфазный ток пониженной частоты, то, так же как и при однофазном токе, энергию передают вдоль линии от особых железнодорожных электрических станций, вырабатывающих ток пониженной частоты при высоком напряжении, и трансформируют ее на специальных понизительных тяговых подстанциях, или получают энергию от сети промышленной частоты через тяговые подстанции, преобразующие частоту и напряжение. Если участок железной дороги электрифицирован на трехфазном токе промышленной частоты, то присоединение тяговой сети к общей может быть произведено лишь при помощи специальных тяговых трансформаторов. Необходимость присоединения тяговой сети через трансформаторы объясняется тем, что одним из проводов трехфазной тяговой сети является рельсовый путь, не изолированный от земли.

§ 2. ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Электроэнергетическое хозяйство всех стран мира в настоящее время строится по принципу концентрации производства электрической энергии на крупных электрических станциях, которые при помощи линий передачи снабжают энергией обширные районы.

Основными соображениями, побудившими все страны строить энергетику на таком принципе, являются те большие преимущества в экономическом отношении, которые представляет генерирование энергии на крупных станциях, как и всякое производство в массовом масштабе. В данном случае крупные электрические станции, оборудованные генераторами большой мощности, позволяют значительно снизить все расходы по генерации энергии и особенно расходы на топливо. Поэтому теперь во всех странах мира электрические железные дороги в большинстве случаев получают питание не от отдельных электрических станций, а от энергосистем.

Под энергетической системой, согласно определению Правил устройства электроустановок (ПУЭ) [1], понимается «...совокупность электростанций, линий передачи, подстанций и тепловых сетей, связанных в одно целое общностью режима и непрерывностью процесса производства и распределения электрической и тепловой энергии». По мере развития энергетические системы охватывают все большее число электрических станций, а сами эти станции строятся на все возрастающие мощности. Повышение мощности отдельных электрических станций и установленных на них агрегатов позволяет уменьшать капитальные затраты на 1 квт установленной мощности и применять все более совершенные котельные агрегаты, позволяющие с успехом использовать низкосортные виды топлива. Соединение же электростанций в одну систему приносит весьма большие выгоды, перекрывающие затраты, идущие на сооружение специальных линий передач, соединяющих между собой эти станции.

Остановимся вкратце на основных преимуществах объединения электрических станций в энергосистемы.

Мощность электростанции должна быть достаточной, чтобы в любой момент удовлетворить спрос всех потребителей, получающих от нее питание. Потребители же в общем случае расходуют в разное время различную мощность,

а на некоторое время могут и вовсе отключаться от электрической станции. Поэтому каждый потребитель характеризуется как общим количеством потребляемой им энергии, так и максимальной потребной мощностью в отдельные отрезки времени.

Ввиду того, что такие максимумы мощности потребителей часто не совпадают по времени, максимум мощности, требуемой от электрических станций, как правило, меньше суммы максимумов мощностей потребителей. Это обстоятельство позволяет тем лучше использовать электрические станции, чем они мощнее, т. е. чем больше к ним подключено потребителей. Еще больший эффект такого использования мощности электростанций достигается соединением нескольких станций в энергосистему.

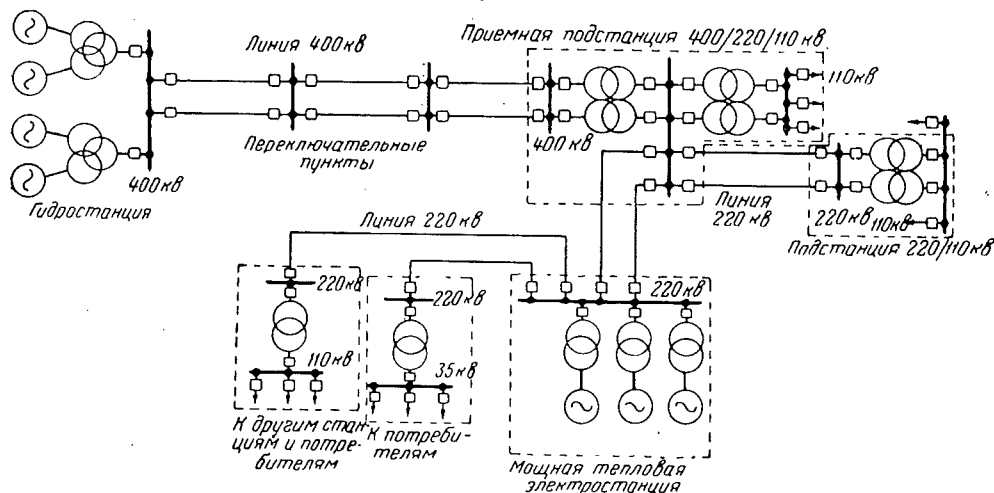


Рис. 2. Принципиальная схема энергетической системы

Для обеспечения необходимой надежности работы на электрических станциях предусматриваются резервные агрегаты. Они используются при проведении плановых ремонтов отдельных агрегатов и при всяких непредвиденных отключениях их. Соединение нескольких электрических станций между собой

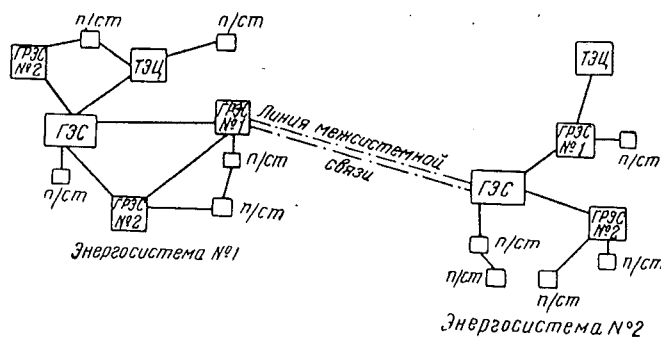


Рис. 3. Соединение двух энергосистем линиями межсистемной связи

позволяет сократить такой резерв, т. е. еще больше повысить степень их использования. Соединение в одной системе тепловых электростанций и гидроэлектростанций позволяет в многоводные периоды передавать большую часть нагрузки на гидростанции, в отдельных случаях загружая тепловые станции только выработкой реактивной энергии, тем самым получая значительную экономию топлива и т. п.

Современная мощная электроэнергетическая система (рис. 2) может включать в себя различные электрические станции, линии передачи различного напряжения и соответственно различного напряжения трансформаторные подстанции

ции. Дальнейшим развитием энергосистем является соединение между собой отдельных энергосистем специальными линиями передачи, так называемыми линиями межсистемной связи (рис. 3), дающими по существу те же преимущества, что и соединение нескольких станций в одну энергосистему.

§ 3. СХЕМЫ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

В реальных условиях схема питания выглядит много сложнее, чем принципиальная схема, показанная на рис. 1. Во-первых, электрическая железная дорога питается от ряда электростанций, объединенных в одну или несколько энергосистем. Затем электрическая энергия преобразовывается на ряде подстанций и передается в контактную сеть при том роде тока и величине напряжения, которые необходимы для данного типа локомотивов. Во-вторых, питание

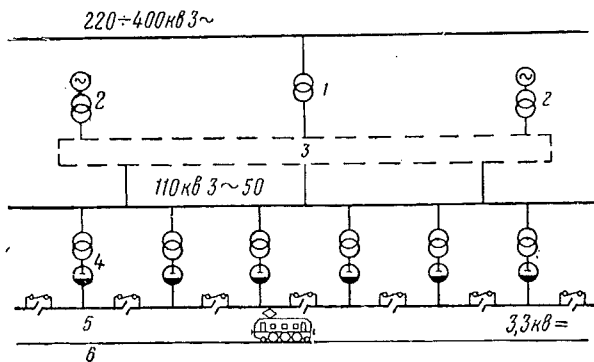


Рис. 4. Принципиальная схема питания дороги постоянного тока:

1 — районная трансформаторная подстанция; 2 — районная электрическая станция; 3 — разветвленная районная сеть высокого напряжения; 4 — тяговые подстанции с ртутными преобразователями (выпрямителями); 5 — контактная сеть; 6 — рельсы

от энергосистемы одновременно получает не один локомотив, как это показано на рис. 1; число поездов зависит от размеров движения и длины рассматриваемой линии. Схемы питания электрических железных дорог от энергосистем весьма разнообразны. Они в большой мере зависят от применяемой системы электрической тяги, а также и от конфигурации самой энергосистемы.

Можно различать два случая: 1) электрифицируемая железная дорога проходит по району с сильно развитой энергосистемой; 2) энер-

госистема создается одновременно (или почти одновременно) с электрификацией железной дороги. В первом случае трудно дать какие-либо обобщающие схемы, так как большую роль в структуре самой схемы энергосистемы будут играть местные специфические условия и условия ее развития. Легче поддается анализу второй случай и, кроме того, его можно считать более типичным. На нем следует остановиться и выяснить особенности построения схем питания при различных системах электрической тяги.

На рис. 4—7 показаны схемы питания при трех родах тока: постоянного, однофазного пониженной частоты и однофазного промышленной частоты. Во всех случаях предполагается, что вдоль железнодорожных линий идет линия передачи для питания тяговых подстанций. Это является следствием одновременности создания энергосистемы и проведения электрификации железных дорог. Линия передачи 110 кВ , 50 Гц (кроме рис. 6, где частота $16\frac{2}{3}\text{ Гц}$) получает питание от энергосистемы. Энергосистема здесь условно изображена схемой, состоящей из разветвленной сети 110 кВ , 50 Гц и питающих ее электрических станций различного типа. Кроме того, для большей общности показано присоединение районной сети через районную подстанцию к линии передачи 220 и 400 кВ . На всех схемах напряжение в контактной сети показано равным напряжению на шинах тяговых подстанций при их номинальной нагрузке. На дорогах постоянного тока (рис. 4) питание от районной сети осуществляется через большее (по сравнению с другими системами) число преобразовательных (ртутновыпрямительных) подстанций. При электрической тяге на однофазном токе промышленной частоты принципиальная схема питания (рис. 5) получает тот же вид, что и выше (рис. 4), с той, однако, разницей, что число подстанций

уменьшается и сами подстанции упрощаются. Здесь могут быть использованы трехфазные и однофазные или трехфазно-двухфазные трансформаторы.

При работе электрифицированной дороги на однофазном токе пониженной частоты могут быть применены две схемы. В первой из них (смешанной) энергия получается от электрических станций пониженной частоты, построенных специально для нужд дороги (или от отдельных агрегатов пониженной частоты, устанавливаемых на общих районных станциях трехфазного тока промышленной частоты), а также через преобразовательные подстанции от энергоснабжающей системы района (рис. 6). Те и другие могут работать параллельно на однофазную линию передачи высокого напряжения, от которой через трансформаторные подстанции питается контактная сеть. Если же принята схема питания только от энергосистемы района, то она по существу сохраняет тот же вид, что и схема, разобранный на рис. 6. В этом случае отличие будет лишь в том, что в схеме отсутствуют специальные электростанции. Такие схемы называют схемами с сосредоточенным преобразованием энергии. При системе однофазного тока пониженной частоты возможны схемы того же вида, что и при других системах тока, т. е. при распределенном вдоль линии железной дороги преобразовании энергии (рис. 7).

В этом случае каждая подстанция оборудуется преобразователями частоты и числа фаз. (Такая схема применена, например, на шведских железных дорогах.)

На дорогах постоянного тока схемы питания контактной сети разделяют на два вида: централизованные и децентрализованные. Частным случаем последних являются схемы распределенного питания.

Под централизованной схемой питания контактной сети понимается такая схема, при которой каждый локомотив получает питание практически только от одной (при односторонней схеме питания) или от двух (при двусторонней схеме питания) подстанций, т. е. более удаленные подстанции фактически не принимают участия в питании данной нагрузки. Такой режим работы тяговых подстанций получается при расположении их на достаточно большом расстоянии друг от друга, а следовательно, и при большом числе сосредоточенных на них агрегатов. Тяговые подстанции при этой схеме могут питаться от различ-

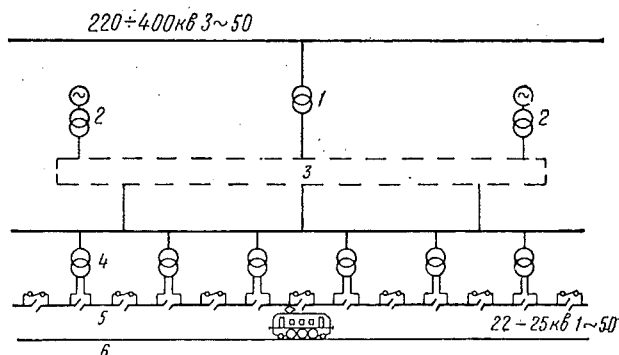


Рис. 5. Принципиальная схема питания дороги однофазного тока промышленной частоты:
4 — трансформаторная подстанция (остальные обозначения те же, что и на рис. 4)

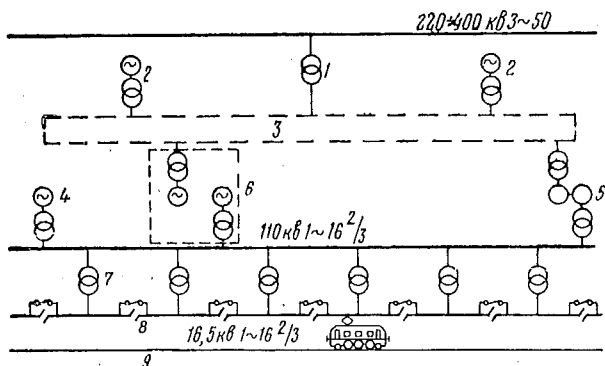


Рис. 6. Принципиальная схема питания дороги однофазного тока пониженной частоты с сосредоточенным преобразованием частоты:

1 — районная трансформаторная подстанция трехфазного тока промышленной частоты; 2 — районная электрическая станция трехфазного тока; 3 — разветвленная районная сеть высокого напряжения; 4 — «собственная» электрическая станция (пониженной частоты); 5 — тяговая подстанция с вращающимися преобразователями; 6 — объединенная электрическая станция с генераторами промышленной и пониженной частоты; 7 — трансформаторная подстанция однофазного тока пониженной частоты; 8 — контактная сеть; 9 — рельсы

ных районных подстанций или электрических станций. Резервирование на таких тяговых подстанциях обычно осуществляется установкой отдельных резервных агрегатов.

Под децентрализованной схемой питания обычно понимают схему со значительно меньшими расстояниями между тяговыми подстанциями и, следовательно, с меньшим числом агрегатов на каждой из них. Казалось бы, если тяговые подстанции располагаются близко друг к другу, то при большой нагрузке около одной из них напряжение этой подстанции понизится и, следовательно, смежные подстанции возьмут на себя часть ее нагрузки. Однако в случае, когда тяговые подстанции питаются от различных источников, уровень их напряжения может изменяться вне зависимости от напряжения смежных подстанций. При этом не может быть уверенности в том, что нагрузка,

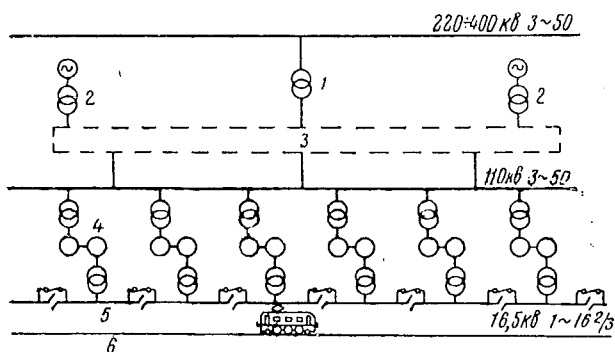


Рис. 7. Принципиальная схема питания дороги однофазного тока пониженной частоты с распределенным преобразованием частоты:

4 — тяговые подстанции с вращающимися преобразователями частоты (остальные обозначения те же, что и на рис. 4)

сосредоточенная у одной из подстанций, будет частично восприниматься смежными. Действительно, если данная подстанция будет иметь более высокое напряжение, чем смежные с ней, то она возьмет на себя всю (или почти всю) нагрузку.

При таких условиях схемы централизованного и децентрализованного питания мало имеют различия в характере работы.

Однако схеме децентрализованного питания могут быть приданы особые качества, при которых режимы работы будут отличаться от ре-

жимов работы рассмотренных схем. Такая схема получила название схемы распределенного питания.

Под распределенной схемой питания контактной сети понимается такая, при которой потребитель на наиболее нагруженных зонах получает питание не от ближайших, а от ряда и более удаленных тяговых подстанций. Участие таких подстанций в питании других подстанционных зон получается тем большим, чем меньше мощность сосредоточенных на одной подстанции агрегатов. Наиболее совершенной получается схема с одноагрегатными подстанциями.

Схемы подстанций в таком случае могут быть весьма упрощены. Подстанции получают однотипными, что дает возможность значительно индустриализировать их сооружение.

Для обеспечения распределения нагрузки между рядом одноагрегатных тяговых подстанций они должны быть связаны определенным режимом напряжения на первичной стороне. Поэтому все такие подстанции должны получать питание от одной и той же линии передачи, идущей вдоль линии железной дороги. В этом основное отличие от схемы централизованного питания. При одноагрегатных подстанциях, естественно, и система резервирования должна быть другой. Резерв при распределенной схеме питания осуществляется не путем установки дополнительных агрегатов, а в виде запаса мощности отдельных подстанций, выбранного так, чтобы выпадение из работы любой подстанции не вызвало необходимости вносить какие-либо ограничения в работу данной железнодорожной линии. По существу выполнение этого требования приводит к тому, что нормальная работа линии может быть обеспечена и в том случае, если выйдет из строя не одна, а несколько подстанций, но при условии, если между двумя выбывшими из работы останутся включенными не менее двух подстанций. Такая схема вследствие большого числа подстанций становится целесообразной только при автотелеуправлении этими подстанциями и

при условии их максимального упрощения, что при одноагрегатных подстанциях легко может быть достигнуто. Рассматриваемая схема требует проводов контактной сети значительно меньшего сечения, и при этом уменьшаются потери энергии и потери напряжения в контактной сети. Эти качества являются главнейшими преимуществами системы распределенного питания. Кроме того, значительно облегчается защита от токов короткого замыкания в контактной сети уменьшаются потенциалы рельсов относительно земли, а следовательно, и опасность разрушения подземных сооружений блуждающими токами; уменьшаются также мешающие влияния на провода связи и упрощается организация питания электрической энергией нетяговых потребителей.

§ 4. СХЕМЫ ПИТАНИЯ ТЯГОВЫХ И РАЙОННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Как уже отмечалось выше, при проектировании и сооружении системы энергоснабжения электрических железных дорог предусматривается питание различных стационарных, так называемых нетяговых, потребителей. Обычно питание этих потребителей происходит от шин тяговых подстанций. Поэтому надежность питания электрической тяги и районных потребителей зависит от надежности схемы питания тяговых подстанций и от надежности работы самих подстанций. То и другое в основном определяется способом и степенью резервирования элементов системы энергоснабжения.

Схема питания тяговых подстанций от энергосистемы во всех случаях должна иметь такое построение, при котором выход из работы одной из районных подстанций или линии передачи не мог бы явиться причиной выхода из работы тяговой подстанции или, тем более, нескольких тяговых подстанций. Таким требованиям вполне удовлетворяет схема, при которой питание каждой тяговой подстанции осуществляется не менее чем от двух электрических станций или от двух районных подстанций.

Схема питания тяговых подстанций выбирается в зависимости от конфигурации районной сети, расположения электрических станций и подстанций, имеющегося у них запаса мощности, возможности их расширения и т. п. При этом, как правило, стремятся иметь схему двустороннего питания тяговых подстанций. Если осуществление такой схемы требует значительных затрат, то в отдельных случаях от нее отказываются и питают каждую подстанцию только от одного источника. В последнем случае для обеспечения необходимой надежности питания осуществляют двумя параллельными линиями передачи. Рассмотрим несколько наиболее широко применяемых схем питания тяговых подстанций.

Схема двустороннего питания тяговых подстанций может осуществляться от ряда источников питания, соединенных в кольцо, а также от источников питания, связанных между собой только через тяговые подстанции. При кольцевой схеме питания (рис. 8) все тяговые подстанции и несколько электрических станций или районных подстанций соединяются в одно кольцо. При такой схеме питания отключение одной из подстанций или линии передачи не вызывает прекращения питания тяговых подстанций. Сходной является схема питания (рис. 9), при которой два источника энергии (электрические станции или районные подстанции) соединяются друг с другом через шины всех тяговых подстанций.

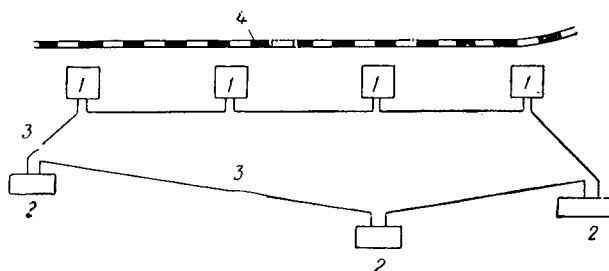


Рис. 8. Кольцевая схема питания тяговых подстанций: 1—тяговая подстанция; 2—электрическая станция (или районная подстанция); 3—линия передачи; 4—линия железной дороги

Для повышения надежности питания эти линии на всем протяжении или только на головных участках (т. е. около источников питания) могут выполняться двухцепными (две линии передачи на одной опоре). При такой схеме питания при повреждении на линии передачи автоматически отключается только поврежденная часть, расположенная между двумя подстанциями. При повреждении подстанции, если оно таково, что заставляет отключить ее полностью,

остальные подстанции продолжают питаться, но уже с одной стороны. Обе рассмотренные схемы обеспечивают достаточную надежность работы тяговых подстанций.

При высоком напряжении стоимость каждого ввода, оборудованного масляными выключателями, получается весьма значительной и дает заметную составляющую в стоимости подстанций.

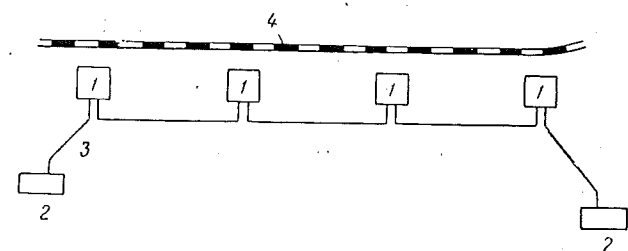


Рис. 9. Схема двустороннего питания тяговых подстанций:

1—тяговая подстанция; 2—электрическая станция или районная подстанция; 3—линия передачи; 4—линия железной дороги

Для уменьшения этих затрат применяют схемы питания, при которых две линии передачи заводятся только через две на третью (рис. 10) или через три подстанции на четвертую. Эти подстанции получают название опорных. Все остальные подстанции (промежуточные) получают питание от линий передачи через отпайки, т. е. не врезаются в линию передачи. С переходом на электрификацию железных дорог в районах со слабо развитыми энергосистемами такая схема на ряде дорог СССР получила распространение. При

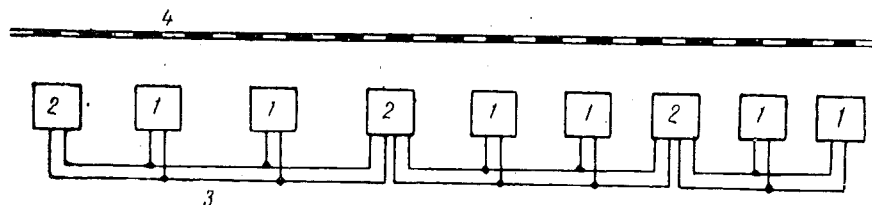


Рис. 10. Схема питания тяговых подстанций на отпайках:

1—промежуточная тяговая подстанция; 2—опорная подстанция; 3—двухцепная линия передачи; 4—линия железной дороги

этой схеме подстанции присоединяются через один масляный выключатель и два разъединителя к высоковольтной линии передачи. Один из разъединителей на каждой подстанции включен, другой отключен с таким расчетом, чтобы подстанции присоединялись к двум цепям линии передачи в шахматном порядке. При такой схеме повреждение одной части линии передачи приводит к ее отключению и одновременно к отключению нескольких подстанций. Однако в весьма короткое время путем переключения отключенных подстанций на вторую линию передачи все подстанции вновь вводятся в работу.

В последнее время получают применение схемы, в которых промежуточные подстанции не имеют высоковольтных выключателей и присоединяются к линиям передачи только через разъединители. Защита от токов короткого замыкания в этом случае осуществляется на опорных подстанциях. В остальном же схема работает так же, как и предыдущая.

Если в районе имеется только одна электрическая станция или районная энергосистема имеет такую конфигурацию, что вблизи от электрифицируемой дороги имеется только одна районная подстанция, то приходится отказаться от указанного принципа независимого питания от двух источников энергии и довольствоваться схемой одностороннего питания. В этом

случае, если районная подстанция расположена по отношению к трассе железной дороги, как это показано на рис. 11, наиболее удобной окажется радиальная схема питания. В подобных случаях, как правило, для большей надежности питания сооружают две параллельные линии передачи.

Схемы питания тяговых подстанций могут различаться и в зависимости от напряжения, подводимого к подстанциям. Применяют две схемы:

1) схему питания всех тяговых подстанций от одного основного напряжения, принятого для районной сети;

2) смешанную схему, при которой часть тяговых подстанций питается от промежуточного напряжения.

Использование основного напряжения (обычно 110 кВ) освобождает от необходимости иметь вторую линию передачи пониженного напряжения, но при дальнейшем повышении напряжения до 154—220 кВ схема питания тяговой подстанции от одного напряжения целесообразна только при уменьшенном числе выключателей.

При введении в схему питания промежуточного напряжения 35 кВ она получит вид, представленный на рис. 12. Схемы присоединения тяговых агрегатов подстанции к линии передачи зависят от напряжения в ней. В настоящее время для питания тяговых подстанций могут быть использованы напряжения 6, 10, 35, 110, (154) кВ и в ближайшем будущем — 220 кВ. В первых трех случаях питание тяговых трансформаторов будет осуществляться непосредственно от напряжения линий передачи (рис. 13, а).

На всех тяговых подстанциях железных дорог постоянного тока в СССР и за рубежом применяется так называемая агрегатная схема подстанций, при которой каждый тяговый трансформатор соединен с одним или двумя выпрямителями в один агрегат. Выход из работы трансформатора или выпрямителя ведет к выходу из работы всего агрегата. При выходе из работы одного из двух выпрямителей, после его отключения, агрегат может быть включен в работу, если на подстанции предусмотрены средства для обеспечения правильного распределения нагрузки между ним и другими агрегатами, имеющими два выпрямителя. Эта система дает возможность избежать сложной шестифазной системы шин.

При такой схеме и при применении напряжений 110, 154 и 220 кВ становится целесообразным переходить от одноступенчатого трансформирования к двухступенчатому.

В этом случае уменьшается число высоковольтных выключателей и тем значительнее, чем больше число преобразовательных агрегатов на подстанции. Трансформирование высокого напряжения (110—220 кВ) может осуществляться при помощи только одного или двух (рис. 13, б) параллельно работающих трансформаторов. Применение двух трансформаторов повышает степень надежности схемы питания, но увеличивает стоимость подстанции. При установке только одного трансформатора мощность тяговых подстанций выбирают таким образом, чтобы при выпадении любой подстанции (имеющей один трансформатор) остающиеся смежные подстанции могли взять на себя ее нагрузку.

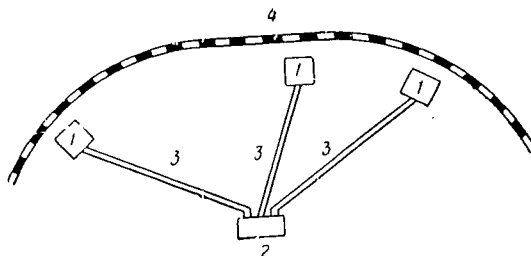


Рис. 11. Радиальная схема питания тяговых подстанций:

1 — тяговая подстанция; 2 — электрическая станция или районная подстанция; 3 — двухцепная линия передачи; 4 — линия железной дороги

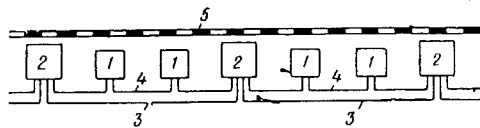


Рис. 12. Смешанная схема питания тяговых подстанций:

1 — тяговая подстанция; 2 — совмещенная подстанция; 3 — линия передачи основного напряжения (110 кВ или выше); 4 — линия передачи промежуточного напряжения (35 кВ); 5 — линия железной дороги

При такой схеме питания на случай выпадения из работы единственного трансформатора необходимо иметь передвижной трансформатор, устанавливаемый на железнодорожной платформе. Такой резервный трансформатор, находясь от наиболее удаленных точек на расстоянии примерно 100 км, сможет быть включен в работу через несколько часов. По данным эксплуатации МЭС СССР, аварийный выход трансформаторов 110 кВ и выше вообще случается довольно редко; при плановом же отключении трансформатора (на длительный срок) резервный трансформатор может быть доставлен к подстанции заранее, что сократит до минимума перерыв в работе подстанции.

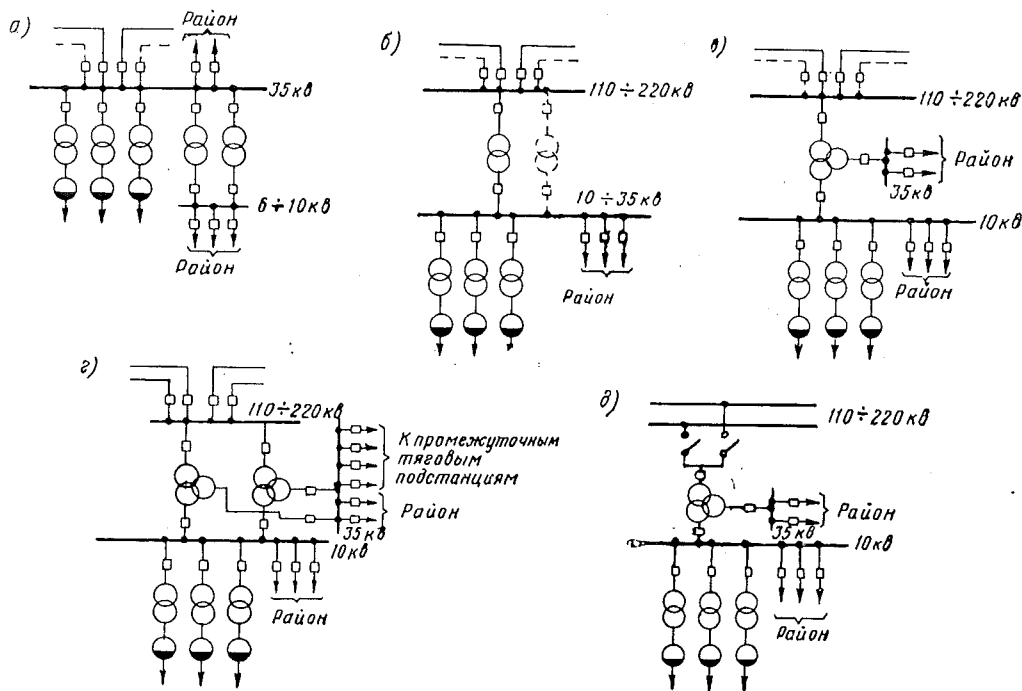


Рис. 13. Схемы коммутации тяговых подстанций постоянного тока:

а — при напряжении питающей линии 35 кВ; б — при двойной трансформации напряжения и двухобмоточных понизительных трансформаторах; в и г — то же, но при трехобмоточных понизительных трансформаторах; д — то же для варианта соединения к отпайке от линии 110—220 кВ

Если тяговая подстанция имеет большую мощность, чем смежные с ней подстанции (например если она питает сеть большой железнодорожной станции), и поэтому при выпадении ее из работы нагрузка ее не может быть взята на себя другими тяговыми подстанциями, то в этом случае приходится на такой подстанции устанавливать два понизительных трансформатора. Мощность этих трансформаторов выбирается таким образом, что при выпадении из работы одного из них мощность остающегося была бы достаточна для питания участка при нормальном графике движения. При этом, если подстанция подключается к двум проходящим линиям отпайками, то для ее удешевления в последнее время рекомендуется выполнять это подключение по схеме блока отпайка — трансформатор, с установкой разъединителя перед трансформатором. Этим устраняется необходимость установки шин и выключателей.

Напряжение на вторичной стороне понижающих трансформаторов выбирается совместно с выбором напряжения для питания района. Для районных потребителей, расположенных вблизи от подстанции, может быть использовано напряжение 6 или 10 кВ. Для охвата большего числа потребителей предпочтительно напряжение 10 кВ. При этом, поскольку на каждой подстанции уже будет напряжение 10 кВ, целесообразно от него питать и тяговые трансформаторы. В случаях же, когда потребители района удалены от тяговой подстанции,

для их питания требуется 35 кВ (рис. 13, б). Если же для части потребителей района надо иметь 35 кВ, а для другой достаточно 10 кВ или в случаях, когда для питания тяговых подстанций применяется смешанная схема питания (110 и 35 кВ или 154 и 35 кВ), а для района 10 кВ в качестве понижающих трансформаторов используются трехобмоточные трансформаторы 110/35/10 кВ или 154/35/10 кВ (рис. 13, в, г, д).

Выбор той или иной схемы питания электрической железной дороги однофазного тока и выбор схемы соединения обмоток трансформаторов теснейшим образом связаны друг с другом. Выбор схемы соединения обмоток трансформаторов зависит от того, предусматривается ли питание от шин тяговой подстанции районных трехфазных потребителей и от соотношения мощности этих потребителей и мощности, потребляемой электрической тягой.

Большую роль в выборе схемы играет также и необходимость в резерве мощности тяговых подстанций, так как затраты для обеспечения необходимого резерва могут существенно отличаться при различных схемах.

§ 5. СХЕМЫ ПИТАНИЯ И СЕКЦИОНИРОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

При проектировании и эксплуатации контактной сети особое внимание уделяется вопросам технической надежности ее работы. Надежность работы контактной сети в первую очередь зависит от схемы ее питания. Не меньшую роль играет и разделение (секционирование) контактной сети на отдельные части (секции), которое производится для возможности отключения любой из этих частей. Во всех схемах питания и секционирования электрическое разделение сети на секции производится только в контактных подвесках, рельсовый же путь в электрическом отношении представляет собой одно целое. Секционное разделение может быть осуществлено с нейтральной вставкой и без нее (рис. 14). Нормально разъединители, присоединяющие нейтральную вставку к секциям контактной сети, питаемым от различных подстанций, разомкнуты и нейтральная вставка не имеет напряжения. Из сравнения рис. 14, а и рис. 14, б видно, что нейтральная вставка по существу представляет собой последовательное соединение двух воздушных промежутков. При проходе поезда под воздушным промежутком токоприемник локомотива соединяет между собой на короткое время секции 1 и 2 (рис. 14, а). Следовательно, такое секционное разделение нельзя применять в случаях, когда соединение секций 1 и 2 может привести к короткому замыканию. Недопустимо оно также при работе участков на одной системе тока, но на разных напряжениях, а также при тяге на однофазном токе, если смежные секции питаются от различных фаз трехфазной линии передачи, и т. п.

Если на данном участке обращаются поезда, питающиеся через несколько токоприемников, как, например, при двойной или тройной тяге или при моторвагонном движении, то длину нейтральной вставки следует выбирать таким образом, чтобы два воздушных промежутка не могли быть одновременно перекрыты ползками различных пантографов.

Схемы питания и секционирования при сравнении оцениваются по технико-экономическим показателям. При этом принимаются во внимание: величина потерь энергии, необходимые мощность подстанций и сечение проводов контактной сети, величина потерь напряжения и величина участка, которую приходится отключать при возникшем коротком замыкании. Если при повреждении

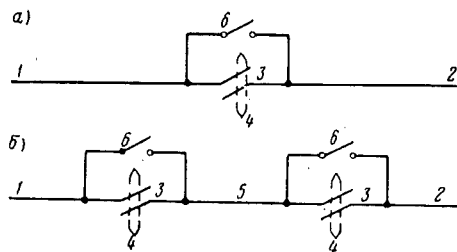


Рис. 14. Принципиальные схемы секционных разъединений:

а—простое секционное разъединение (без нейтральной вставки); б—секционное разъединение с нейтральной вставкой; 1 и 2—разъединяемые секции контактной сети; 3—воздушный промежуток; 4—токоприемник; 5—нейтральная вставка; 6—разъединитель

на каком-либо участке контактной сети происходит короткое замыкание, то необходимо, чтобы поврежденная часть участка отключалась в возможно короткое время и последствия короткого замыкания были наименьшими. Необходимо также, чтобы отключалась только поврежденная часть участка и притом возможно меньшая, чтобы перерыв в питании этой части участка не отражался на питании неповрежденных частей участка.

Для удобства эксплуатации схему секционирования стремятся сделать возможно более простой и достаточно гибкой, обеспечивающей возможность легко отключать поврежденную часть участка.

Однако все же не следует допускать слишком мелкого дробления контактной сети. Такое дробление сильно усложняет схему и конструкцию сети и при аварийных переключениях может привести к ошибочным действиям обслуживающего персонала.

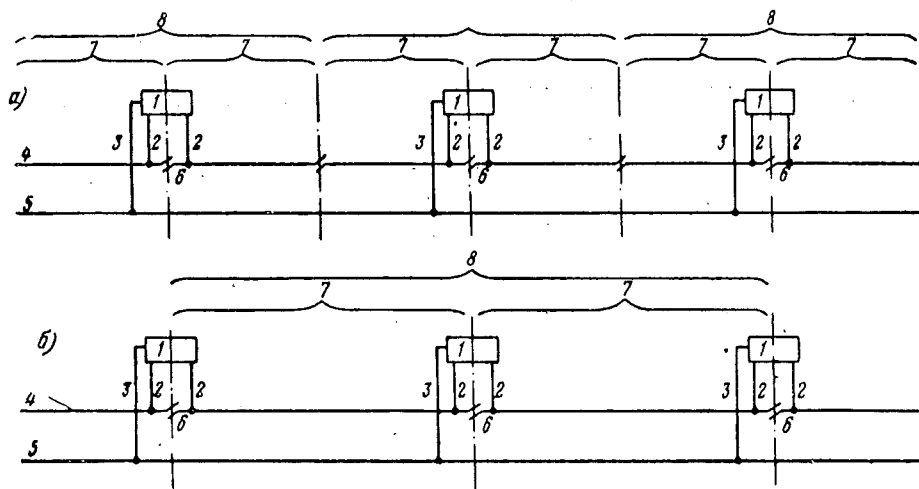


Рис. 15. Схемы питания контактной сети электрических железных дорог:

а — схема одностороннего питания; б — схема двустороннего питания; 1 — тяговые подстанции; 2 — питающие линии (фидеры); 3 — отсасывающие линии; 4 — контактная сеть; 5 — рельсы; 6 — секционные разъединения; 7 — фидерные зоны; 8 — подстанционные зоны

Составление схемы секционирования и питания состоит из:

- 1) выбора принципиальной схемы питания;
- 2) разработки схемы секционирования станций и присоединения подстанций к контактной сети;
- 3) разработки схемы защитного секционирования, т. е. секционирования, обеспечивающего селективность защиты от токов короткого замыкания.

В настоящем параграфе будут рассмотрены широко применяемые схемы питания и секционирования электрифицированных участков.

Основными вопросами, которые приходится разрешать при выборе схемы питания контактной сети, является выбор параллельной или раздельной работы подстанций, а также целесообразность введения в схему поперечных соединений между проводами отдельных путей.

Одностороннее и двустороннее питание. При раздельной работе подстанций, или при так называемой односторонней схеме питания (рис. 15, а), провода контактной сети в середине участка между подстанциями разделяют секционным разъединением на две секции (при необходимости с нейтральной вставкой) и питание нагрузок на каждой секции осуществляется от одной подстанции. На дорогах постоянного тока такая схема применяется, как исключение, и обычно только на концевых участках (консолях), где разделение фидерных зон производится при помощи нейтральной вставки. При параллельной работе подстанций (рис. 15, б), или при так называемой схеме двустороннего питания, нагрузки, расположенные на участке между двумя подстанциями, питаются с двух сторон.

При той и другой схемах каждая часть участка получает питание от определенной подстанции и фидера (рис. 15, а) или от определенных подстанций и фидеров. Та часть участка, которая получает питание от одного и того же фидера или от одних и тех же фидеров (на рис. 15, б от двух фидеров), называется фидерной зоной. На рис. 15, а и б фидерные зоны обозначены цифрой 7. Часть же участка, получающая питание от одной и той же подстанции, независимо от того, питают ли этот участок другие подстанции, называется подстанционной зоной (на рис. 15 обозначена цифрой 8). Подстанционная зона составляется из фидерных зон, питаемых фидерами данной подстанции.

Схема одностороннего питания (рис. 15, а) дает большую степень надежности, так как всякого рода повреждения, вызывающие короткие замыкания, распространяются на меньшую длину участка. Поэтому легче находится место повреждения и, следовательно, оно скорее может быть устранено. Кроме того, разрушительное действие коротких замыканий получается меньшим, так как питание короткого замыкания происходит с одной стороны и поэтому токи короткого замыкания (в месте короткого замыкания) получаются также меньшими.

Однако двустороннее питание имеет другие серьезные преимущества. Основными из них являются значительно меньшие потери энергии и потери напряжения в сети, а также более равномерная нагрузка подстанций.

В схеме одностороннего питания при движении по первой половине участка каждый поезд будет питаться только от одной подстанции и, следовательно, ток будет целиком протекать по одной секции контактной сети, а при проходе поездом середины участка, т. е. при переходе его на вторую секцию, первая подстанция и первая секция сети освободятся от нагрузки и она целиком передастся через вторую секцию на вторую подстанцию. Поэтому подстанция и секции контактной сети при одностороннем питании загружаются в течение меньшего времени, но зато большей нагрузкой. При двустороннем питании ток будет поступать с двух сторон все время, пока нагрузка будет находиться между данными подстанциями, т. е. подстанции и контактная сеть будут загружены большее время меньшей нагрузкой. Таким образом подстанции и контактная сеть при двустороннем питании нагружены более равномерно по времени. Вследствие же того, что потери энергии в линии и мощность подстанций зависят от квадрата нагрузки, то чем неравномернее по времени будет распределяться эта нагрузка, тем при прочих равных условиях будут больше потери энергии и потребная мощность тяговых подстанций. Потери напряжения, особенно их максимальные значения, также находятся в зависимости от схемы питания и получаются меньшими при двустороннем питании.

Схемы питания на дорогах переменного тока промышленной частоты выбираются совместно со схемами соединения обмоток трансформаторов на тяговых подстанциях, о чем будет сказано ниже.

Поперечные соединения на многпутных участках. На двухпутных или многпутных участках контактные подвески отдельных путей могут питаться отдельно (схема раздельного питания путей) или они могут быть между собой соединены специальными поперечными соединениями (схема параллельного соединения путей). Рельсовые же пути во всех случаях соединяются параллельно специальными междурельсовыми и междупутными соединениями.

Применение поперечных соединений проводов контактной сети путей многпутного и двухпутного участков приводит к некоторому выравниванию нагрузок в проводах. Это выравнивание позволяет уменьшить сечение проводов, причем потери энергии и потери напряжения получаются меньшими, чем при раздельном питании, даже при сниженном сечении проводов.

Как будет видно из дальнейшего, выравнивание нагрузок в проводах контактной сети отдельных путей приводит к значительному облегчению защиты от токов короткого замыкания.

Кроме того, поперечные соединения проводов контактной сети путей улучшают условия рекуперации энергии, так как облегчают передачу энергии

от рекуперирующего локомотива к локомотиву, следующему в тяговом режиме по другому пути.

Влияние соединения проводов отдельных путей двухпутного участка на потери энергии в сети и потери напряжения от подстанции до поезда поясняется рис. 16. При построении изображенных на этом рисунке кривых принято, что в рассматриваемой зоне движется только один поезд по одному пути. Потеря мощности и потеря напряжения при полном параллельном

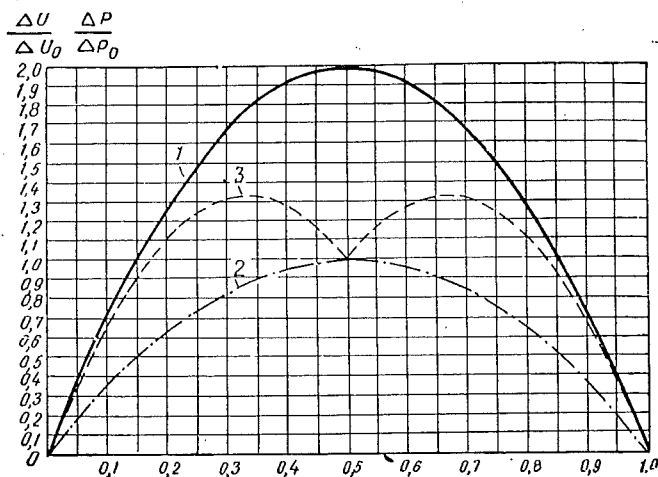


Рис. 16. Кривые изменения соотношения потерь напряжения или потерь мощности:

1 — при раздельной работе проводов отдельных путей; 2 — при полном параллельном соединении; 3 — при соединении только в одной точке, в середине участка

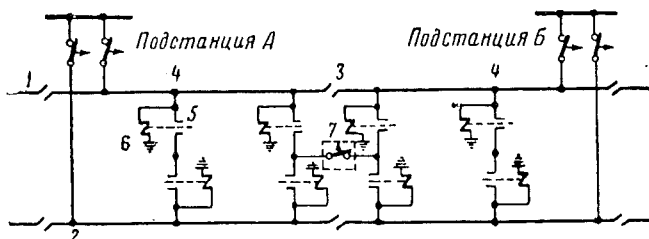


Рис. 17. Схема параллельного соединения проводов контактной сети двухпутного участка в трех точках:

1 и 2 — контактные подвески 1-го и 2-го путей; 3 — пост секционирования; 4 — пост параллельного соединения; 5 — контакторы; 6 — держащая катушка контакторов; 7 — быстродействующий автоматический выключатель

ных условиях соединение проводов контактной сети двухпутного участка в одной точке (в середине) дает уменьшение потерь энергии на 11÷15% (при неизменном сечении проводов). Если поперечные соединения расположены равномерно по длине фидерной зоны в трех точках, то экономия в потерях энергии достигает 21÷24%.

Дальнейшее увеличение числа поперечных соединений малоэффективно. Например, при пяти соединениях экономия потерь энергии достигает только величины 24—28%. Число соединений должно для каждого случая выбираться на основании технико-экономических соображений. Однако согласно тем же исследованиям для схем с двусторонним питанием в большинстве случаев наиболее целесообразным является применение трех поперечных соединений. Такая схема описана ниже и показана на рис. 17.

Схемы присоединения подстанций к контактной сети. Как отмечено выше, для повышения технической надежности контактная сеть разделяется в элек-

соединении проводов путей при расположении нагрузки в середине фидерной зоны обозначены через ΔP_0 и ΔU_0 . Потери напряжения при других схемах и в других точках даны в виде отношения этих величин к ΔP_0 и ΔU_0 при неизменном сечении проводов. Длина фидерной зоны принята равной единице. По оси абсцисс отложена длина в долях этой единицы. Как видно из рис. 16, поперечное соединение проводов различных путей в рассматриваемом случае дает заметное уменьшение потерь энергии и потерь напряжения в проводах контактной сети.

Увеличение числа нагрузок на обоих путях уменьшает степень выгоды от таких соединений, однако она остается все же столь ощутимой, что, как правило, во всех проектах предусматриваются такие поперечные соединения.

Согласно специально проведенным исследованиям [2] в реаль-

трическом отношении на части — секции, т. е. секционируется. Как правило, секционирование производится у места расположения тяговой подстанции (рис. 15) и питание каждой примыкающей секции сети осуществляется через свой фидер. Эти фидеры выполняются или воздушной линией или кабелем (для метрополитена только кабелем). Присоединение контактной сети к шинам тяговой подстанции осуществляется на дорогах постоянного тока через быстродействующий автоматический выключатель, установленный на подстанции, и разъединитель, установленный на опоре контактной сети (рис. 18). На участках переменного тока присоединение осуществляется через специальный воздушный или масляный выключатель и также через разъединитель в контактной сети. Кроме того, предусматривается еще один разъединитель так называемый продольный, который может быть использован при повреждении одного из фидеров.

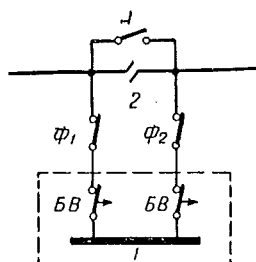


Рис. 18. Схема секционирования и присоединения к подстанции сети однопутного участка;

1 — шина постоянного тока подстанции; 2 — секционное разъединение; БВ — быстродействующий выключатель фидера; Φ_1 , Φ_2 — фидерные разъединители; А — продольный разъединитель

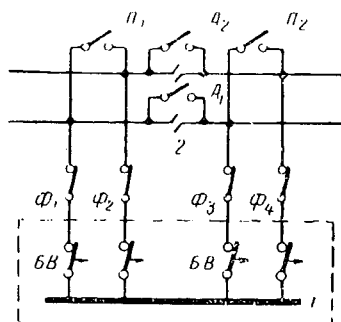


Рис. 19. Схема секционирования и присоединения к подстанции сети двухпутного участка;

1 — шина постоянного тока подстанции; 2 — секционное разъединение; БВ — быстродействующие выключатели; Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 и Φ_4 — фидерные разъединители; A_1 и A_2 — продольные разъединители; P_1 и P_2 — поперечные разъединители

На многопутном участке контактная подвеска также секционируется над каждым путем и питается двумя отдельными фидерами. Назначение продольных разъединителей A_1 , A_2 то же, что и на однопутном участке. Кроме продольных разъединителей, часто в схеме предусматривают так называемые поперечные разъединители (рис. 19), которые хотя и дают некоторые дополнительные усложнения, но позволяют осуществить питание двух путей через один фидер. К такой схеме питания приходится прибегать при производстве ремонтно-ревизионных работ на тяговых подстанциях, а также при повреждении фидера, фидерного автомата или фидерного разъединителя. Разделение контактной сети на секции, а также отделение сети перегона от сети станций достигается устройством секционных разъединений с воздушными промежутками. Для предотвращения возможности перекрытия ползком пантографа воздушного промежутка при приеме электровоза на отключенный и заземленный участок контактной сети, а также в местах сопряжения участков с различным напряжением в сети должно быть применено секционное разъединение с нейтральной вставкой (рис. 14).

Секционные разъединения, предназначенные для отделения станции от перегона, должны располагаться между входным сигналом и первой стрелкой станции со стороны перегона с тем, чтобы в случае отключения станционных путей при аварии или ремонте контактной сети на станции подходящий с перегона поезд мог быть остановлен у входного сигнала.

Буквенные и цифровые обозначения секционных разъединителей устанавливаются так, чтобы облегчить запоминание схемы секционирования участка и название отдельных разъединителей. Для этого на магистральных же-

лезных дорогах продольные разъединители, расположенные, например, с северной стороны однопутной станции, обозначают буквой *А*; продольные разъединители, расположенные с южной стороны, буквой *Б* и т. п. На двухпутных станциях продольные разъединители по нечетному пути обозначают соответственно буквами *А* и *Б*, по четному — буквами *В* и *Г*. Фидерные разъединители, установленные по нечетному пути, обозначают буквой *Ф* с нечетным значком, а установленные на четном, — с четным значком и т. д. Для различных железнодорожных устройств к наименованию разъединителя прибавляется наименование устройства, на котором он установлен, например: «фидерный разъединитель Φ_3 подстанции *Л*» или «поперечный разъединитель *П* станции *М*» и т. п.

На Московском метрополитене применяется иная система обозначений. Каждая подстанция имеет свой номер. Фидеры подстанции обозначаются многозначными номерами, в которых первая цифра или группа цифр означает номер подстанции, а вторая — номер фидера этой подстанции. Секционные разъединители обозначаются номерами соединяемых ими фидеров, причем первой стоит группа цифр, относящаяся к фидеру, идущему первым по ходу поезда. Если разъединитель предназначен для того чтобы отключить тупиковую часть контактного рельса, то для его обозначения к номеру фидера, от которого происходит питание отключаемой части, добавляется цифра 0.

Например, наименование «Фидер 72» обозначает, что речь идет о втором фидере подстанции номер семь. Из наименования «разъединитель $\frac{123-131}{2}$ »

следует заключить, что имеется в виду секционный разъединитель третьего рельса, соединяющий 3-й фидер 12-й подстанции с 1-м фидером 13-й подстанции; цифра 2 в знаменателе говорит о том, что это второй секционный разъединитель, если идти со стороны подстанции № 12. Обозначение « $\frac{305-0}{1}$ » следует

расшифровать так: разъединитель 5-го фидера 30-й подстанции, расположенный первым по ходу от подстанции и отключающий участок контактного рельса, не имеющий питания с другой стороны. Такая система дает возможность легко запомнить обозначение разъединителей.

Наиболее ответственные разъединители стремятся по возможности снабжать дистанционным управлением. Наилучшей и наиболее технически совершенной является система с диспетчерским управлением секционными разъединителями, при которой управление ими сосредоточивается в одном пункте и поручается одному лицу. При отсутствии такой системы управление разъединителями поручается обычно работникам контактной сети, подстанции или железнодорожной станции.

Показанные на рис. 18 и 19 схемы секционирования и питания контактной сети применяются при расположении подстанции на перегоне или около малого остановочного пункта, не имеющего большого путевого развития. При расположении тяговой подстанции на железнодорожной станции для контактной сети станции, как правило, предусматривают особый фидер (рис. 20).

Контактная сеть станции питается либо от этого фидера, либо через фидер перегона, но во всех случаях фидерные зоны должны быть разделены секционным разъединением. Если на этой станции расположено электродепо, то специальный фидер выделяется и для сети депо.

Так, например, в схеме рис. 20, если разъединитель Φ_7 замкнут, то продольные разъединители разомкнуты, если же разъединитель Φ_7 разомкнут, то замкнут один из продольных разъединителей.

При большой протяженности станции длина фидеров может получиться весьма большой. Поэтому, если подстанция расположена в конце станции, сеть станции присоединяют, не выделяя особого фидера. При такой схеме одно направление перегона питается через сеть станции (рис. 21).

Контактная сеть метрополитена, так же как и на дорогах, секционируется около подстанции, или, точнее, около постов переключения (т. е. в местах

примыкания фидеров к контактному рельсу). При этом секционное разъединение устраивается таким образом, чтобы два токоприемника одного и того же моторного вагона, как правило, не могли одновременно касаться различных секций контактной сети. Такая предосторожность необходима для того, чтобы при возникновении короткого замыкания на одной секции оно не могло питаться через смежные секции при соединении их (двумя токоприемниками подвижного состава) с поврежденной (рис. 22).

Схема питания контактной сети перегонов. На рис. 23 представлена наиболее простая схема питания. Здесь каждая подстанция питает части участка, примыкающие к ней слева и справа (схема одностороннего питания). У подстанции сеть электрически разделяется. Такое разделение сети обеспечивает

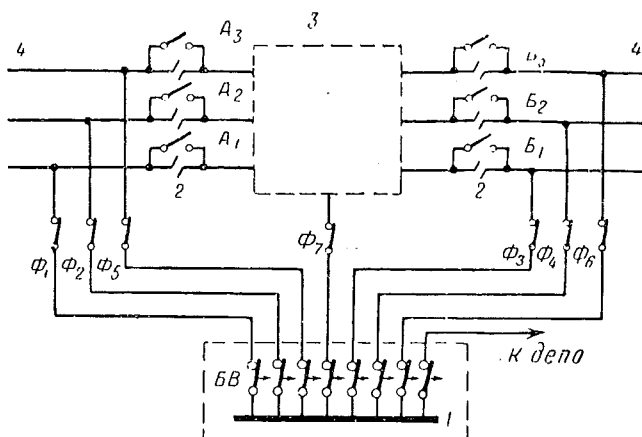


Рис. 20. Схема секционирования и присоединения к подстанции сети многопутного участка при расположении подстанции на железнодорожной станции: 1 — шина постоянного тока подстанции; 2 — секционное разъединение; 3 — контактная сеть железнодорожной станции; 4 — контактная сеть перегона; БВ — быстродействующие выключатели; Φ_1 — Φ_6 — разъединители фидеров перегона; Φ_7 — разъединитель фидера станции; $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ — продольные разъединители (поперечные не показаны)

независимость питания одного участка от другого. При производстве работ или возникновении короткого замыкания отключается только один участок,

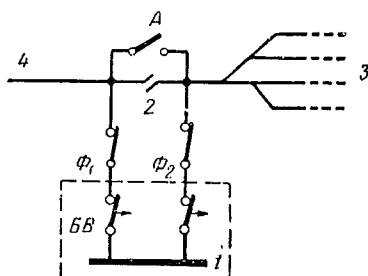


Рис. 21. Схема присоединения сети к подстанции при расположении подстанции в конце железнодорожной станции (обозначения позиций см. на рис. 20)

а другой остается присоединенным к сети. Разъединитель C при раздельной работе подстанций нормально разомкнут, вследствие чего короткое замыкание на одной части участка не отражается на работе соседних участков, так как появление короткого замыкания на какой-либо секции вызывает отключение лишь быстродействующего автоматического выключателя соответствующего фидера. При схеме параллельной работы подстанций разъединитель C замкнут. В этом случае возникновение короткого замыкания на одной из частей сети между двумя подстанциями приводит к выпадению из работы всего участка между смежными подстанциями. Если подобное положение недопустимо, то соединение отдельных секций сети осуществляют в середине участка одним или двумя автоматическими выключателями (в зависимости от их типа). Такое устройство называется постом секционирования.

В схеме поста секционирования при применении направленных выключателей необходима установка двух выключателей для возможности отключения тока любого направления, а следовательно, тока короткого замыкания, на какой бы части участка это короткое замыкание не возникло (рис. 24). При применении ненаправленных выключателей достаточно установка одного выключателя. Автоматические выключатели направленного типа поста секционирования отрегулированы на отключение тока, превышающего определенную величину и протекающего от шины 3 (рис. 24) к сети. В этом случае отключается лишь тот выключатель, который присоединяется к поврежденному участку. С другой стороны, поврежденный участок отсоединяется от пункта питания при помощи фидерного автоматического выключателя. Выключатели

поста могут включаться как вручную (на месте), так и при помощи телеуправления. В некоторых схемах выключатели снабжены реле напряжения, включающим выключатели при появлении напряжения после устранения по-

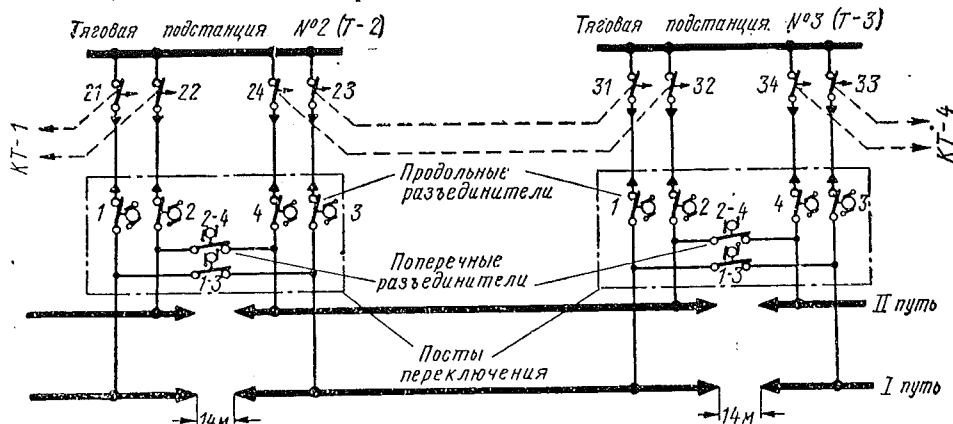


Рис. 22. Принципиальная схема участка контактной сети с двусторонним питанием: 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 34 — быстродействующие выключатели; 1, 2, 3, 4, 1-3 и 2-4 — дистанционноуправляемые разъединители

вреждения на участке. При этом пост секционирования не требует особого обслуживания. Если отключение при коротком замыкании только половины фидерной зоны не дает заметных преимуществ по сравнению со случаем отклю-

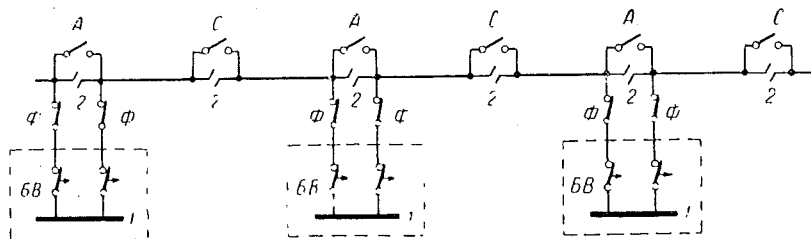


Рис. 23. Схема одностороннего (консольного) питания контактной сети:
1 — шина постоянного тока тяговой подстанции; 2 — секционное разъединение;
А и С — продольные разъединители; Ф — разъединители фидеров подстанций; БВ — быстродействующие выключатели

ния всей зоны, то секционного поста можно не устраивать. Схема без поста секционирования получит тот же вид, что и на рис. 23, с той лишь разницей, что разъединитель С нормально замкнут, и защита всего участка осуществляется лишь выключателями фидеров.

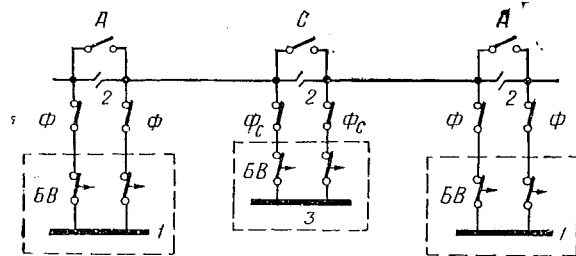


Рис. 24. Схема двустороннего питания контактной сети с постом секционирования, с поляризованными выключателями:
Ф_с — разъединители фидеров поста секционирования (обозначения остальных позиций см. на рис. 23)

дении одного из фидеров участок отключается от сети и питание его производится через соседние участки, для чего замыкаются соответствующие разъединители. Такая схема применяется главным образом на городских электрических дорогах.

Следует также упомянуть о схеме питания и секционирования, при которой контактная сеть разбивается на ряд участков, изолированных друг от друга (рис. 25). Для соединения их предусматриваются разъединители C_1, C_2, C_3 и C_4 , нормально разомкнутые. Каждый участок питается от своего отдельного фидера. При поврежде-

На двухпутных или многопутных участках при применяемых схемах питания с раздельной или параллельной работой подстанций, как указывалось выше, возможны схемы параллельного и раздельного питания контактной сети отдельных путей.

Понятие «параллельное питание» контактной сети здесь применяется условно, так как соединение подвесок отдельных путей производится в одной или нескольких точках, а не на всем протяжении.

Параллельное питание контактной сети отдельных путей при двустороннем питании осуществляется автоматическими выключателями, которые сосредоточиваются в одном месте, обычно около середины участка между двумя под-

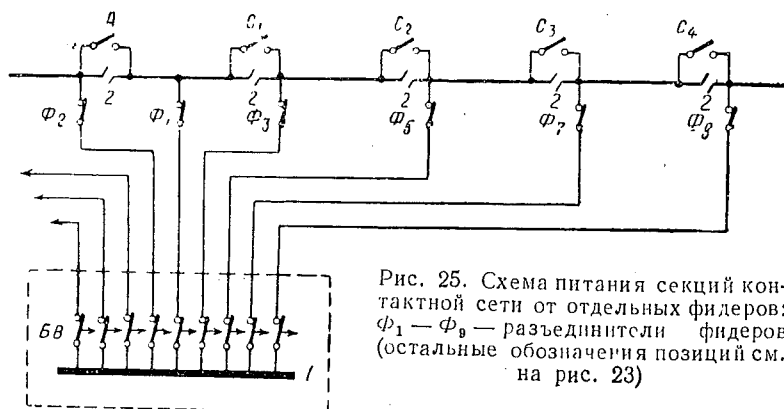


Рис. 25. Схема питания секций контактной сети от отдельных фидеров: $\Phi_1 - \Phi_8$ — разъединители фидеров (остальные обозначения позиций см. на рис. 23)

станциями в посту секционирования (рис. 26). На некоторых участках зарубежных дорог осуществляется соединение еще и в постах параллельного соединения (рис. 27), располагающихся обычно между подстанциями и постами секционирования. При повреждении контактной сети одного пути отключаются только те выключатели постов секционирования и параллельного соединения, которые присоединены к поврежденному участку, и сам поврежденный участок.

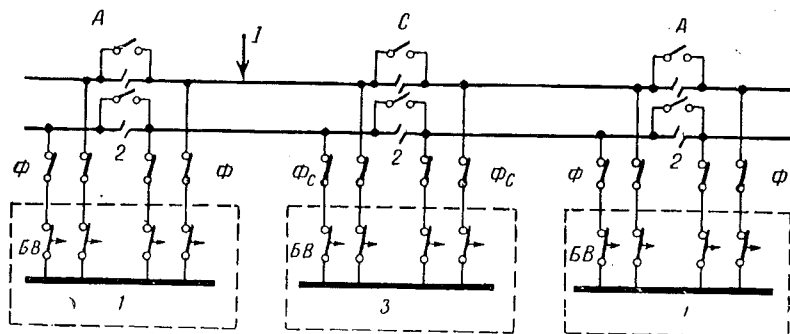


Рис. 26. Схема питания и секционирования двухпутного участка с постом секционирования (обозначения позиций см. на рис. 23 и 24)

Такие схемы сложны и, главное, требуют большого количества быстродействующих автоматических выключателей. Значительно более простой и в то же время достаточно надежной является схема с одним постом секционирования и двумя постами параллельного соединения, работающая при одном (ненаправленном) быстродействующем выключателе (см. рис. 17).

Как видно из схемы, соединения контактных подвесок отдельных путей производятся парой последовательно соединенных контакторов. Держащая катушка каждого контактора получает питание от «своего» пути.

При нормальных условиях работы, т. е. когда в сети имеется напряжение, все держащие катушки контакторов находятся под напряжением и контакторы соединяют между собой провода обоих путей. При коротком замыкании кон-

тактной сети отключается одна подстанция (ближайшая) и выключатель 7. Сеть на половине участка остается без напряжения и контакторы в этой части участка размыкаются. При этом провода отдельных путей разъединяются и на неповрежденную контактную сеть может быть снова подано напряжение. После устранения повреждения контактной сети в нее вновь подают напряжение, включают контакторы и схема восстанавливается.

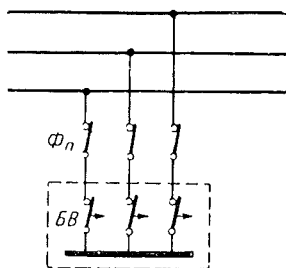


Рис. 27. Схема поста параллельного соединения: Φ_n — разъединители фидеров поста параллельного соединения; БВ — быстродействующие выключатели

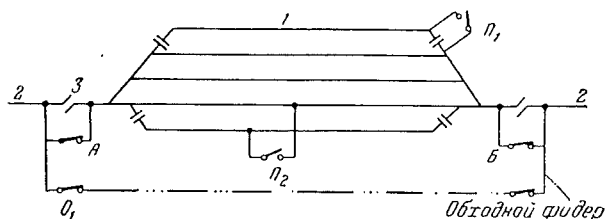


Рис. 28. Схема соединения контактной сети перегонов однопутного участка при помощи обходного фидера на опытном участке однофазного тока Ожерелье—Пивлец Московско-Курско-Донбасской ж. д. (при системе однофазного тока промышленной частоты):

1 — контактная сеть станции; 2 — контактная сеть перегонов; 3 — секционные разъединения; А, Б — продольные разъединители; P_1, P_2 — поперечные разъединители; O_1 — разъединитель обходного фидера

Схемы питания контактной сети промежуточных станций. Контактная сеть промежуточных станций (станций, на которых нет тяговых подстанций), за исключением мелких остановочных пунктов пригородных участков, отделяется от перегонов при помощи секционных разъединений, образуя само-

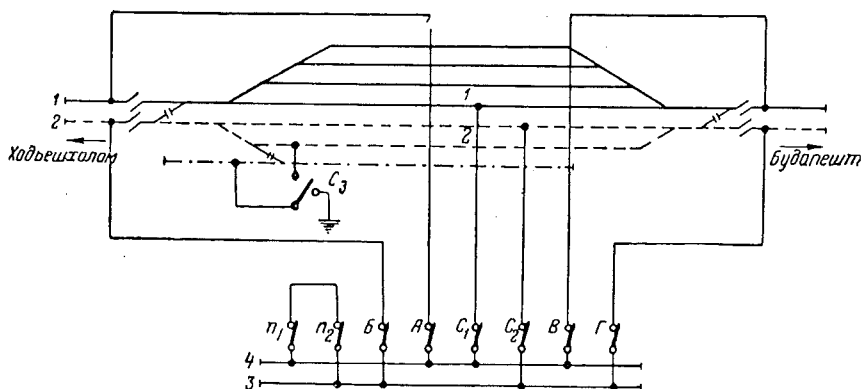


Рис. 29. Схема соединения контактной сети перегонов и питания станционных путей двухпутного участка при помощи обходных фидеров на венгерской железной дороге при системе однофазного тока промышленной частоты:

1 и 2 — контактная сеть главных путей; 3 — пост переключения с двойной системой шин; 4 и 5 — шины поста переключения; $P_1, P_2, A, B, B, G, C_1, C_2$ — разъединители; C_3 — разъединитель с заземляющим контактом

стоятельные секции. Эти секции соединяются с контактной сетью перегонов при помощи нормально замкнутых разъединителей. Схемы же секционирования контактной сети на самой станции могут сильно отличаться друг от друга в зависимости от расположения путей на станции и характера ее работы. Эти схемы изучаются в курсе «Контактная сеть».

Так как нарушения нормальной работы контактной сети, вызывающие короткие замыкания и ее отключения, чаще происходят на железнодорожных станциях, то иногда применяют схему питания, дающую возможность сохранить параллельную работу тяговых подстанций и при отключенной контактной сети железнодорожной станции. Для этой цели перегоны «в обход» контактной сети станции соединяются между собой обходным фидером. В этом

случае применяют различные схемы соединения контактной сети перегонов. Наиболее простой из них на однопутном участке является схема, примененная на опытном участке однофазного тока промышленной частоты Московско-Курско-Донбасской ж. д. (рис. 28). Аналогичная схема применена и на двухпутном участке венгерской железной дороги (также однофазного тока промышленной частоты, рис. 29). В этой схеме все разъединители собраны в так называемые посты переключения, что дает возможность из одного пункта осуществить все необходимые действия.

На рис. 30 условно на одной схеме показаны: схема питания станций и схема соединения перегонов, применяемые на швейцарских железных дорогах, работающих на системе однофазного тока пониженной частоты.

Схема рис. 30, а отличается от рассмотренной схемы венгерской железной дороги (рис. 29) тем, что в poste переключения швейцарских дорог имеется одна общая шина.

Схема рис. 30, б применяется на станциях большой протяженности с развитыми парками. В этом случае для уменьшения длины обходных фидеров применяют два поста переключения, соединенных между собой одним обходным фидером. Схема, показанная на рис. 30, в, сходна со схемой венгерских железных дорог.

На рис. 30, г показана упрощенная схема питания малой станции.

Существенным отличием схем, показанных на рис. 30, от схем рис. 28 и 29 является то, что здесь все соединения осуществляются через масляные выключатели, тогда как в схемах рис. 28 и 29 ограничиваются только применением разъединителей.

Примеры схем питания и секционирования контактной сети. На рис. 31 и 32 приведены примеры схем питания и секционирования.

На пригородном участке дороги (рис. 31) расположены четыре подстанции: подстанция А находится в конце станции и присоединяется к сети четырьмя фидерами; в конце другой станции расположена подстанция В; подстанции В и Е имеют по пять фидеров; по четыре фидера на каждой из этих подстанций отходят к перегонам; пятый фидер подстанций В и Е предназначается для питания путей станции и депо. Секционные посты С₁, С₂ и С₃ соединяют отдельные секции контактной сети в продольном и поперечном направлениях.

На рис. 32 приведена схема питания и секционирования контактной сети опытного участка однофазного тока промышленной частоты Московско-Курско-Донбасской ж. д.

На всех приведенных схемах (рис. 18—32) показаны положения разъединителей (замкнутое или разомкнутое), соответствующие нормальной схеме.

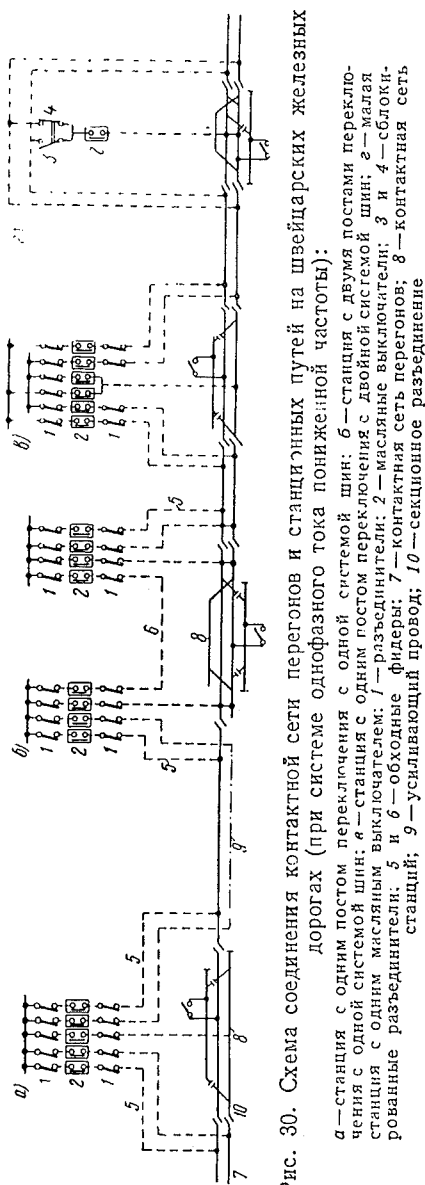


Рис. 30. Схема соединения контактной сети перегонов и станционных путей на швейцарских железных дорогах (при системе однофазного тока пониженной частоты):

а — станция с одним постом переключения с одной системой шин; б — станция с двумя постами переключения с одной системой шин; в — станция с одним постом переключения с двойной системой шин; г — малая станция с одним масляным выключателем; 1 — разъединитель; 2 — масляные выключатели; 3 и 4 — обходные фидеры; 5 и 6 — обходные фидеры; 7 — контактная сеть перегонов; 8 — контактная сеть станций; 9 — усиливающий провод; 10 — секционное разделение

Особенности схем питания контактной сети участков однофазного тока промышленной частоты определяются тем обстоятельством, что питание однофазных потребителей (поездов) производится от трехфазной районной сети.

Для того чтобы уменьшить неравномерность нагрузки фаз трехфазной сети, схему присоединения отдельных подстанционных зон контактной сети

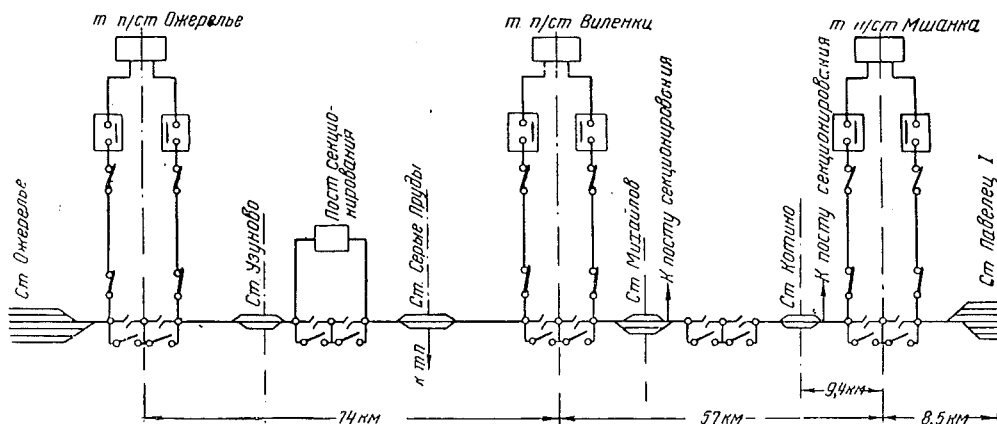


Рис. 32. Схема питания и секционирования контактной сети опытного участка Московско-Курско-Донбасской ж. д. на однофазном токе промышленной частоты

к трехфазной районной сети поочередно меняют (по кругу). В этом случае несимметрия нагрузки фаз трехфазной сети определяется только неравномерностью расхода энергии на отдельных подстанционных зонах. Наиболее просто такая схема осуществляется при одностороннем питании (рис. 33) контактной сети через однофазные трансформаторы с поочередным присоединением их

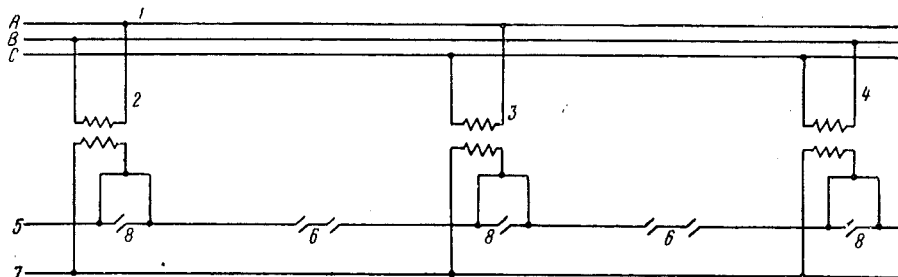


Рис. 33. Схема питания контактной сети однофазного тока промышленной частоты от трехфазной сети при помощи однофазных трансформаторных подстанций:

1 — трехфазная линия передачи; 2 — подстанция, присоединенная к фазам А и В; 3 — то же, к фазам А и С; 4 — то же, к фазам В и С; 5 — контактная сеть; 6 — секционные разъединения при помощи нейтральной вставки; 7 — рельсы; 8 — секционные разъединения

к различным фазам трехфазной сети. Такая схема питания применена на венгерских железных дорогах. На схеме рис. 33 показано, что три однофазные подстанции поочередно присоединяются к различной паре фаз трехфазной сети, обеспечивая тем самым более равномерную нагрузку трехфазной системы.

Схемы двустороннего питания могут быть осуществлены при различных схемах соединения трансформаторов на тяговых подстанциях. Однако во всех случаях схема двустороннего питания может быть осуществлена только при условии питания каждой фидерной зоны от одних и тех же фаз. Такая схема может быть получена при соединении однофазных трансформаторов в схему так называемого открытого треугольника (рис. 34). Для получения более равномерной загрузки трехфазной системы применяются трехфазно-двухфазные трансформаторы (схема Скотта, рис. 35). Питание районных потребителей (трехфазных), от однофазных и трехфазно-двухфазных подстанций невозможно. При схеме же соединения двух однофазных трансформаторов в открытый

треугольник на вторичной стороне получается трехфазная система и, следовательно, обеспечивается питание районных потребителей. Однако из-за возможности выхода из строя одного трансформатора надежнее питание трехфазных потребителей от такой подстанции можно обеспечить только при наличии резервных трансформаторов. Если же применить схему полного треугольника, т. е. составленную из трех однофазных трансформаторов, то даже при выходе из строя одного трансформатора сохраняется возможность питания трехфазных потребителей.

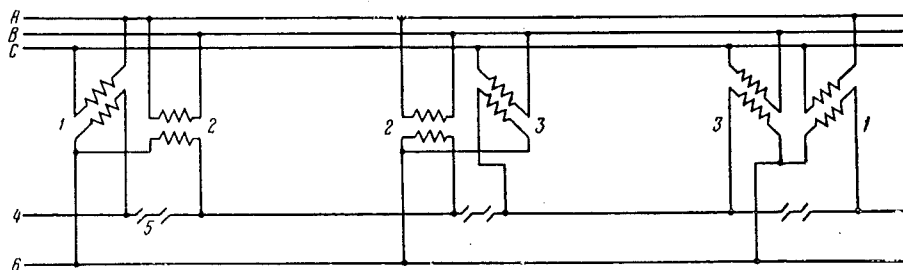


Рис. 34. Схема питания контактной сети однофазного тока промышленной частоты от трехфазной сети при помощи однофазных трансформаторов, соединенных в открытый треугольник:

1 — однофазные трансформаторы подстанции, питающиеся от фаз A и C; 2 — то же, от фаз A и B, 3 — то же, от фаз B и C; 4 — контактная сеть; 5 — сегментное разъединение посредством нейтральной вставки; 6 — рельсы

В том случае, когда на подстанции предполагается использовать трехфазные трансформаторы или группы, составленные из трех однофазных трансформаторов, создается удобная схема для параллельной работы тяговых подстанций и для питания нетяговых потребителей. Однако в этом случае следует

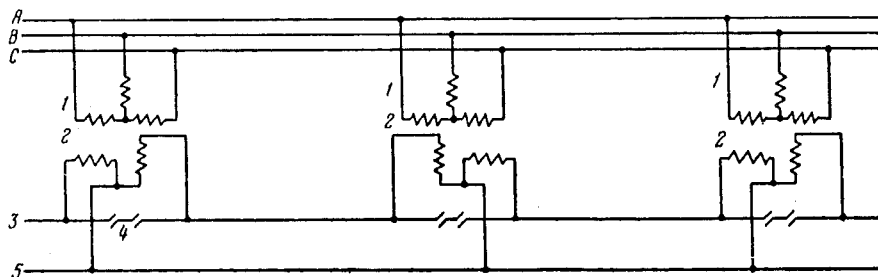


Рис. 35. Схема питания контактной сети однофазного тока промышленной частоты от трехфазной сети при помощи трехфазно-двухфазных трансформаторов (схема Скотта): 1 — подстанции; 2 — трехфазно-двухфазные трансформаторы; 3 — контактная сеть; 4 — сегментное разъединение посредством нейтральной вставки; 5 — рельсы

иметь в виду, что обмотки трансформаторов будут нагружены неравномерно. Необходимую мощность в этом случае приходится определять по наиболее загруженной фазе. При трехфазных трансформаторах происходит некоторое выравнивание температуры отдельных обмоток за счет общей масляной ванны и общего стального сердечника и поэтому нагрузка на наиболее нагруженную обмотку в трехфазном трансформаторе может быть допущена большая, чем в группе однофазных трансформаторов. Говоря другими словами, при прочих равных условиях необходимая мощность при трехфазных трансформаторах будет меньше, чем при группе однофазных.

Ко всему этому следует еще добавить, что трехфазный трансформатор дешевле, чем группа однофазных трансформаторов равной мощности, особенно с учетом установки и монтажа. Правда, при трехфазном трансформаторе резерв придется иметь в виде целого трансформатора (т. е. обычно 100%-ный), при группе же однофазных трансформаторов практически достаточно иметь в резерве один однофазный трансформатор. Однако схема соединений подстанции

получается значительно более сложной и громоздкой, что уменьшает выгоду такого варианта.

Следует указать, что параллельная работа подстанций на контактную сеть при однофазном токе промышленной частоты имеет некоторые особенности. В этом случае контактная сеть практически является линией, соединяющей между собой центры питания.

Поэтому при неравенстве напряжений на шинах тяговых подстанций как по величине, так и по фазе по контактной сети может протекать уравнивающий (транзитный) ток, на что нормально контактная сеть и тяговые подстанции не рассчитаны.

Если тяговые подстанции получают питание от мощной высоковольтной линии передачи (более 110 кВ), полное сопротивление которой невелико, то нет оснований ожидать большой разницы напряжения на тяговых подстанциях и тогда указанные опасения теряют свое значение.

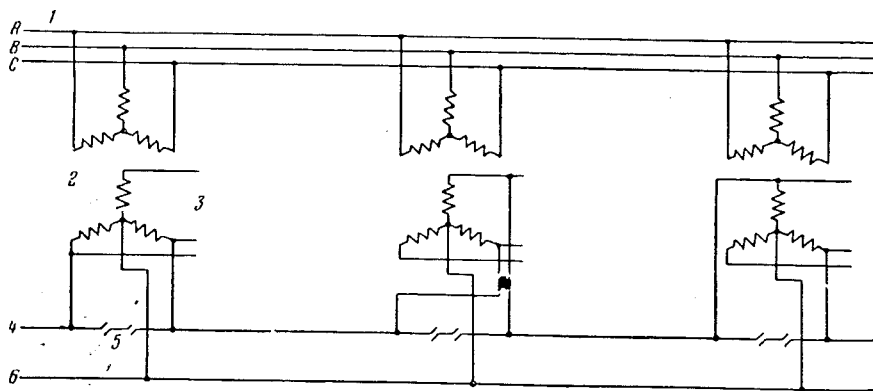


Рис. 36. Схема питания контактной сети однофазного тока промышленной частоты от трехфазной сети при помощи трехфазных трансформаторов с вторичной обмоткой, соединенной в звезду:

1 — трехфазная линия передачи; 2 — трансформатор; 3 — питание района 35 кВ; 4 — контактная сеть 20 кВ; 5 — секционное разъединение с нейтральной вставкой; 6 — рельсы

Однако при большом расстоянии между центрами питания, особенно если имеются в системе крупные потребители энергии, а в сети имеются устройства для регулирования напряжения, которые могут вызвать уравнивающие токи, указанная опасность имеет место.

По этим соображениям в некоторых случаях (как, например, на французских железных дорогах) предпочитают систему одностороннего питания.

Питание района может осуществляться как от трехобмоточных трансформаторов, так и от двухобмоточных. В первом случае контактная сеть и район получают питание от отдельных обмоток. Во втором случае или район питается тем же напряжением, что и тяга по системе ДПЗ (два провода, земля), или район получает питание от специального трансформатора, который в свою очередь подключается к тяговым шинам трехфазного тока. При этом надо иметь в виду, что трехобмоточные трансформаторы значительно дороже, чем двухобмоточные, и при относительно малой мощности районных потребителей вторая схема может оказаться дешевле.

Стандартные трехобмоточные трансформаторы выпускаются с высокой мощностью третьей обмотки, используемой в данном случае для питания нетяговых (районных) потребителей. Поэтому для подстанции, где трехфазная (т. е. нетяговая) нагрузка относительно мала и потребители расположены вблизи от подстанции, так что питание их возможно при напряжении 10 кВ, выгоднее применять двухобмоточные трансформаторы с применением понижающих (районных) трансформаторов, получающих питание от тех же шин от которых питается электрическая тяга.

Распределение нагрузки между фазами первичной обмотки трансформатора и фазами линии передачи зависит от схемы соединения обмоток трансформатора.

В стандартных схемах трансформаторов имеется схема соединения звездой и треугольником. При использовании трансформаторов со вторичной обмоткой, соединенной звездой (к рельсу присоединен нулевой провод), загружаются тяговой нагрузкой только две фазы обмотки. Третья же обмотка остается неиспользованной. При соединении же вторичной обмотки треугольником достигается более равномерная нагрузка всех трех фаз, и если в основном трансформатор питает тяговую нагрузку, получается лучшее использование трансформатора. В том же случае, если преобладающей является нетяговая нагрузка и для питания района требуется напряжение 35 кВ, могут быть использованы

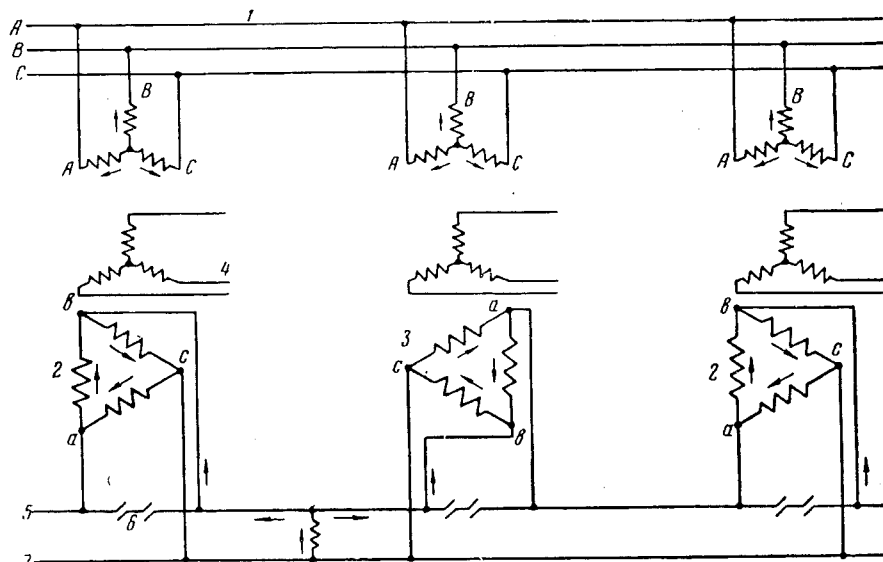


Рис. 37. Схема питания контактной сети однофазного тока промышленной частоты от трехфазной сети при помощи трехфазных трехобмоточных трансформаторов с тяговой обмоткой, соединенной в треугольник:

1 — трехфазная линия передачи; 2 — трансформатор; 3 — трансформатор; 4 — питание района 35 кВ; 5 — контактный провод; 6 — секционное разъединение с нейтральной вставкой; 7 — рельсы

трансформаторы со вторичной (тяговой) обмоткой, соединенной звездой, с введенной нейтралью. В этом случае отдельные фидерные зоны будут получать питание фазовым напряжением — 20 кВ (от фазы и нуля), а одна из обмоток не будет загружена тяговой нагрузкой (рис. 36). Наиболее благоприятным в этом случае оказалось бы такое положение, когда подстанция была бы расположена на железнодорожной станции, от которой отходит три направления.

В результате сравнения ряда групп соединений трансформаторов в СССР наибольшее внимание обращено на схему Δ/Δ , где вторая обмотка служит для питания района, а третья для питания тяги (рис. 37).

Так как и в этом случае тяговая нагрузка двуплечая, фазовые обмотки трансформатора будут загружены различно. Для более равномерной нагрузки фаз первичной системы необходимо на тяговых подстанциях вдоль линии поочередно менять местами фазы.

Стыкование участков электрических железных дорог с различным напряжением в контактной сети или с различными системами тока. При применении одной и той же системы тока, но при различных напряжениях в контактной сети или при различных системах тока на смежных участках электрифицированных железных дорог возникает вопрос, связанный со следованием поездов с одного участка на другой. При применении на обоих участках одного рода

тока, но с различным напряжением в контактной сети (обычно это бывает на дорогах постоянного тока) задача решается относительно просто. Стыкование участков лучше всего осуществлять на одной из станций, питание которой можно производить от сети меньшего напряжения. Отделение же этой станции от перегона с большим напряжением производится через нейтральную вставку, которую поезд должен проходить на выбеге. В случае, если по каким-либо причинам поезд остановится на такой нейтральной вставке, то включением разъединителя контактной сети, расположенного впереди по ходу поезда, можно поставить нейтральную вставку под напряжение. Эти разъединители обычно автоматически отключаются после прохода поездом нейтральной вставки.

При таком решении задачи, если стыковая станция расположена на границе двух тяговых плеч, на которых обращается электроподвижной состав, построенный на различное напряжение, локомотивы низшего напряжения будут приниматься на данную станцию при нормальном для них напряжении. Электроподвижной состав смежного участка будет при подходе к станции переходить на более низкое напряжение, т. е. двигаться с меньшей скоростью, что на путях станции и на подходах к ней не играет существенной роли.

В некоторых случаях применяют локомотивы, работающие нормально на том и другом напряжении.

Значительно сложнее вопрос стыкования электрифицированных участков, работающих на разных системах тока.

Такое стыкование осуществляется или при помощи специальных локомотивов двойного питания, т. е. приспособленных для работы как на одной, так и на другой системе тока, или при помощи довольно сложных переключений в устройствах контактной сети.

Возможно и такое решение этого вопроса, при котором передача поездов с участка одной системы электрической тяги на участок другой системы будет происходить при помощи тепловозов.

РЕЖИМ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

§ 6. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электрические локомотивы, как уже указывалось выше, получают электрическую энергию от электрических станций через линии передачи, районные трансформаторные подстанции и затем через тяговые подстанции и контактную сеть. Все эти устройства являются звеньями одной и той же цепи и поэтому изменение нагрузки одного из потребителей вызывает изменение падения напряжения во всех элементах этой системы. Изменение же нагрузки у большого числа потребителей происходит почти в течение всего времени их работы. Таким образом и при нормальной схеме и нормальных условиях работы у любого потребителя напряжение не может оставаться постоянным.

В наибольшей степени это относится к электрическим локомотивам, так как потребляемая ими мощность колеблется в зависимости от условий профиля и режима ведения поезда в широких пределах. Кроме того, изменяется местоположение поезда относительно подстанции и, наконец, изменяется число поездов в фидерных и подстанционных зонах. При всяких же вынужденных схемах питания, отличных от нормальных, т. е. когда нарушается нормальная схема питания, напряжение у потребителя может подвергаться наиболее значительным изменениям.

Известно, что каждый потребитель проектируется на определенное напряжение, называемое номинальным, а работает в действительности все время при различных уровнях напряжения.

Тяговые расчеты, которые по существу определяют все основные условия работы локомотива и участка, выполняют обычно для некоторого постоянного напряжения, чаще всего равного номинальному. Отсюда следует, что условия работы локомотивов и времена их хода в действительности могут отличаться от полученных из тяговых расчетов.

Зависимость работы электрического локомотива от уровня напряжения в контактной сети, т. е. по существу и от режима других потребителей, является одной из принципиальных особенностей, отличающих электрическую тягу от других видов тяги (автономных).

В руках проектировщика имеются средства, позволяющие в известной мере ограничить изменения напряжения в контактной сети. Это может быть достигнуто увеличением мощности отдельных элементов системы энергоснабжения или применением специальных средств, позволяющих поддерживать напряжение близким к постоянному. Однако как та, так и другая мера связана с известными затратами, и поэтому, чтобы правильно подойти к их выбору, следует иметь совершенно ясное представление о тех последствиях, к которым ведет изменение напряжения у электрических локомотивов.

Изменения напряжения можно характеризовать отклонениями и колебаниями напряжения.

Под отклонением напряжения будем понимать изменения напряжения такой длительности, которые приводят к изменению скорости движения поездов. Численно под отклонением напряжения понимают разность между действительным напряжением на зажимах потребителей и их номинальным напряже-

нием. Если действительное напряжение выше номинального, то отклонение положительно и наоборот. Под колебаниями напряжения, по существу, подразумевают те же отклонения напряжения, но протекающие в столь короткие промежутки времени, что скорость поезда измениться не успевает.

§ 7. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЛОКОМОТИВОВ

Изменение напряжения различно влияет на работу локомотивов постоянного и однофазного тока. Различие прежде всего заключается в том, что на электровозах однофазного тока имеется возможность регулировать напряжение, подводимое к двигателям, чего нет на электровозах постоянного тока.

Здесь мы рассмотрим влияние изменения напряжения на условия работы локомотивов постоянного тока. Что касается локомотивов однофазного тока промышленной частоты, то их условия работы при изменяющемся напряжении удобнее рассмотреть в следующем параграфе.

Установим прежде всего, как влияют отклонения напряжения на все показатели работы электровоза, т. е. на скорость, силу тяги, располагаемую мощность (мощность, фактически имеющуюся у локомотива по его характеристикам), температуру обмоток тяговых двигателей, условия работы схемы управления и тормозных устройств (воздушных тормозов).

Рассматривая локомотивы, оборудованные двигателями последовательного возбуждения, напомним, что установившаяся скорость вращения вала двигателя этого типа определяется из выражения

$$v = \frac{U - IR}{c\Phi},$$

где U — напряжение на зажимах двигателя;

I — ток (нагрузка) двигателя;

R — сопротивление обмоток двигателя;

c — постоянный коэффициент для данного типа двигателя;

Φ — магнитный поток одного полюса.

При одной и той же нагрузке I , но при различных значениях подведенного к двигателю напряжения, отношение установившихся скоростей, очевидно, будет равным отношению электродвижущих сил (так как магнитный поток определяется величиной тока нагрузки), т. е.

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{U_1 - IR}{U_2 - IR}, \quad (1)$$

где v_1 и v_2 — скорости, соответствующие напряжениям U_1 и U_2 .

Учитывая относительно небольшую величину падения напряжения в двигателе из-за малого сопротивления обмоток его ¹, можем написать

$$\frac{v_1}{v_2} \approx \frac{U_1}{U_2}. \quad (2)$$

Таким образом, установившиеся скорости вращения вала двигателя приблизительно прямо пропорциональны подводимому напряжению.

Сила тяги, как известно, может быть представлена выражением

$$F = c_1 I \Phi,$$

где I и Φ — соответственно ток и магнитный поток двигателя.

Из этого выражения видно, что сила тяги не зависит от напряжения на зажимах двигателей.

При пуске в ход электровоза, т. е. при одном из наиболее тяжелых условий работы двигателей, когда от них требуется обычно наибольший момент,

¹ Для двигателя ДПЭ-340 при $I_{\max} = 350$ а и $r = 0,276$ ом $(Ir)_{\max} = 79$ в.

Для двигателя ДПЭ-400 при $I_{\max} = 400$ а и $r = 0,18$ ом $(Ir)_{\max} = 72$ в.

на зажимы каждого из них подается сильно пониженное напряжение, для чего специально включаются пусковые реостаты.

Так, например, если двигатель электровоза рассчитан на нормальную работу при 1 500 в, то при пуске к нему подводится около 100 в.

Следовательно, при любом практически возможном понижении напряжения поезд может взять с места и при движении такое понижение напряжения не может привести к остановке поезда, но вызовет, как уже отмечено, соответствующее понижение скорости. С понижением скорости движения локомотива несколько уменьшается сопротивление движению. Соответственно уменьшается и требуемый момент от тяговых двигателей, а следовательно, уменьшается и ток двигателя. Это уменьшение практически незначительно, но важно то, что с понижением напряжения ток тяговых двигателей не растет, а уменьшается.

Обращаясь к характеристикам двигателя последовательного возбуждения, легко проследить, как совершается переход с одной скорости на другую при изменении напряжения. Такие характеристики даны на рис. 38. Здесь кривая 1 представляет зависимость скорости вращения двигателя от тока при некотором напряжении на его зажимах U_1 , кривая 2 — ту же зависимость при напряжении $U_2 < U_1$, кривая 3 — зависимость силы тяги на ободе колеса от тока.

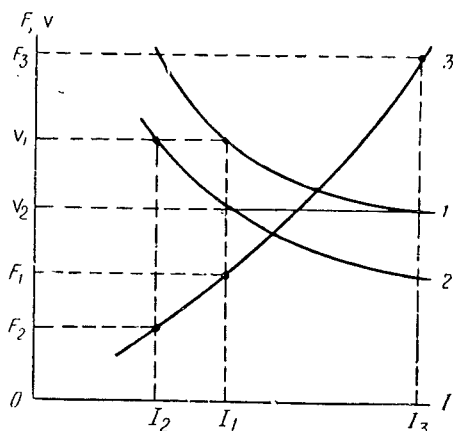


Рис. 38. Характеристики тягового двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

Пусть поезд движется при напряжении U_1 с установившейся скоростью v_1 и реализует силу тяги F_1 , потребляя ток I_1 . Если напряжение упадет до величины U_2 , то из-за того, что скорость поезда в первый момент останется без изменения, ток и сила тяги упадут соответственно до значений I_2 и F_2 . Если это пониженное напряжение сохранится некоторое время, то уменьшение силы тяги вызовет замедление поезда. При том же профиле сила тяги через некоторое время достигнет почти прежней величины F_1 , что будет соответствовать

новой установившейся скорости v_2 и приблизительно прежнему току. Если теперь напряжение вновь поднимется до прежней величины (характеристика — 1) и скорость v_2 вначале не изменится, то сила тяги возрастет до величины F_3 , а ток — до I_3 . Поезд получит ускорение, сила тяги станет падать и, когда она станет равной F_1 , поезд будет иметь первоначальную скорость v_1 и снова прежний ток I_1 .

Таким образом, переход от одного напряжения к другому приводит к изменению скорости поезда (двигателя), приблизительно пропорциональному изменению напряжения.

Посмотрим, как влияет понижение напряжения на нагревание тяговых двигателей. Последнее, как известно, зависит от количества выделенного в двигателях тепла и от интенсивности охлаждения их. Количество выделенного тепла зависит от величины тока и напряжения. Величина тока определяет количество тепла, выделяемого в меди, а напряжение — в стали. Так как понижение напряжения приводит к незначительному уменьшению тока, которым можно пренебречь, то можно считать, что если не изменится степень ослабления поля, то на том же элементе профиля (при установившейся скорости) ток остается примерно одним и тем же. Время же хода увеличивается за счет понижения скорости. Если имеется возможность, то машинист локомотива, стремясь выдержать время хода, заданное графиком движения, попытается повысить скорость за счет изменения режима ведения поезда, т. е. уменьшит время выбега, если последний предусмотрен, или перейдет на следующую ступень

ослабления поля. Это поведет или к увеличению времени потребления энергии, или к увеличению тока и, следовательно, к более интенсивному выделению тепла в обмотках двигателя. Одновременно понижение напряжения ведет к уменьшению тепла, выделенного в стали. Интенсивность же охлаждения при прочих равных условиях зависит от количества охлаждающего воздуха, прогоняемого мотор-вентилятором. Окончательная температура двигателя устанавливается в результате воздействия всех перечисленных факторов. В качестве примера приведем некоторые опытные данные.

Из кривых рис. 39 видно, что скорость вращения мотор-вентилятора падает несколько медленнее, чем напряжение, производительность же падает еще медленнее. [Займствовано из отчета ЦНИИ 1957 г. по испытаниям восьмисосного электровоза.]

В свою очередь, допускаемый длительный ток по условиям нагревания падает много медленнее, чем количество прогоняемого через двигатель воздуха.

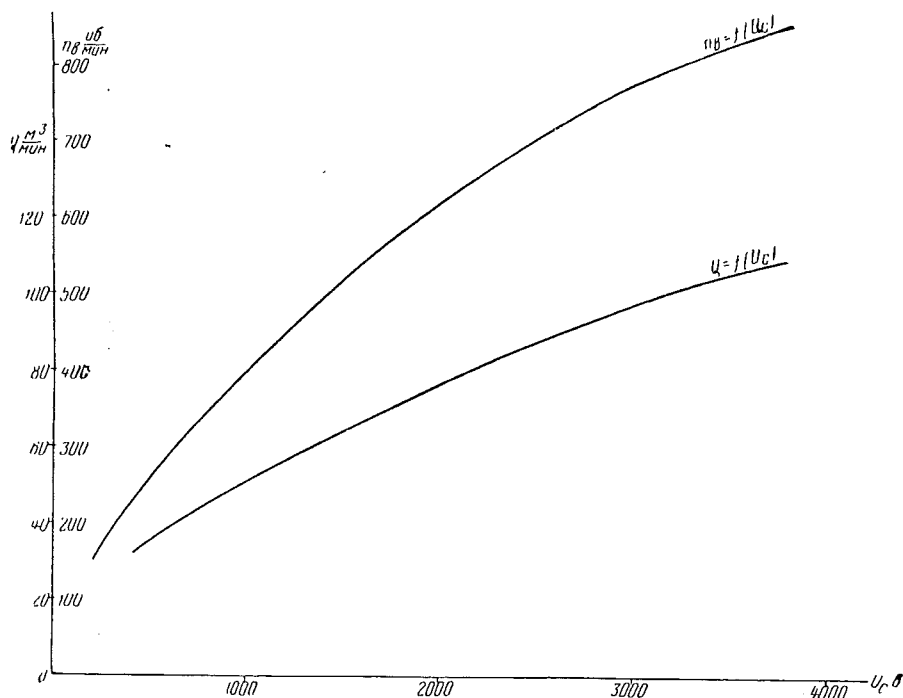


Рис. 39. Зависимость скорости вращения n и количества охлаждающего воздуха Q , продуваемого через двигатель НБ-406А в одну минуту при мотор-вентиляторе НБ-430 при изменении напряжения на токоприемнике электровоза

Кроме того, если учесть изменение потерь в стали двигателя, то понижение напряжения фактически приведет к еще менее заметному уменьшению длительно допускаемого тока двигателя.

На рис. 40 показана опытная кривая повышения температуры двигателя ДПЭ-400 при различном напряжении, снятая на испытательном стенде Новочеркасского электровазостроительного завода (НЭВЗ) имени С. М. Буденного.

Здесь сплошные линии относятся к напряжению в контактной сети 1 500 в, а пунктирные — к напряжению 3 000 в. В соответствующем режиме работал и мотор-вентилятор. Нагревание в обоих режимах начиналось (по условиям постановки опыта) с различных начальных температур. Однако наибольший интерес представляет значение установившихся температур, соответствующих длительной работе с током 225 а.

Из приведенных кривых видно, что при понижении напряжения в два раза некоторое увеличение температуры получают обмотки главных полюсов, что объясняется уменьшением количества охлаждающего воздуха, даваемого мотор-вентилятором. Температура же якоря значительно понизилась так

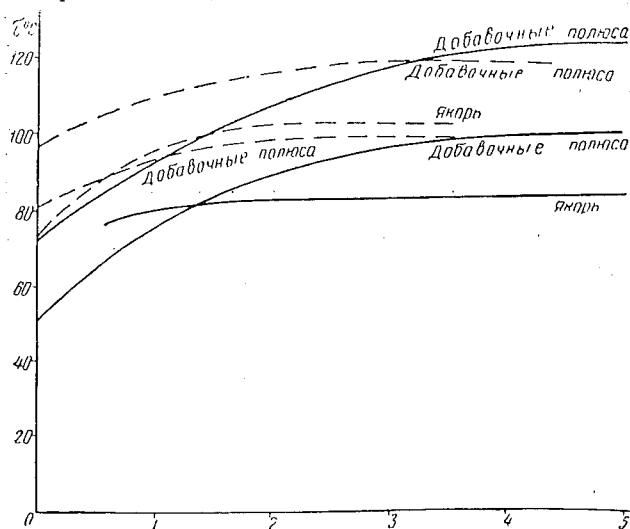


Рис. 40. Повышение температуры тягового двигателя НБ-406А при изменении напряжения на электровозе

как с уменьшением его числа оборотов уменьшилось количество тепла, выделяемого в сердечнике якоря. Это уменьшение превысило понижение теплоотдачи за счет уменьшения охлаждающего воздуха.

Из изложенных соображений было бы неосторожно делать заключение, что понижение напряжения никогда не может вызвать недопустимого перегрева тяговых двигателей.

Как уже было отмечено, уменьшение времени выбега для обеспечения установленного времени хода приведет к более длительному потреблению той же величины тока.

Если же при нормальном напряжении согласно проведенным расчетам или испытаниям не достигалась установившаяся температура двигателей, то теперь с увеличением времени хода температура, достигнув или не достигнув установившегося значения, превысит расчетную величину.

Аналогичное положение может получить место при преодолении поездом тяжелого, но не затяжного подъема, где по расчету не должна была достигаться

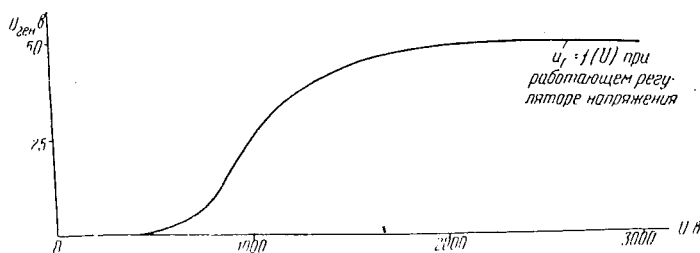


Рис. 41. Зависимость напряжения генератора управления от напряжения на токоприемнике электровоза (для генератора ДК-405А, установленного на электровозе ВЛ22М)

установившаяся температура, но ее максимальное значение было близко к допустимому. Переходы на следующую ступень ослабления поля также могут привести к перегреву тяговых двигателей.

Следует также упомянуть о том, что пониженное напряжение и скорость перед подъемом могут привести к затруднениям при его преодолении [3].

Исходя из этих соображений, нельзя дать общие, пригодные для всех случаев рекомендации. В каждом случае режим нагревания тяговых двигателей, полученный в результате тяговых расчетов, должен быть проверен при действительных условиях работы локомотивов.

Мотор-генератор на электровозах и моторных вагонах постоянного тока состоит из высоковольтного двигателя, питающегося от контактной сети, и генератора низкого напряжения. Для того чтобы уменьшить влияние изменения

числа оборотов мотор-генератора (из-за изменений напряжения в контактной сети) на напряжение генератора, применяют специальные регуляторы напряжения. В результате изменение напряжения на генераторе, питающем цепи управления, при изменении напряжения на электровозе (при практически представляющих интерес пределах изменения), как видно из рис. 41, незначительно. [Из отчета ЦНИИ 1952—1953 гг. «К проекту ГОСТа на номинальные напряжения».] Действительно, при изменении напряжения на электровозе от 3 000 до 2 000 в, т. е. на 33%, напряжение на генераторе падает с 50 до 48,5 в, т. е. на 3%, и при уменьшении напряжения в сети в два раза (т. е. до 1 500 в) до 44 в, т. е. на 12%.

Кроме того, для резервирования генератора применяется аккумуляторная батарея, заряжающаяся от этого же генератора, т. е. включенная с ним на параллельную работу. Такая схема повышает стабильность напряжения в сети управления, обеспечивая ей устойчивую работу при значительных понижениях напряжения в контактной сети.

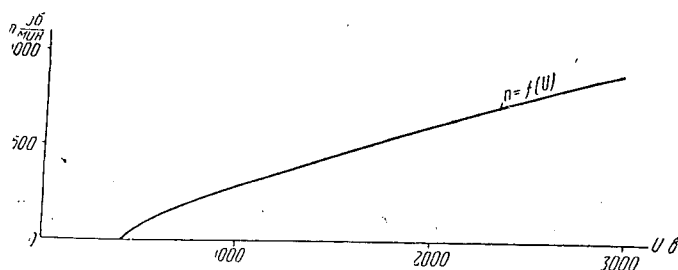


Рис. 42. Зависимость скорости вращения мотор-компрессора от напряжения на токоприемнике электровоза (для типа ДК-404А, установленного на электровозе ВЛ22^М)

Наконец, на рис. 42 показана зависимость скорости вращения мотор-компрессора, питающего тормозные и другие устройства сжатым воздухом, от напряжения.

Как известно, мотор-компрессор при нормальных условиях работает периодически, поддерживая необходимое давление в главных резервуарах. Обычно принимают, что при нормальной работе и, следовательно, нормальном уровне напряжения, мотор-компрессор работает 50% времени. Следовательно, при понижении напряжения ему придется включаться чаще, что поведет к некоторому дополнительному его нагреванию. Обычно на электровозах устанавливается два мотор-компрессора, каждый из которых имеет достаточную производительность. На моторвагонных поездах ставят по одному мотор-компрессору, но зато мотор-компрессор одного вагона может быть заменен мотор-компрессором другого, другими словами, в обоих случаях предусматривается большой резерв. При таком положении и при практически встречающихся понижениях напряжения работа пневматических тормозов и других устройств, питаемых сжатым воздухом, не должна нарушаться.

Опасаться влияния толчков напряжения на работу вспомогательных машин нет особых оснований, так как в схеме электровоза для уменьшения толчков тока предусматриваются демпфирующие сопротивления, последовательно включенные во все время работы этих машин.

Таким образом, даже без глубокого анализа можно прийти к выводу, что по условиям работы вспомогательных машин длительные понижения напряжения до 50% практически не должны приводить к нарушению работы электроподвижного состава.

До сих пор мы рассматривали влияние отклонений напряжения на работу электрических локомотивов. Посмотрим, как действуют колебания (кратковременные изменения) напряжения.

Для этого следует рассмотреть те явления в подвижном составе, которые могут иметь место при резких изменениях напряжения в течение той части

переходного процесса, когда скорость поезда еще остается прежней. Обращаясь снова к рис. 38, можно установить, что резкий рост напряжения вызывает в первый момент значительный толчок силы тяги и тока. При этом толчок тока и силы тяги тем больше, чем более пологий характер имеют кривые 1 и 2, т. е. чем с большим насыщением работали тяговые двигатели до изменения напряжения.

Значительный толчок силы тяги может вызвать боксование, поломку шестерен и повреждение сцепных приборов, а резкое возрастание тока опасно из-за возможности появления кругового огня на коллекторах двигателей. Резкий спад напряжения, сопровождаемый значительным уменьшением тока и силы тяги, тоже может быть опасным для подвижного состава. Как показывает опыт эксплуатации, в результате резкого уменьшения тягового усилия в составе могут возникнуть динамические силы, носящие колебательный характер. В отдельных случаях это может привести к обрыву сцепки.

Резкое изменение напряжения может неблагоприятно повлиять на работу двигателя при рекуперации энергии. Напряжение на зажимах двигателя, работающего в режиме рекуперации, должно быть выше напряжения сети. Ток же рекуперации определяется разностью между э. д. с. рекуперирующего локомотива и напряжением сети. Резкое изменение напряжения приведет к резкому изменению этой разности. Таким образом, уменьшение напряжения в сети может вызвать значительный бросок тока и связанный с этим толчок тормозной силы, увеличение же напряжения приведет к резкому спаду тока и, следовательно, к резкому уменьшению тормозной силы.

§ 8. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО УЧАСТКА

Система постоянного тока. Выше было рассмотрено влияние режима напряжения на работу электрических локомотивов и установлен характер изменений их работы при различных уровнях напряжения. Всякие же изменения в работе локомотивов отражаются на эксплуатационных показателях участка электрифицированной железной дороги в целом.

Следовательно, для определения влияния переменного режима напряжения на показатели работы участка необходимо уметь устанавливать действительный режим напряжения на токоприемнике локомотива при работе его на линии в любых условиях и в любое время. Для точного решения этой задачи необходимо было бы создать такой метод, который позволил бы учитывать влияние нагрузок всех поездов, одновременно следующих по рассматриваемому участку, на потери напряжения в контактной сети, на подстанциях, в линиях передачи, а также влияние возможных колебаний подводимого к тяговым подстанциям напряжения. Напряжение же на шинах тяговых подстанций меняется в зависимости от тяговой нагрузки и отклонений, вызываемых в питающей системе рядом причин [4], [5]. Представление о характере изменения нагрузки и напряжения на шинах одной из тяговых подстанций дает рис. 43. Из этой кривой, в частности, видно, что в некоторых случаях (от 6 до 13 ч), несмотря на то, что тяговая нагрузка имеет относительно меньшую величину, напряжение сильно понизилось, что, следовательно, вызвано процессами, не связанными с увеличением тяговой нагрузки.

Чрезвычайная сложность точного установления режима напряжения заставляет удовлетвориться менее точным, но значительно более простым способом установления режима напряжения.

Так как отклонения напряжения рассматриваются с точки зрения их влияния на скорость поездов, а следовательно, и на время их хода, то необходимо найти способ определения поперегонных времен хода с учетом действительного режима напряжения. Эти величины должны служить для корректировки тяговых расчетов и для построения графика движения (если не явится необходимость изменения времен хода при помощи специальных мероприятий в системе энергоснабжения или в подвижном составе).

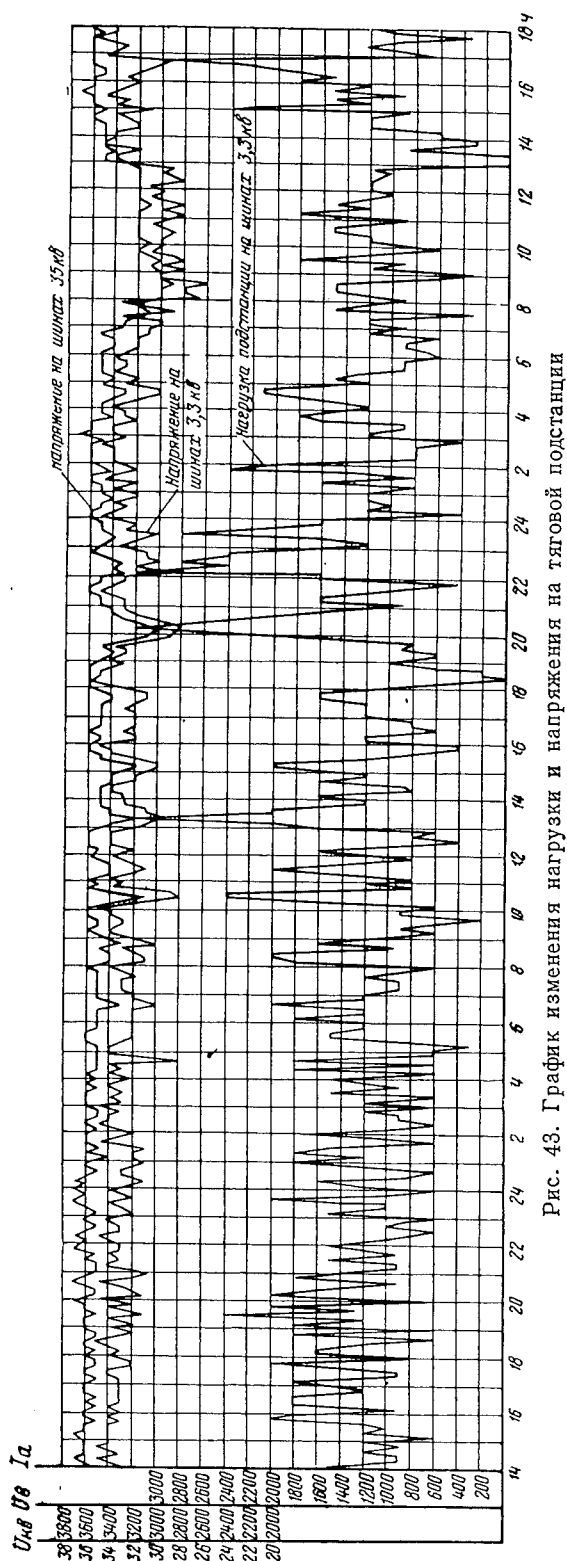


Рис. 43. График изменения нагрузки и напряжения на тяговой подстанции

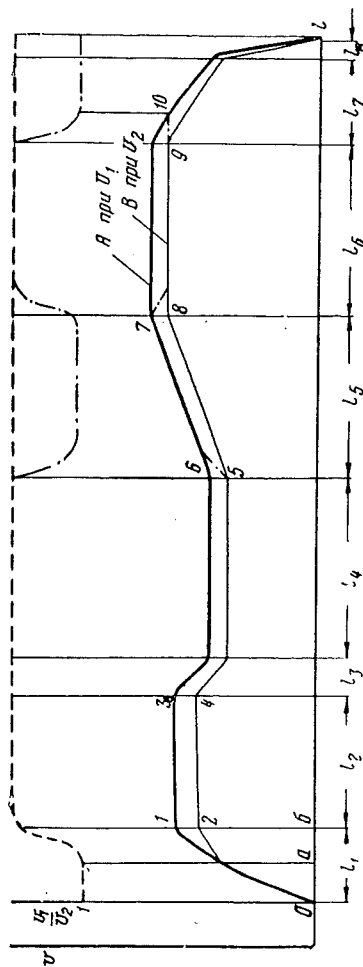


Рис. 44. Диаграмма изменения скорости поезда при его движении по участку для двух значений напряжения

Рассмотрим несколько упрощенные графики зависимости скорости движения поезда от пути при одинаковом режиме ведения его, но при двух значениях напряжения в контактной сети U_1 и U_2 ($U_2 < U_1$), остающихся неизменными в течение всего времени хода поезда (рис. 44). На этом рисунке:

- l_1 — длина пути, на котором происходит пуск и разгон поезда по автоматической характеристике;
- l_2, l_4 и l_6 — то же, движение под током с установившейся скоростью;
- l_3 — то же, замедление на подъеме;
- l_5, l_7 — то же, выбег;
- l_8 — то же, торможение.

На рассматриваемых скоростных диаграммах точки 2 и 4 могут быть несколько сдвинутыми по горизонтали относительно точек 1 и 3, но так как эти сдвиги обычно ничтожны по сравнению с длинами участков, предшествующих (l_1 и l_2) и последующих (l_2 и l_3), то таким несовпадением для простоты можно пренебречь и рассматривать упрощенные диаграммы скоростей, представленные кривыми A и B .

На основании кривых A и B будем строить отношение скоростей в функции пути, т. е.

$$\frac{v_1}{v_2} = f(l),$$

где v_1 и v_2 — скорости, соответствующие напряжениям U_1 и U_2 .

Полученные значения отношений скоростей по участкам пути будем показывать на рис. 44 пунктирной линией.

Известно, что скорость двигателя в процессе пуска не зависит от напряжения сети у токоприемника, поэтому на участке Oa отношение скоростей равно единице. При меньшем напряжении поезд выходит на автоматическую характеристику при меньшей скорости, т. е., строго говоря, точка 2 должна лежать левее точки 1. Справа от точек 1 и 2 до точек 3 и 4 согласно ранее установленному положению (2) отношение скоростей равно отношению напряжений. Тогда можно утверждать, что на участке от O до b отношение скоростей колеблется от 1 до $\frac{U_1}{U_2}$.

На участках l_2, l_4 и l_6 отношение скоростей все время остается постоянным и равным отношению напряжений. В таком случае, очевидно, и на участке l_3 (движение в режиме тяги с замедлением) и даже на участке l_5 (выбег, если он невелик) должно приближенно сохраняться это отношение, так как с обеих сторон этих участков условие (2) сохраняется.

В начале участка l_7 отношение скоростей также равно отношению напряжений. Соотношение скоростей в конце этого участка может быть определено, исходя из изменения живых сил поезда и работы сил сопротивления движению на участке l_7 . Результаты такого определения позволяют принять отношение скоростей по всему участку l_7 также равным отношению напряжений. Тогда можно достаточно просто установить и соотношение скоростей на участке l_8 , приняв линейную зависимость скорости от пройденного пути при торможении. При этом, очевидно, отношение скоростей для любой точки пути при торможении может быть принято равным отношению напряжений.

Таким образом, из рассмотренного следует, что на всем пути движения поезда, исключая лишь периоды пуска и разгона на автоматической характеристике, сохраняется отношение скоростей, равное или почти равное отношению напряжений.

Однако, если в реальных условиях несколько изменить режим ведения поезда (время хода на выбеге и торможении), то можно сохранить отношение скоростей для режимов выбега и торможения равным единице. Для этого, очевидно, следует только пройти в тяговом режиме при напряжении U_2 большие участки пути, чем при напряжении U_1 , с тем, чтобы выйти на кривые

выбега поезда при напряжении U_1 (как это показано на рис. 44 точками 5, 6 и 9, 10). При переходе на тяговый режим в точке 7 поезд перейдет на кривую, соответствующую пониженному напряжению в точке 8 (если нет возможности изменением режима ведения, например переходом на следующую ступень ослабления поля, поддержать скорость на уровне той, какая была при напряжении U_1). Если еще учесть, что разгон поезда по автоматической характеристике (участок ab) происходит в течение относительно малого времени, то можно считать практически зависящей от напряжения и пропорциональной ему только скорость движения поезда по автоматической характеристике, т. е. при потреблении им энергии, за исключением периода пуска.

Переходя от скоростей к временам, обозначив через t'_{T1} общее время хода поезда в тяговом режиме при напряжении U_1 , а t'_{T2} — то же при напряжении U_2 и t_n — время пуска поезда, можем записать

$$\frac{t'_{T2} - t_n}{t'_{T1} - t_n} = \frac{U_1}{U_2},$$

так как времена хода поездов по автоматической характеристике на одних и тех же участках пути при двух разных напряжениях обратно пропорциональны скоростям, соответствующим этим напряжениям.

Обозначая $t'_{T1} - t_n$ через t_{T1} и $t'_{T2} - t_n$ через t_{T2} можем определить

$$t_{T2} = \frac{U_1}{U_2} t_{T1}. \quad (3)$$

В действительных условиях работы электрического локомотива на участке напряжение на его токоприемнике не остается постоянным, а колеблется; следовательно, для возможности практического применения выражения (3) его следует представить в несколько ином виде, учтя изменение напряжения у движущегося поезда.

Если бы между скоростью и непрерывно изменяющимся напряжением существовала линейная зависимость, то средняя скорость по участку и, следовательно, время его прохода определялись средним значением напряжения.

Однако изменение скорости поезда из-за наличия сил инерции отстает от изменения напряжения.

При колеблющемся напряжении всегда будет иметь место чередование спадов и подъёмов напряжения. Следовательно, будут иметь место отставания как в росте, так и в снижении скорости, вызываемые указанными изменениями напряжений. Поэтому можно допустить возможность достаточной взаимной компенсации между задержками роста и понижения скоростей и считать среднюю скорость линейно связанной со средним напряжением у электровоза за время потребления им энергии (исключая время пуска).

Таким образом, действительное время хода по рассматриваемому участку можно определять по формуле

$$t_d = (t_x - t_T) + t_T \frac{U_p}{U_{cp}}, \quad (4)$$

где t_x — расчетное время хода поезда по рассматриваемому участку пути (из тяговых расчетов);

t_T — расчетное время хода поезда по тому же участку в тяговом режиме, исключая время пуска;

U_p — расчетное напряжение (принятое в тяговых расчетах);

U_{cp} — действительное среднее напряжение в сети у поезда за время t_T .

Величина среднего напряжения в сети у поезда за время его хода по участку в тяговом режиме (исключая время пуска), очевидно, равна

$$U_{cp} = U_0 - e_{cp} - \Delta U_{cp\kappa}, \quad (5)$$

где U_0 — напряжение холостого хода на шинах постоянного тока тяговых подстанций;

$\Delta U_{c_{cp}}$ — среднее понижение напряжения на шинах постоянного тока подстанции, вызванное тяговой нагрузкой;

$e_{c_{co}}$ — среднее значение отклонения напряжения на вводах в тяговую подстанцию от нормального значения, отнесенное к шинам постоянного тока (положительное или отрицательное), не зависящее от тяговой нагрузки;

$\Delta U_{cp \kappa}$ — средняя потеря напряжения в проводах контактной сети и рельсовой цепи от шин подстанции до поезда.

Все средние величины выражения (5) должны быть определены за время, соответствующее U_{cp} .

Большое значение имеет учет действительного уровня напряжения при определении поперегонной пропускной способности, которая для параллельного графика движения определяется из выражения

$$N_0 = \frac{T}{t_0 + t_{cn}}, \quad (6)$$

где N_0 — максимальное число поездов, которое может быть пропущено по участку за время T (сутки, часть суток);

t_0 — время хода поезда по ограничивающему перегону, определенное с учетом действительного режима напряжения;

t_{cn} — время на сносение — минимально допустимое время между уходом одного поезда с ограничивающего перегона и выходом следующего на этот перегон.

Если рассматривается двустороннее движение с различными временами хода поездов различных направлений по ограничивающему перегону, то расчет пропускной способности делается в парах поездов; тогда t_0 — сумма времен хода пары поездов противоположных направлений и t_{cn} — время на сносение пары поездов.

Если имеются в виду пакетные или частично-пакетные графики движения, то влияние уровня напряжения должно также учитываться при определении времени хода по ограничивающему перегону.

Что касается колебаний (кратковременных изменений) напряжения, то раньше было установлено, что на скорость движения поездов они повлиять не могут. Следовательно, ограничения их величин необходимо обуславливать соображениями, связанными с допустимыми толчками напряжения. К сожалению, до сих пор не установлены величины колебаний напряжения, которые можно допускать, не опасаясь вредных последствий.

Система однофазного тока промышленной частоты. Отличительной особенностью режима напряжения на дорогах однофазного тока является то, что здесь оказывает существенное влияние индуктивность контактной сети. Влияние этой индуктивности сказывается различным образом на падениях и потерях напряжения при различных коэффициентах мощности электровозов.

Поэтому падения и потери напряжения в контактной сети на участках однофазного тока промышленной частоты находятся в большой зависимости от типа применяемого электровоза.

Падение и потеря напряжения с уменьшением коэффициента мощности локомотива увеличиваются, так как растут их индуктивные составляющие.

Существенную роль играет также и к. п. д. электровозов. Понижение к. п. д. ведет к увеличению потребляемой мощности и при всех прочих равных условиях к увеличению падений и потерь напряжения. Необходимо обратить на это внимание потому, что, во-первых, к. п. д. электровозов однофазного тока различного типа сильно отличаются друг от друга и, во-вторых, потому, что как раз те электровозы, которые обладают более низким к. п. д. (электровозы с машинными преобразователями) по сравнению с электровозами с ионными преобразователями, обладают значительно более высоким коэффициентом мощности (вплоть до единицы и даже могут работать с опережающим углом сдвига фаз).

Понижение напряжения в контактной сети обусловливается не только сопротивлением проводов контактной сети и рельсов, но и сопротивлением трансформаторов (главным образом их реактивной составляющей).

Поэтому, чем ниже коэффициент мощности электровозов, тем сильнее будет сказываться реактивное сопротивление трансформатора и, следовательно (при одной и той же активной мощности), тем ниже будет напряжение на шинах тяговой подстанции, питающих контактную сеть.

Уменьшение реактивного сопротивления трансформатора, конечно, уменьшило бы указанное влияние, но привело бы к значительному увеличению броска токов короткого замыкания, опасного для высоковольтной сети и для самого трансформатора.

По этим соображениям на французских железных дорогах считают нецелесообразным понижать реактанц трансформатора ниже 8% для трансформаторов мощностью 10 000 *кВА* и 6% для трансформаторов мощностью 7 800 *кВА*. При таких данных трансформаторов падение напряжения в них составляет большой процент от общей величины падения напряжения до токоприемника электровоза, достигая в некоторых случаях 50% от этого значения.

На рис. 45 приведены результаты расчета для двухпутного участка французской дороги Базель — Редит [6]. Линия длиной 30 км питается с одной стороны, но контактные подвески соединены между собой по длине участка в трех местах. Расчет проведен для случая, когда на участке находилось три курьерских поезда по 500 *т* и два (встречных) грузовых по 1 300 *т*. Общая мощность, потребляемая на линии, равна 10 300 *кВт*.

На рис. 45 приведена зависимость напряжения у наиболее удаленного поезда от реактивного сопротивления трансформатора; мощность трансформатора принята равной 7 500 *кВА*.

Из графика рис. 45 видно, что понижение коэффициента мощности с 1,0 до 0,8 понижает напряжение у наиболее удаленного поезда с 26 *кВ* (при реактанце трансформатора 9%) до 19 *кВ* (эта величина принята на французских железных дорогах за минимально допустимое напряжение).

При электровозах с машинными преобразователями обычно в качестве первичного двигателя используется синхронный двигатель, который, как известно, позволяет в широких пределах регулировать коэффициент мощности. Изменяя угол сдвига фаз, можно поддерживать напряжение на электровозе. Таким путем удастся обеспечить нормальный уровень напряжения на тяговых двигателях.

При электровозе с коллекторными двигателями коэффициент мощности получается достаточно высоким (более 0,8) только при относительно высоких скоростях (более 56—60% от номинальной). При малых скоростях он сильно понижается. В этом отношении электровозы с ионными преобразователями дают лучшие результаты, так как коэффициент мощности у них в меньшей степени связан со скоростью движения.

При электровозах с ионными преобразователями на скорость движения оказывают влияние не только параметры системы энергоснабжения, но и параметры самого электровоза. Энергия потребляется с некоторым сдвигом фаз, имеет место искажение кривой тока, в цепи, кроме активных сопротивлений, имеются индуктивности и, наконец, надо учитывать возможность регулирова-

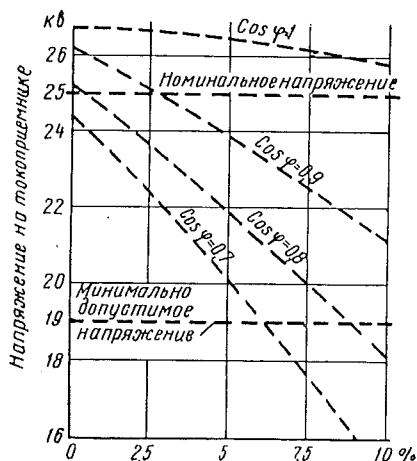


Рис. 45. Зависимость напряжения на токоприемнике электровоза от реактивного сопротивления трансформатора и коэффициента мощности электровоза

ния напряжения на трансформаторе электровоза. Были проведены исследования [7], [8] применительно к электровозам, имеющим двухполупериодный ионный выпрямитель (с выведенной нулевой точкой трансформатора и без использования сеточного управления). Согласно этим исследованиям потери напряжения в контактной сети могут быть компенсированы понижением коэффициента трансформации электровозного трансформатора только в определенных пределах.

Как и при постоянном токе, можно считать, что ток, потребляемый тяговыми двигателями электровозов с ионными преобразователями, в одинаковых условиях продольного профиля остается почти постоянным, т. е. что с изменением скорости движения сопротивление движению изменяется в незначительных пределах.

При таких условиях уменьшение коэффициента трансформации на электровозе повышает напряжение на тяговых двигателях и скорость движения до некоторой определенной величины, при которой достигается максимум мощности, передаваемой тяговым двигателям. Попытка повысить напряжение на тяговых двигателях и, следовательно, потребляемую ими мощность сверх этих пределов приводит к обратным результатам, т. е. к понижению напряжения на двигателях. Это явление объясняется увеличением потерь напряжения, вызванным увеличением тока в первичной обмотке электровозного трансформатора, в контактной сети и в трансформаторе подстанции и, кроме того, уменьшением коэффициента мощности.

Отсюда делается вывод, что уменьшение коэффициента трансформации трансформатора электровоза для компенсации потерь напряжения в контактной сети дает эффект только при небольших токах, потребляемых локомотивом, и не более 10—15% от номинального напряжения. Однако уменьшение коэффициента трансформации на данном электровозе для поддержания его скорости ведет к уменьшению скорости других электровозов.

К недостаткам регулирования скорости путем снижения коэффициента трансформации относится также и то, что отключение других электровозов может вызвать разное увеличение напряжения на двигателях данного электровоза.

Суть выводов в упомянутых выше работах сводится к тому, что наиболее целесообразным является способ регулирования напряжения при помощи компенсации реактивной энергии специальными устройствами.

§ 9. НАПРЯЖЕНИЕ СЕТЕЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Районные сети. Выбор ступени напряжения в сетях первичной части определяется условиями технико-экономических сравнений ряда вариантов в соответствии со шкалой напряжений принятых стандартов.

Электрические нетяговые сети разделяют в зависимости от их назначения на сети районного значения и на местные сети, которые в свою очередь могут быть разбиты на группы (коммунальные, фабрично-заводские, сельскохозяйственные и т. п.). Местные сети работают при напряжениях 35 кВ с радиусом действия 15—20 км. Районные сети обычно имеют напряжение от 110 кВ и выше. В некоторых случаях линии 35 кВ входят в районные сети.

В районных сетях, от которых питаются электрические железные дороги применяются главным образом напряжения 35, 110, 154 кВ и намечается к применению 220 кВ. Наибольшее распространение получило напряжение 110 кВ.

Тяговые сети. Напряжение в контактной сети определяется применяемой в данной стране системой электрической тяги и не может выбираться особо для каждой линии, как это делается в первичной сети, так как электроподвижной состав в стране выпускается обычно на одно напряжение. Исключение может составить случай, когда применяются различные системы тяги и для различных дорог может выбираться та или иная система. В СССР принят стандарт (ГОСТ 6962—54) на напряжения электрифицированного транспорта постоянного

тока с питанием от контактной сети. При составлении стандарта на напряжения электрических железных дорог была учтена специфическая особенность их работы, заключающаяся в том, что напряжение в контактной сети по времени и длине все время меняется и наиболее определенным является номинальное напряжение на шинах тяговой подстанции. Поэтому в указанном выше стандарте нормируется именно это напряжение, определяемое как «среднее значение выпрямленного напряжения при номинальном значении выпрямленного тока». Для магистральных железных дорог это напряжение составляет 1 650 и 3 300 в. Кроме этого, в стандарте нормируется номинальное (условное) напряжение на токоприемнике электроподвижного состава, которое принято соответственно 1 500 и 3 000 в. Характеристики и номинальные данные электроподвижного состава и его оборудования должны быть отнесены к номинальному (условному) напряжению на токоприемнике электроподвижного состава.

В СССР на электрифицированных участках магистральных железных дорог постоянного тока применяется напряжение 3 300 в. На пригородных участках с моторвагонной тягой в первый период электрификации было применено напряжение 1 650 в, при котором система тяги значительно менее экономична, чем при 3 300 в.

В последние годы электрификация пригородных участков с моторвагонной тягой ведется также при напряжении 3 300 в, на которое постепенно переводятся участки, ранее электрифицированные на 1 650 в. В настоящее время можно считать систему тяги при напряжении 1 650 в постоянного тока устаревшей.

Кроме того, стандартом установлены максимальные напряжения, которые могут кратковременно допускаться в условиях эксплуатации.

Под максимальным напряжением на токоприемнике электроподвижного состава в тяговом режиме понимается величина напряжения на шинах тяговой подстанции при наибольшем отклонении напряжения в питающей сети от номинального, при отсутствии нагрузки на стороне выпрямленного тока и при переключенных ответвлениях первичной обмотки силового трансформатора на минус 5%.

Согласно указанному стандарту максимальное напряжение для дорог постоянного тока не должно превышать величины 3 850 в на тех линиях, где не применяется рекуперативное торможение, и 4 000 в на участках, где такой вид торможения используется.

Минимальные уровни напряжения в контактной сети в отличие от максимальных зависят от характеристик тяговых подстанций, сечения проводов контактной сети, сопротивления рельсового пути и длин фидерных зон.

Под минимальным напряжением следует понимать наименьшую допустимую величину напряжения в сети возле электрического локомотива при нормальной схеме питания. Согласно ТУПЭ-57 принято, что это напряжение не должно быть ниже 2 400 в в среднем на любом блок-участке и 2 700 в на затяжных руководящих подъемах.

В СССР ведутся исследования возможности повышения напряжения в контактной сети участков постоянного тока до 3 600—4 000 в при действующем подвижном составе с обязательным регулированием напряжения на подстанциях для поддержания стабильного уровня его. Одновременно исследуется вопрос дальнейшего повышения напряжения при системе постоянного тока.

У нас в стране заканчивается период освоения новой системы тяги на однофазном токе промышленной частоты и приступают к широкому ее применению на ряде направлений. Сейчас номинальное напряжение (напряжение на тяговых шинах подстанции при ее номинальной нагрузке) принято 27,5 кВ. Соответственно, номинальное (условное) напряжение электроподвижного состава принято равным 25 кВ.

Изучается возможность и целесообразность применения при этой системе тяги напряжения 38,5 (35) кВ, так как оно является стандартным и при нем, по сравнению с принятым, значительно уменьшатся потери напряжения и энергии.

§ 10. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРИ РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ

При торможении движущегося поезда, когда поезд идет по уклону, необходимо удерживать скорость в допустимых пределах, соответствующих данному элементу профиля, или установить необходимое замедление, если торможение вызывается необходимостью понизить скорость, в частности перед остановкой поезда. В том и другом случае поезд должен накопленную им энергию (потенциальную, если он идет под уклон, или кинетическую, если должна быть уменьшена скорость) израсходовать на производство некоторой работы.

При пневматических или механических (ручных) тормозах поезд расходует накопленную им энергию на нагревание и разрушение (истирание) металла колодок и бандажей. Такой тормоз приводит к большим затратам металла и потерям энергии.

Существенным преимуществом электрической тяги является то, что она дает возможность применить дополнительный вид тормоза, так называемое электрическое торможение; этот вид торможения построен на использовании обратимости электрических машин. При торможении часть накопленной поездом механической энергии превращается в электрическую, поглощаемую потребителями. Для выработки электрической энергии необходимо преодолеть электромагнитный момент в тяговых двигателях, работающих в генераторном режиме, величина которого тем больше, чем больший ток вырабатывается генераторами. Этот момент и создает необходимую тормозную силу на ободе колеса электрического локомотива.

Для надежного электрического торможения необходимо в любой момент иметь потребителя, готового принять количество электрической энергии, соответствующее необходимому тормозному усилию.

Наиболее простым решением задачи является применение так называемого реостатного торможения. В этом случае потребителями электрической энергии являются реостаты, установленные на самом локомотиве. Однако при этом большая часть накопленной поездом энергии преобразуется в тепло и рассеивается. Это является крупным недостатком реостатного торможения по сравнению с торможением рекуперативным. Кроме того, при реостатном торможении необходимо оборудовать электрические локомотивы мощными реостатами.

Особенностью рекуперативного торможения является передача электрической энергии, вырабатываемой тяговыми двигателями, потребителям (в основном локомотивам, работающим в тяговом режиме) через контактную сеть, т. е. при рекуперации локомотив работает параллельно с тяговыми подстанциями. Эта особенность определяет условия работы электрического локомотива при рекуперативном торможении и создает совершенно особые условия для работы системы энергоснабжения.

Основное отличие условий работы локомотива заключается в том, что если при реостатном торможении осуществлять последнее можно по существу при любом напряжении на зажимах тяговых двигателей, то при рекуперативном торможении напряжение на рекуперирующем локомотиве должно быть выше, чем напряжение на локомотиве, работающем в режиме тяги, но не выше допустимого.

Наиболее экономичным является такой режим работы, при котором вся вырабатываемая рекуперирующим локомотивом энергия передавалась бы находящимся близко локомотивам, работающим в режиме тяги (условимся их называть тяговыми локомотивами). Однако даже при достаточно густом движении на участке, если при нормальном графике движения тяговые локомотивы могут принять энергию, которую вырабатывают рекуперирующие локомотивы, все же необходимо иметь резервные потребители энергии. Такое требование определяется возможностью отклонения от графика движения, изменения режима ведения поездов и т. п., причинами, в результате которых количество тяговых локомотивов, находящихся вблизи рекуперирующего, или

потребляемые ими токи окажутся недостаточными. При этом не удастся обеспечить выработку необходимого количества электрической энергии и, следовательно, не будет обеспечена необходимая тормозная сила.

На линиях железных дорог с редким движением, например на однопутных дорогах, такое положение может иметь место и при нормальном графике движения. Для того чтобы обеспечить в таких условиях необходимую тормозную силу (т. е. послать ток удаленным электровозам через значительное сопротивление контактной сети), машинисту рекуперирующего локомотива пришлось бы поднять напряжение выше допустимого. Этого он сделать не может. Если же в системе энергоснабжения предусмотрены приемники энергии, готовые принять часть выработанной энергии, то всегда будет возможность обеспечить необходимую тормозную силу рекуперирующим локомотивам.

Как известно, в качестве таких приемников могут быть применены:

1) преобразователи, при помощи которых энергия, получаемая из контактной сети, может передаваться в первичную сеть;

2) балластные сопротивления (реостаты), в которых получаемая энергия превращается в тепловую и рассеивается (или используется в холодное время года для обогрева помещения тяговой подстанции).

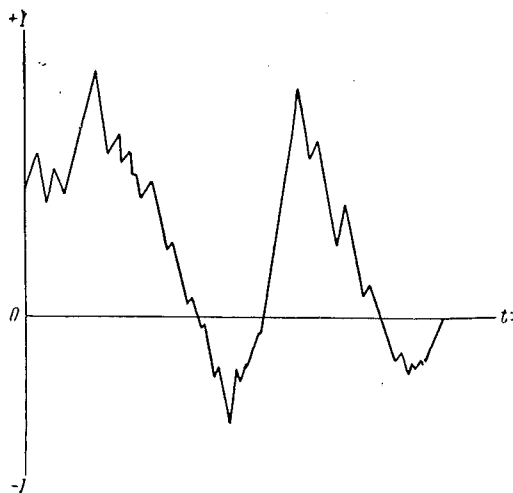


Рис. 46. График нагрузки тяговой подстанции при применении на участке рекуперативного торможения

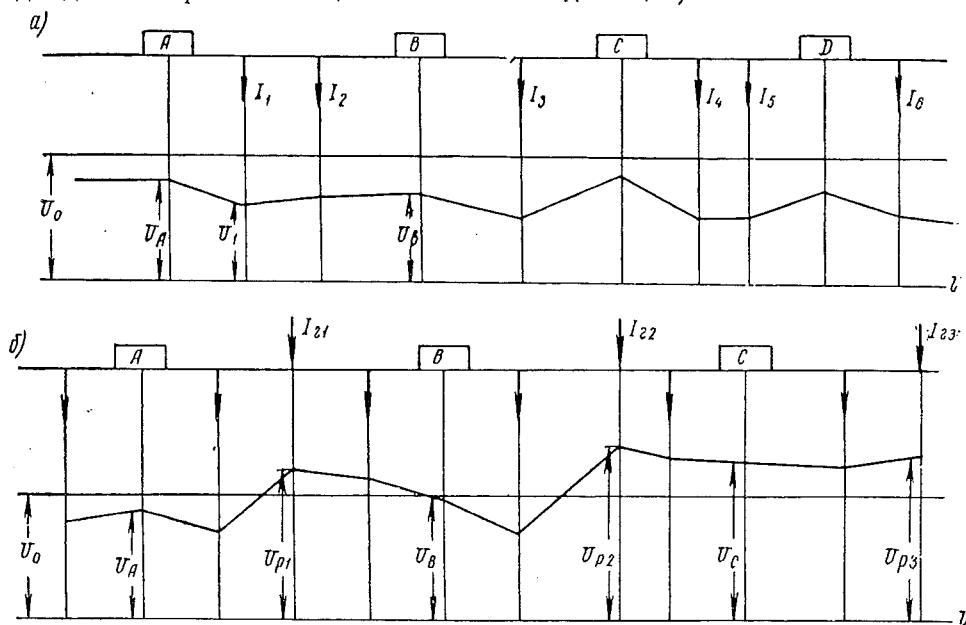


Рис. 47. Графики изменения напряжения вдоль электрифицированного участка железной дороги

К преобразователям на дорогах постоянного тока относятся двигатель-генераторы и инверторы, а на дорогах переменного тока — трансформаторы

(при одинаковой частоте в первичной и тяговой сетях) или трансформаторы и преобразователи частоты (при различных частотах в первичной и тяговой сетях).

На рис. 46 показан график нагрузки тяговой подстанции при применении на участке рекуперативного торможения.

При положительной нагрузке подстанция работает как источник энергии. При преобладании токов рекуперации над тяговыми в районе действия рассматриваемой подстанции последняя работает как приемник энергии с отрицательной нагрузкой.

Часть энергии рекуперации, прием которой не обеспечивается тяговыми локомотивами и которая должна быть принята приемниками энергии на тяговых подстанциях, называют избыточной энергией. Соответственно токи, потребляемые этими приемниками энергии (показанные на графике ниже оси абсцисс), называют избыточными токами. Величинами этих избыточных токов и избыточной энергии рекуперации определяются основные свойства приемников энергии и системы энергоснабжения в целом: чем меньше избыточные токи и избыточная энергия (при одних и тех же токах рекуперации локомотивов), тем большая часть энергии рекуперации используется тяговыми локомотивами и уменьшается необходимая мощность приемников энергии.

Что касается характера распределения напряжений вдоль контактной сети, то если при отсутствии рекуперации напряжение у нагрузок всегда ниже напряжения холостого хода тяговых подстанций (рис. 47,а), то при рекуперации оно может быть выше его как у нагрузок, так и на шинах тяговых подстанций (рис. 47,б). В последней схеме нагрузки с индексом $г$ (генерирование) относятся к поездам, рекуперующим энергию.

Глава III

ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

§ 11. СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Провода контактной сети. В настоящее время для электрических железных дорог, трамваев и троллейбусов СССР установлен один объединенный сортament контактных проводов, имеющий три значения площади поперечного сечения: 68, 85 и 100 мм². Для этого сортамента сопротивления медных твердотянутых контактных проводов, отнесенные к 1 км, соответственно равны 0,290, 0,221 и 0,188 ом/км. Иногда они выполняются также из бронзы, имеющей значительно более высокую прочность. Как механические, так и электрические свойства бронзовых проводов зависят от химического состава бронзы. Провода оловянистой бронзы имеют проводимость от 40 до 65% проводимости чистой меди; кадмиевая бронза при одинаковой прочности с оловянистой имеет большую проводимость (55—85% от проводимости меди).

Несущие тросы цепной подвески выполняются из медных, бронзовых, биметаллических, стальных и комбинированных многожильных проводов.

При выборе материала несущего троса исходят из требований, определяемых: конструкцией цепной подвески, необходимым сечением проводов (определенным из электрического расчета), метеорологическими условиями местности и др.

Если по условиям проводимости сечения контактных проводов бывает недостаточно, то в качестве несущего троса используют медный многожильный провод. Достоинством медных тросов по сравнению со стальными является хорошая их сопротивляемость атмосферной коррозии. Недостатком медных тросов является меньшая прочность.

На электрифицированных железных дорогах СССР в качестве несущего троса чаще всего применяются провода М-95 и М-120. Возможно также применение бронзовых проводов; изготавливаются они из сплава меди с оловом с добавлением в незначительном количестве других примесей (фосфора, кремния и т. д.). В зависимости от своего состава бронзовые провода могут быть средней и высокой прочности. К средней прочности относятся провода, обладающие временным сопротивлением разрыву 55—65 кг/мм² и проводимостью, составляющей 60% от проводимости чистой отожженной меди; к высокой — провода с временным сопротивлением разрыву 62—68 кг/мм² и проводимостью 40% от проводимости чистой меди.

В тех случаях, когда необходимая проводимость, установленная электрическим расчетом, превышает проводимость проводов, включенных в цепную подвеску, прибегают к подвеске усиливающих проводов. Материалом для усиливающих проводов, как правило, на дорогах СССР служит алюминий.

По сравнению с медью алюминий имеет меньший удельный вес (алюминий — 2,7 г/см³, медь — 8,9 г/см³) и меньшую проводимость (алюминий — 34 м/ом·мм², медь — 57 м/ом·мм²). Таким образом, при равных проводимостях сечение алюминиевого провода будет примерно в 1,65 раза больше сечения медного, а вес почти в два раза меньше.

В практике электрифицированных железных дорог СССР в качестве усиливающих проводов наибольшее применение нашли алюминиевые провода марок А-150 и А-185.

Определение сопротивлений контактных и других проводов производится по обычной формуле

$$r_k = \frac{\rho}{s}, \quad (7)$$

где r_k — сопротивление проводов в ом/км ;
 ρ — удельное сопротивление в $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$;
 s — площадь поперечного сечения в мм^2 .

Если контактная сеть имеет, кроме медных, еще и алюминиевые провода (например медные несущий трос и контактные провода и алюминиевые усиливающие), то сопротивление проводов контактной сети определяется из выражения

$$r_k = \frac{\rho_m}{s_m + \frac{s_a}{1,65}}, \quad (7')$$

где ρ_m — удельное сопротивление медных проводов в $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{км}}$;

s_m — суммарная площадь поперечного сечения параллельно соединенных медных проводов контактной сети в мм^2 ;

s_a — то же алюминиевых проводов.

Максимально допустимые сопротивления металлов, из которых изготавливаются провода, установлены ГОСТ 839—14. Согласно этому ГОСТу отожженная мягкая медь имеет при 20°C удельное сопротивление $17,53 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$. Для воздушных сетей применяют провода из меди повышенной прочности, что достигается особым способом их изготовления (волочение в холодном состоянии). Провода из такого материала согласно ГОСТу не должны иметь удельное сопротивление более $18,0 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$. По тому же ГОСТу удельное сопротивление твердотянутого алюминия составляет $29,5 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$. Практически, сопротивления проводов получаются большими как за счет свивки жил в многопроволочных проводах (за счет этого увеличивается длина проволок на 2—3%), так и за счет того, что фактические сечения проводов в большинстве случаев несколько ниже номинальных.

Учитывая эти обстоятельства, при расчетах линий передач принимают для меди удельное сопротивление при 20°C — $18,8 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ и для алюминия — $31,5 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$. При другой температуре t удельное сопротивление определяется по известной формуле

$$\rho_t = \rho_{+20} + \alpha(t - 20),$$

где ρ_t — удельное сопротивление при температуре $t^\circ\text{C}$;

ρ_{+20} — то же при $+20^\circ\text{C}$;

α — температурный коэффициент (для меди $\alpha_m = 0,004$ и для алюминия $\alpha_a = 0,0040 \div 0,0043$).

Рельсовый путь. Сопротивление рельсовой цепи состоит из сопротивления самих рельсов и рельсовых стыков. Сопротивление рельсовых стыков является переменной величиной, изменяющейся в широких пределах в зависимости от ряда факторов, основными из которых являются: степень затяжки стыка, состояние рабочих поверхностей стыковых накладок и соприкасающихся с ними поверхностей рельса, состояние погоды, влажность. Переходное сопротивление стыка принято измерять величиной отношения сопротивления 1 м рельса со стыком к сопротивлению 1 м целого рельса. Сопротивление стыка при благоприятных условиях (хорошая затяжка стыка, влажная погода) может значительно отличаться от сопротивления целого рельса.

Наоборот, при неблагоприятных условиях (сухая погода, слабая затяжка стыковых болтов) те же стыки могут давать значительно большее переходное сопротивление, доходящее в отдельных случаях до величины сопротивления 40 м целого рельса. При новых стыковых накладках непосредственно после их установки обычно переходное сопротивление повышено вследствие имеющегося

на накладках и рельсах тонкого слоя ржавчины. По прошествии нескольких дней после приработки накладок и рельса и удаления слоя ржавчины переходное сопротивление таких стыков обычно уменьшается. Большое переходное сопротивление стыков значительно повышает общее сопротивление рельсовой цепи. Увеличение падения напряжения в рельсах ведет к повышению потенциала рельсов по отношению к земле, что создает благоприятные условия для отвлечения токов в землю, в ряде случаев приводящего к весьма неприятным последствиям. Поэтому для уменьшения переходного сопротивления в местах расположения рельсовых стыков устанавливаются дополнительные электропроводящие соединения, так называемые стыковые соединения. Последние выполняются обычно из отрезка гибкого медного провода сечением не менее 70 мм^2 , привариваемого к головкам рельсов.

Обе нити рельсов для обеспечения лучшей проводимости рельсовой цепи, если нет автоблокировки, как правило, соединяются между собой через каждые 300 м междурельсовыми соединениями, выполняемыми медным проводом сечением не менее 40 мм^2 или круглой сталью такой же проводимости. Концы этих соединений привариваются к шейкам рельсов. Для той же цели на двухпутных и трехпутных участках устанавливаются через каждые 600 м междупутные соединения, т. е. соединяются между собой тем же способом рельсовые нити расположенных рядом путей.

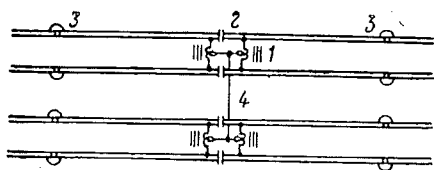


Рис. 48. Соединение рельсовых нитей на двухпутном участке с автоблокировкой;

1 — дроссель; 2 — изолированный стык; 3 — стыковое соединение; 4 — междупутное соединение

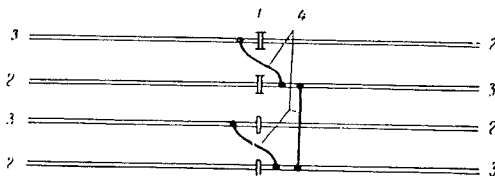


Рис. 49. Соединение рельсов при однопутных рельсовых цепях;

1 — изолированный стык; 2 — рельсы автоблокировки; 3 — тяговые рельсы; 4 — соединения рельсов

При автоблокировке вся линия, как известно, разбивается на ряд блок-участков. Когда участок электрифицирован на постоянном токе, то автоблокировка работает на переменном токе, междурельсовые соединения устанавливаются в местах расположения изолированных стыков и выполняют при помощи путевых дросселей.

Путевые дроссели представляют значительное сопротивление для переменного тока автоблокировки и незначительное для тягового постоянного тока. С каждой стороны изолированного стыка устанавливается по одной дроссельной катушке (рис. 48) и их средние точки соединяются между собой. Междупутные соединения устраиваются путем соединения между собой средних точек дроссельных катушек соседних изолированных стыков. На станциях, оборудованных электрической централизацией при двухниточных рельсовых цепях, для пропуска тяговых токов в обход изолированных стыков также устанавливаются дроссельные соединения. При однопутных рельсовых цепях для тяговых токов отводится только одна рельсовая нить на каждом электрифицированном пути. На изолированных стыках тяговые нити соседних изолированных участков соединяются друг с другом голым медным проводом (рис. 49).

Присоединение тяговых подстанций к рельсовой цепи производится при помощи отсасывающих линий. В месте их присоединения на участках, не имеющих автоблокировки и электрической централизации, устанавливается поперечное соединение между всеми рельсовыми нитями, включенными в рельсовую цепь. Соответственно на станциях, оборудованных электрической централизацией с однопутными рельсовыми цепями, отсасывающие линии присоединяются к тяговым рельсовым нитям. На участках, оборудованных автоблокировкой с двухниточными рельсовыми путями, отсасывающие линии

присоединяются к средним точкам дроссельных стыков. На двухпутных и многопутных участках, оборудованных автоблокировкой с двухниточными рельсовыми цепями, дроссельные стыки в месте присоединения отсасывающих линий располагаются в одном поперечнике (в одной плоскости, перпендикулярной осям путей) и средние их точки соединяются между собой (провод 4, рис. 48).

В большинстве случаев отсасывающие линии выполняются подземным бронированным кабелем, при большом же расстоянии от подстанций они иногда делаются воздушными.

Сопротивление рельсов может быть определено по формуле (7), если известно удельное сопротивление рельсовой стали. Сопротивление рельсов определяется чаще всего в зависимости от веса их на 1 пог. м, а не от площади поперечного сечения. Вес этот можно определить по формуле

$$G = \frac{s_p \cdot 100}{1000 \cdot 100} 7,83 \text{ кг/м}, \quad (a)$$

где 7,83 — удельный вес рельсовой стали в г/см³;

s_p — площадь поперечного сечения рельса в мм².

Приняв удельное сопротивление рельсовой стали равным 210 ом·мм²/км и подставив в формулу (7) значение s_p из выражения (a), получим сопротивление 1 км одиночного рельса (без учета сопротивления стыков):

$$r'_{0p} = \frac{7,83 \cdot 210}{1000 G} = \frac{1,64}{G} \text{ ом/км}.$$

Если в местах стыка рельсы свариваются, то изменением сопротивления можно пренебречь. Если же в стыках рельсы соединяются специальными сваренными соединениями, то сопротивление стыков определяется сопротивлением соединяющего их проводника.

Сопротивление одиночного рельса с учетом сопротивления стыков увеличивается в отношении

$$\gamma = \frac{l_{3в} + l_{см}}{l_{3в}},$$

где $l_{3в}$ — длина одного звена рельсов в м;

$l_{см}$ — эквивалентная длина стыкового соединения, т. е. длина целого рельса, имеющего такое же сопротивление, в м.

Тогда

$$r'_p = \gamma r'_{0p} = \frac{1,64}{G} \left(\frac{l_{3в} + l_{см}}{l_{3в}} \right).$$

При нескольких нитях рельсов N_p , электрически соединенных параллельно, формула сопротивления рельсовой цепи примет вид:

$$r_p = \frac{1,64}{G} \left(\frac{l_{3в} + l_{см}}{l_{3в}} \right) \frac{1}{N_p}.$$

Сопротивление одного пути (из двух параллельно соединенных рельсовых нитей):

$$r_p = \frac{0,82}{G} \left(\frac{l_{3в} + l_{см}}{l_{3в}} \right).$$

Приняв эквивалентную длину стыка $l_{см} = 2,5$ м и длину рельса $l_{3в} = 12,5$ м, получим

$$r_p = \frac{0,82}{G} \cdot \frac{15,0}{12,5} = \frac{0,984}{G} \approx \frac{1,0}{G} \text{ ом/км}.$$

Соответственно для двухпутного участка

$$r_p \approx \frac{0,5}{G} \text{ ом/км.} \quad (8)$$

Сопrotивление рельсового пути при различных типах рельсов, применяющихся на дорогах СССР, дано в табл. 1.

Таблица 1

Тип рельса	Вес рельса в кг/м	Площадь поперечного сечения в см ²	Периметр сечения в см	Радиус круга, длина окружности которого равна периметру сечения, в см	Сопrotивление постоянному току при 20°C в ом/км		
					одного целого рельса	с учетом стыков	
						одного пути	двух путей
P65	64,9	82,9	70	11,1	0,0254	0,015	0,008
P50	50,5	64,5	62	9,9	0,0325	0,020	0,010
P43	43,6	55,7	56	8,9	0,0378	0,023	0,012

В случае, если применены рельсовые звенья длиной 25 м, то значения сопротивлений могут быть получены по данным табл. 1 путем умножения их на коэффициент 0,92.

По опытам сопротивление одного рельсового стыка при стыковых соединениях, контакт которых с рельсом достигается расклепкой головок соединений (или забивкой пульки), равно $1,1 \cdot 10^{-4}$ ом.

Контактный рельс. Контактным рельсом называется жесткий проводник большого сечения, часто имеющий по форме сходство с сечением ходовых рельсов, устанавливаемый при помощи специальных изоляторов на уровне, близком к уровню ходовых рельсов. В настоящее время система с контактным (третьим) рельсом применяется на электрифицированных участках постоянного тока напряжением до 1500 в (главным образом на метрополитенах). В большинстве случаев применяемый для этой цели рельс имеет вес от 20 до 75 кг/м с проводимостью, колеблющейся от $\frac{1}{6}$ до $\frac{1}{10}$ проводимости меди, что при средней проводимости $\frac{1}{8}$ дает площадь поперечного сечения в медном эквиваленте 300÷1100 мм².

На первой очереди линий Московского метрополитена длина каждого звена контактного рельса равна 12,5 м, поперечное сечение 5800 мм² и вес 45,4 кг/м. На последующих очередях поперечное сечение рельса 6600 мм² и вес 51,7 кг/м. Удельные сопротивления этих рельсов соответственно 0,12 и 0,122÷0,134 ом·мм²/м.

Фидеры. Присоединение контактной сети к шинам тяговой подстанции осуществляется при помощи кабелей и воздушных линий.

Кабельные линии обычно применяются там, где устройство воздушных линий по каким-либо причинам недопустимо или невозможно. Прежде всего это относится к метрополитенам, а также к тем случаям, когда тяговая подстанция расположена на большой разветвленной железнодорожной станции, где установка опор затруднена из-за недостаточных величин междупутий или этому мешают какие-либо сооружения.

Для воздушных линий применяют обычно алюминиевые провода.

§ 12. ВЛИЯНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ЗЕМЛИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как уже отмечалось, на электрических железных дорогах в качестве одного из проводов сети, питающей электроподвижной состав, всегда используется рельсовый путь.

Если бы рельсы были полностью изолированы от земли, то весь ток электровагона или моторного вагона I полностью протекал по рельсам на участке АВ (рис. 50). На рис. 50 и на последующих принято, что положительный полюс подстанции присоединен к контактному проводу, а отрицательный—к рельсам.

В реальных условиях рельсы через шпалы и балласт в очень большом числе точек соединены с землей. Вследствие этого потребляемые поездами токи протекают частью по рельсам, частью же по земле, как по параллельно присоединенному к рельсам проводнику.

Ток утечки из рельсов в землю зависит от разности потенциалов между рельсами и землей и от величины сопротивления, по которому протекает этот ток. Это сопротивление состоит как бы из двух, последовательно соединенных: первое — сопротивление мест перехода тока из рельсов к шпалам и балласту, которое называют переходным сопротивлением; второе — сопротивление самой земли на пути тока утечки, называемое сопротивлением растеканию.

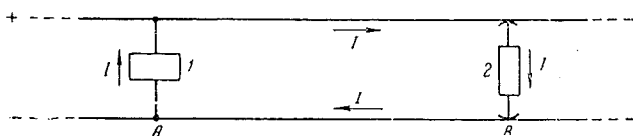


Рис. 50. Схема протекания тока по рельсам без учета утечки в землю:

1 — подстанция; 2 — потребитель (электровоз)

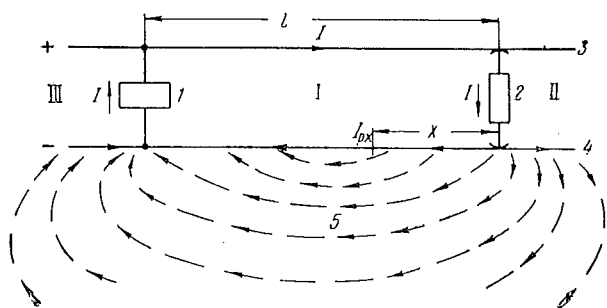


Рис. 51. Принципиальная схема протекания тока по рельсам и земле на участке железной дороги постоянного тока при одной подстанции и одной нагрузке: 1 — тяговая подстанция; 2 — нагрузка; 3 — контактная сеть; 4 — рельсы; 5 — земля; I — ток в контактной сети; $I_{рх}$ — ток в рельсах на расстоянии x от нагрузки

нию блуждающих токов сосредоточено вблизи выхода их из рельсов. Это позволяет без ощутимой погрешности при расчетах токов и потенциалов рельсов включить в переходное сопротивление сопротивление растеканию и считать затем, что сопротивление земли равно нулю. В результате этого допущения схема рис. 51 заменится расчетной схемой (рис. 52), на которой показано соединение рельсов с землей через переходные сопротивления.

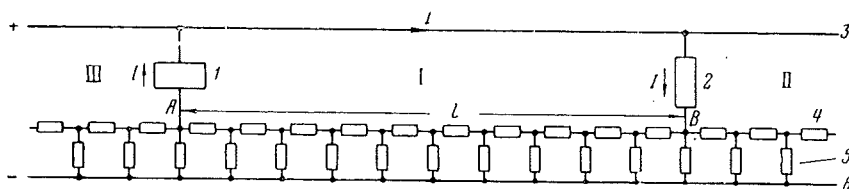


Рис. 52. Расчетная схема для определения токов в рельсах и земле на участке железной дороги постоянного тока:

1 — подстанция; 2 — нагрузка; 3 — контактная сеть; 4 — рельсы; 5 — переходное сопротивление; 6 — проводник (с сопротивлением, равным нулю), заменяющий землю

Из рассмотрения этой схемы легко видеть, что ток I из точки B будет протекать к точке A , ответвляясь от точки B не только влево (участок I), но и вправо (участок II). Точно так же и возвращаться на подстанцию ток будет не только через рельсы участка I, но и через рельсы участка III.

Таким образом, даже при одной подстанции ток электровоза растекается по рельсам в обе стороны от него (влево на I участке и вправо на II участке). При этом на половине участка AB , ближайшей к нагрузке, ток из рельсов утекает в землю, а затем на другой половине возвращается в рельсы и на подстан-

цию. В середине этого участка ток в рельсах имеет минимальное значение; он будет тем меньше, чем меньше переходное сопротивление между рельсами и землей и самой землей. Ток, утекающий по рельсам вправо от нагрузки, в конце концов полностью утекает в землю. Этот ток, так же как и ток, утекающий из рельсов на ближайшей к нагрузке половине участка AB , возвращается в рельсы на другой половине этого участка и на участке слева от подстанции.

Токи, протекающие по земле, называют блуждающими токами.

Ответвление части тока в землю приводит к тому, что сопротивление обратного провода (рельсы, шунтированные переходным сопротивлением и землей) меньше сопротивления изолированного от земли рельсового пути. Поэтому все величины, которые зависят от сопротивления рельсов, получаемые в расчетах без учета утечки тока в землю, преувеличены. Казалось бы, в тех случаях, когда величина сопротивления рельсов играет отрицательную роль

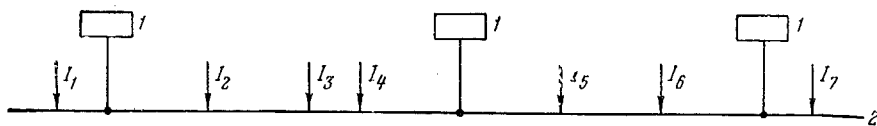


Рис. 53. Схема расположения сосредоточенных нагрузок на участке с несколькими подстанциями:

1 — тяговые подстанции; 2 — рельсы; $I_1 - I_7$ — токи электровозов

(потери энергии, напряжения и т. д.), блуждающие токи, снижая эти величины, играют роль положительную. Однако появление блуждающих токов следует рассматривать как явление отрицательное.

Дело в том, что блуждающие токи, протекая по земле, попадают в металлические подземные сооружения, текут по ним и при положительной полярности контактной сети стекают с них вблизи подстанции. В местах выхода



Рис. 54. Схема расположения сосредоточенных нагрузок на участке:

$I_1 - I_7$ — токи электровозов; $I_{01} - I_{03}$ — токи подстанций

тока из сооружения происходит электролитическое разрушение сооружений, наносящее в ряде случаев очень большой вред. Если не принять необходимые меры, то блуждающие токи могут вызвать повреждение кабелей, газопроводов и других металлических подземных сооружений, находящихся в земле.

Рассмотрим общую схему нагрузки рельсовой цепи участка электрической железной дороги (рис. 53). На этой схеме показаны три подстанции и семь нагрузок.

Для того чтобы перейти к расчету токов в рельсах и земле, нужно прежде всего найти нагрузки всех подстанций. При точном решении этой задачи нужно было бы учесть, что токи текут к подстанциям не только по рельсам, но и по земле, т. е. учесть, что распределение нагрузок между подстанциями зависит не только от сопротивления проводов контактной сети, но и от сопротивлений рельсов и земли. Такой метод приводит к очень сложным выкладкам. Для упрощения расчета токораспределения между подстанциями можно пойти на некоторые допущения, которые не внесут ощутимой погрешности. При хорошей изоляции рельсов от земли, т. е. при отсутствии утечки токов в землю, нагрузки поездов могут быть распределены между подстанциями обычным способом, т. е. обратно пропорционально расстояниям до соседних подстанций (при постоянном сечении проводов контактной сети и одинаковых напряжениях тяговых подстанций). Если же переходное сопротивление от рельсов к земле будет таково, что значительная часть тока будет протекать по земле,

то при распределении нагрузок между подстанциями можно пренебречь сопротивлением обратного провода (рельсы, шунтированные землей), так как оно много меньше сопротивления проводов контактной сети. Последнее и будет определять в основном токораспределение в таком случае. Другими словами, можно считать, что блуждающие токи не оказывают влияния на токораспределение между подстанциями.

После того как нагрузки всех подстанций найдены, можно от схемы рис. 53 перейти к схеме рис. 54, на которой подстанции заменены их нагрузками (токами отсасывающих проводов) I_{01} , I_{02} , I_{03} .

В соответствии с рис. 52 можно и рис. 54 представить в виде расчетной схемы (рис. 55).

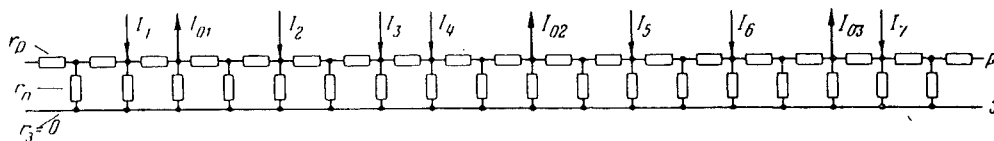


Рис. 55. Схема с тремя подстанциями и сосредоточенными нагрузками

Здесь введены обозначения:

r_p — сопротивление 1 км рельсового пути в ом/км;

r_n — переходное сопротивление от рельсов к земле на длине 1 км в ом·км.

Такая размерность объясняется тем, что все «элементы» переходных сопротивлений соединены между собой параллельно, т. е. с увеличением длины рельсового пути общее переходное сопротивление падает, в то время как общее сопротивление рельсов растет.

Если величины r_p и r_n постоянны по всей длине, то мы получаем цепь с постоянными параметрами, так называемую линейную цепь. При расчете таких

цепей используется метод наложения. В этом случае сложный контур, содержащий ряд подстанций и нагрузок, можно заменить рядом контуров, в каждом из которых протекает определенный ток, как это показано для одной из нагрузок на рис. 56. Это приводит к схеме с одной нагрузкой при удаленном в бесконечность заземлителе (рис. 57). При этом поочередно будут рассмотрены все нагрузки включая и токи подстанций.

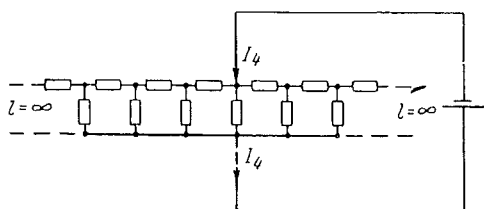


Рис. 56. Схема с одной сосредоточенной нагрузкой

На рис. 57 обозначено:

I_{px} — ток в рельсах на расстоянии x от нагрузки;

I_{zx} — ток в земле на том же расстоянии от нагрузки;

φ_x — потенциал рельса на расстоянии x от нагрузки.

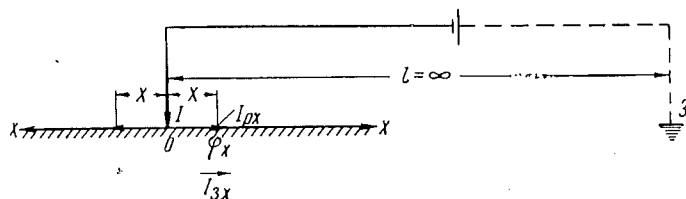


Рис. 57. Расчетная схема с одной сосредоточенной нагрузкой

Сопротивление элемента рельсовой цепи на длине dx равно $r_p dx$.

Тогда приращение потенциала рельсов на этом же элементе длины, очевидно, отрицательно и равно

$$d\varphi_x = -I_{px} r_p dx, \quad (9)$$

откуда

$$\frac{d\varphi_x}{dx} = -r_p I_{px}. \quad (9')$$

Знак минус указывает, что при направлении тока, совпадающем с положительным направлением оси x , приращение потенциала отрицательно.

Утечка тока на протяжении элемента длины dx определится потенциалом рельса φ_x и переходным сопротивлением между рельсами и землей на длине dx . Последнее получится, если переходное сопротивление на длине 1 км разделить на длину рассматриваемого участка, т. е. будет равно $\frac{r_n}{dx}$.

Следовательно, утечка тока из рельсов в землю на длине dx будет равна $\frac{\varphi_x}{r_n/dx}$. А так как приращение тока (dI_{px}) в рельсах на длине dx равно по абсолютной величине току утечки и обратно ему по знаку, то можно написать:

$$dI_{px} = -\frac{\varphi_x}{r_n/dx} = -\frac{\varphi_x}{r_n} dx, \quad (10)$$

откуда

$$\frac{dI_{px}}{dx} = -\frac{\varphi_x}{r_n}. \quad (10')$$

Знак минус показывает, что с увеличением x (рис. 57) ток в рельсах падает.

Два дифференциальных уравнения (9') и (10') представляют собой систему уравнений с двумя неизвестными. Для исключения из них одного неизвестного продифференцируем уравнение (9') по x .

$$\frac{d^2\varphi_x}{dx^2} = -r_p \frac{dI_{px}}{dx},$$

откуда

$$\frac{dI_{px}}{dx} = -\frac{1}{r_p} \cdot \frac{d^2\varphi_x}{dx^2}.$$

Подставляя значение $\frac{dI_{px}}{dx}$ в уравнение (10'), получим:

$$-\frac{1}{r_p} \cdot \frac{d^2\varphi_x}{dx^2} = -\frac{\varphi_x}{r_n},$$

или

$$\frac{d^2\varphi_x}{dx^2} - k^2\varphi_x = 0, \quad (11)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{r_p}{r_n}}.$$

Общим решением уравнения (11), как известно, будет выражение:

$$\varphi_x = Ae^{kx} + Be^{-kx}. \quad (12)$$

Ток в рельсах можно найти из уравнения (9')

$$I_{px} = -\frac{1}{r_p} \cdot \frac{d\varphi_x}{dx}.$$

Но из уравнения (12)

$$\frac{d\varphi_x}{dx} = k(Ae^{kx} - Be^{-kx}),$$

следовательно,

$$I_{p,x} = -\frac{1}{m} (Ae^{kx} - Be^{-kx}), \quad (13)$$

где

$$m = \sqrt{r_p r_n}.$$

Формулы (12) и (13) являются общими. Для всех же случаев конкретного расположения нагрузок надлежит устанавливать значения постоянных A и B по соответствующим граничным условиям.

Подставим в уравнение (12) значение потенциала рельсов при $x = \infty$ и в уравнение (13) значение тока в рельсах при $x = 0$. Совершенно очевидно, что при $x = \infty$ потенциал рельса равен нулю. При этом правая часть уравнения (12) может быть равна нулю только при $A = 0$, что и является результатом использования первого граничного условия.

При $A = 0$ вместо уравнений (12) и (13) получим:

$$\varphi_x = Be^{-kx}. \quad (14)$$

и

$$I_{p,x} = \frac{1}{m} Be^{-kx}. \quad (15)$$

Вследствие полной симметрии схемы рис. 57 относительно нагрузки ток I будет поровну растекаться в обе стороны. Следовательно, при $x = 0$

$$I_{p,x} = \frac{I}{2},$$

а используя уравнение (15), найдем

$$\frac{I}{2} = \frac{1}{m} B,$$

откуда

$$B = m \frac{I}{2}.$$

Подставив значение B в уравнения (14) и (15), получим

$$\varphi_x = \frac{mI}{2} e^{-kx} \quad (16)$$

и

$$I_{p,x} = \frac{I}{2} e^{-kx}. \quad (17)$$

Сумма токов в земле и в рельсах в каждом сечении вертикальной плоскостью должна быть равна $\frac{I}{2}$, следовательно,

$$I_{z,x} = \frac{I}{2} - I_{p,x}.$$

Отсюда, воспользовавшись уравнением (17), найдем выражение для определения тока в земле:

$$I_{z,x} = \frac{I}{2} (1 - e^{-kx}). \quad (18)$$

Уравнения (16), (17) и (18) являются основными для расчета потенциалов рельсов и токов в рельсах и земле.

Необходимо учитывать, что токи в рельсах, так же как и в земле, по разные стороны от нагрузки будут иметь разные направления. Если за положи-

тельное направление тока принять направление его влево от нагрузки, то токи в земле и рельсах справа от нагрузки будут иметь отрицательные значения.

Диаграммы потенциала и тока в рельсах показаны на рис. 58.

Если нагрузка I будет иметь направление, противоположное указанному на рис. 57 (например если она представляет ток подстанции), то в формулы (16) — (18) I надо подставлять с отрицательным знаком.

Применив метод наложения, легко построить диаграммы потенциала и тока для любой схемы нагрузок. Для этого по приведенным формулам строятся диаграммы для отдельных нагрузок (с учетом направления токов и знаков потенциала), а потом получается результирующая диаграмма алгебраическим суммированием ординат всех отдельных диаграмм. Например, для схемы с одной нагрузкой и одной подстанцией (см. рис. 51) построение диаграммы потенциала и тока в рельсах дано на рис. 59, а и б. Здесь диаграммы 1 построены для тока электроваза I , диаграммы 2 — для тока подстанции I_0 ; 3 — результирующие диаграммы.

При построении составляющих диаграмм за начало координат принимается место приложения соответствующей нагрузки (O и O_1).

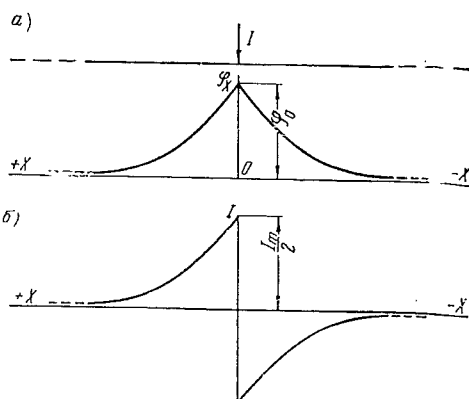


Рис. 58. Диаграммы изменения потенциала рельсов (а) и тока в них (б) по длине участка при одной сосредоточенной нагрузке

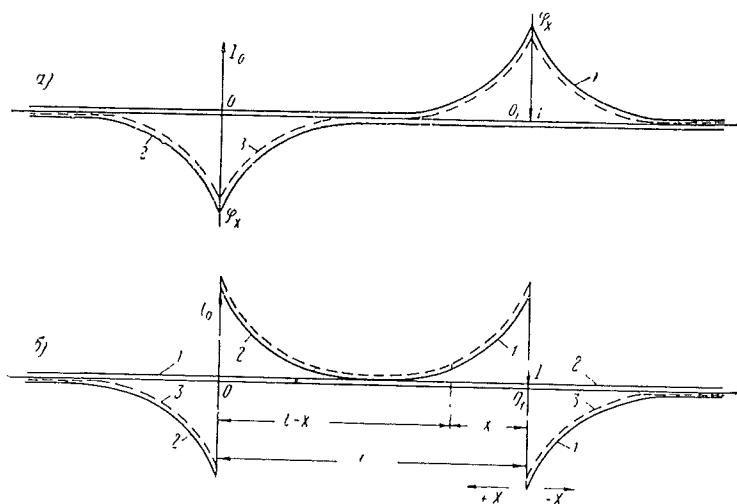


Рис. 59. Диаграммы изменения потенциала рельсов (а) и тока в них (б) по длине участка с одной подстанцией и одной сосредоточенной нагрузкой:

1 — от нагрузки I ; 2 — от тока подстанции I_0 ; 3 — результирующие кривые

Для нагрузки в точке O_1 диаграммы потенциалов и тока в рельсах имеют вид диаграмм рис. 58, а для нагрузки в точке O , имеющей противоположный знак, диаграммы строятся для тока и потенциалов обратных знаков.

Пользуясь формулами (16) и (17), легко составить расчетные уравнения для рассматриваемой схемы (см. рис. 51)

Для этого случая потенциал и ток в рельсах слева от нагрузки I (рис. 59, б) могут быть определены следующими выражениями:

$$\varphi_x = \frac{mI}{2} e^{-kx} \quad (a)$$

и

$$I_{px} = \frac{I}{2} e^{-kx}. \quad (б)$$

Обозначая абсциссы точек от начала O через $l-x$, напишем выражения потенциала и тока в той же точке рельсов, но справа от нагрузки I_0 :

$$\varphi_{(l-x)} = \frac{mI_0}{2} e^{-k(l-x)} \quad (в)$$

$$I_{p(l-x)} = -\frac{I_0}{2} e^{-k(l-x)}. \quad (г)$$

Заменяя в формулах (в) и (г) $I_0 = -I$, сложим [соответственно правые части выражений (а), (в) и (б), (г)]. Тогда получим суммарные значения потенциалов и токов в рельсах:

$$\varphi_x = \frac{mI}{2} [e^{-kx} - e^{-k(l-x)}] \quad (19)$$

и

$$I_{px} = \frac{I}{2} [e^{-kx} + e^{-k(l-x)}]. \quad (20)$$

После несложных преобразований эти выражения получают иной вид:

$$\varphi_x = \frac{mI}{2} e^{-\frac{kl}{2}} \operatorname{sh} k \left(\frac{l}{2} - x \right); \quad (19')$$

$$I_{px} = \frac{I}{2} e^{-\frac{kl}{2}} \operatorname{ch} k \left(\frac{l}{2} - x \right). \quad (20')$$

Диаграммы, построенные на рис. 59, соответствуют этим выражениям.

Используя формулу (19), можно найти эквивалентное сопротивление рельсового пути (с учетом утечки тока в землю). Оно будет равно

$$R_p = \frac{\varphi_0 - \varphi_l}{I},$$

где φ_0 и φ_l — потенциалы соответственно в точках O_1 и O , значения которых следует взять по формуле (19).

Тогда получим

$$R_p = \frac{m}{2} [(1 - e^{-kl}) - (e^{-kl} - 1)],$$

или

$$R_p = m(1 - e^{-kl}). \quad (21)$$

Характер зависимости $R_p = f(l)$ показан на рис. 60.

Необходимо помнить, что приведенные формулы справедливы в тех случаях, когда протяженность рельсового пути может быть принята по обе стороны от нагрузки бесконечной. Однако результаты расчетов при допущении такого условия, позволяющие упростить расчеты, достаточно близки к результатам расчетов при действительных расстояниях.

При нагрузке, бесконечно удаленной от подстанции, эквивалентное сопротивление рельсового пути будет равно

$$R_p' = m = \sqrt{r_p r_n}. \quad (22)$$

Практически и при расстояниях от нагрузки до подстанции 12—20 км R_p' незначительно превосходит действительную величину сопротивления рельсового пути, подсчитанного по формуле (21).

Сопротивление изоляции балласта (переходное сопротивление). Переходное сопротивление, входящее в приведенные формулы, зависит от ряда факторов: от балластных материалов, степени загрязнения балласта, пропитки шпал антисептиками и от влажности.

Наибольшее сопротивление дает щебеночный балласт, меньше — гравий и ракушечник, затем — песчаный и ниже всего — песчаный с примесью глины. Загрязнение происходит за счет наносного грунта, металлической пыли, получающейся от истирания тормозных колодок и бандажей при торможении, и т. п. Наибольшее сопротивление дает пропитка шпал изоляционными антисептиками.

Нормой минимального сопротивления балласта для рельсовых цепей при автоблокировке в Советском Союзе принята величина 1 ом на 1 км. В действительности значение сопротивления балласта в ряде случаев оказывается значительно меньшим. В литературе, посвященной расчетам рельсовых цепей [9], принимают, что минимальное сопротивление изоляции одного рельса от другого при старых (но не гнилых) шпалах, пропитанных креозотом, и слабо загрязненной поверхности будет приблизительно иметь величину:

Для щебеночного балласта	2,0 ом·км
» гравийного	1,5 »
» песчаного	1,0 »
» песчаного балласта с примесью глины	0,6 »

При сухом балласте эти значения могут увеличиваться в 2,5—5,0 раза, а при промерзающем балласте — в 10—100 раз, в зависимости от степени промерзания.

Загрязнение поверхности балласта и применение шпал, пропитанных металлическими солями, понижает переходное сопротивление в отдельных случаях до 0,2 и даже до 0,15 ом·км.

Все эти данные относятся к изоляции одного рельса от другого (что важно при сооружении рельсовых цепей автоблокировки). При определении же утечки тока картина несколько меняется. Если в рассмотренном случае переходные сопротивления от первого рельса к балласту и от балласта ко второму рельсу как бы соединены последовательно, то при утечке тягового тока они будут соединены параллельно. В связи с этим можно ожидать, что все сопротивления будут ниже приведенных в 2—4 раза.

§ 13. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

Если в сетях постоянного тока встречается только одно понятие сопротивления проводов, то при переменном токе вводятся понятия активного, реактивного и полного сопротивлений. Как известно, при протекании переменного тока по проводам явление поверхностного эффекта ведет к увеличению сопротивления провода переменному току по сравнению с сопротивлением постоянному току. Такое сопротивление переменному току называется активным сопротивлением и его отношение к сопротивлению постоянному току, т. е. омическому, обычно оценивается коэффициентом

$$\kappa = \frac{r_a}{r},$$

где r_a — активное сопротивление при переменном токе в ом/км;
 r — сопротивление при постоянном токе в ом/км.

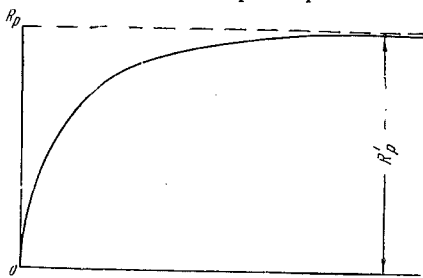


Рис. 60. График зависимости $R_p = f(l)$

Явление поверхностного эффекта сказывается тем сильнее, чем больше частота тока, поперечное сечение проводника, чем меньше его поверхность и, наконец, чем больше магнитная проницаемость материала, из которого изготовлен проводник.

Для медных и алюминиевых проводов, применяемых в контактных сетях, и при тех частотах, которые имеют место на электрифицированных дорогах переменного тока, влиянием поверхностного эффекта можно пренебречь и считать активное сопротивление проводов равным омическому, т. е. $\kappa = 1$.

Наиболее сложно определение активного сопротивления проводников из ферромагнитных материалов и, в частности, рельсов. Сложность эта объясняется тем, что магнитная проницаемость материала рельсов зависит от величины протекающего по ним тока. Ток же в рельсах не одинаков по длине их, так как в фидерной зоне нормально находится несколько потребителей (поездов) и часть тока протекает по земле. Величина тока, протекающего по рельсам, зависит от их сопротивления, и чем оно больше, тем меньше ток в рельсах, т. е. тем большая часть тока ответвляется в землю. В связи с этим определение тока в рельсах обращается в трудную задачу расчета токораспределения в сложной сети с нелинейными параметрами.

В практических расчетах для их упрощения принимаются некоторые допущения. Ниже в каждом случае эти допущения будут оговариваться особо.

Рассмотрим зависимость активного сопротивления рельса от протекающего по нему тока. Для определения активного сопротивления массивных стальных проводов наибольшее применение нашли эмпирические формулы, хотя имеются и теоретические работы по этому вопросу.

Для расчетов активного сопротивления рельсов главным образом применяются эмпирические формулы Циклера [10]. Эти формулы были проверены опытами, проведенными в лабораториях Всесоюзного электротехнического института (ВЭИ), и, как отмечается [11], отклонение от опытных данных не превышало 5—10%.

Согласно этим формулам:

при $\beta < 1$

$$\kappa = 1 + 0,84 \beta^4; \quad (23a)$$

при $1 \leq \beta \leq 3$

$$\kappa = 0,758 + \sqrt{1,343 \beta^2 - 0,183}; \quad (23б)$$

при $\beta \geq 3$

$$\kappa = 0,758 + 1,159 \beta. \quad (23в)$$

Здесь

$$\beta = 2 \cdot 10^{-2} \frac{s}{P} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \mu, \quad (24)$$

где s — площадь поперечного сечения рельса в $см^2$;

P — периметр сечения рельса в $см$;

f — частота тока в $гц$;

ρ — удельное сопротивление рельсовой стали в $\frac{ом \cdot мм^2}{м}$;

μ — относительная магнитная проницаемость материала рельса.

Последняя величина зависит от напряженности поля H на поверхности рельса, которая определяется по формуле

$$H = \frac{0,4 \pi I}{P}, \quad (25)$$

где I — ток, протекающий по рельсу.

Значения площади поперечного сечения рельсов, периметра сечения и отношения $\frac{s}{P}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип рельса	$S \text{ см}^2$	$P \text{ см}$	$\frac{s}{P}$
P65	82,9	70	1,18
P50	64,5	62	1,04
P43	55,7	56	1,00

Точные результаты можно было бы получить, располагая графиками зависимости $\mu = f(H)$, построенными для данного сорта стали на основе специально проведенных опытов. Однако при большой неопределенности ряда других факторов, участвующих в расчете, можно ограничиться имеющимися в литературе данными. На рис. 61 даны такие графики для горячекатаной стали с различным содержанием углерода.

Воспользовавшись табл. 1, можно найти по формуле (25) значение H для различных типов рельсов (табл. 3).

Как показывает опыт, ток в рельсах может изменяться в весьма широких пределах (практически от нуля до нескольких сотен ампер) и, следовательно, в столь же широких пределах может изменяться и величина H .

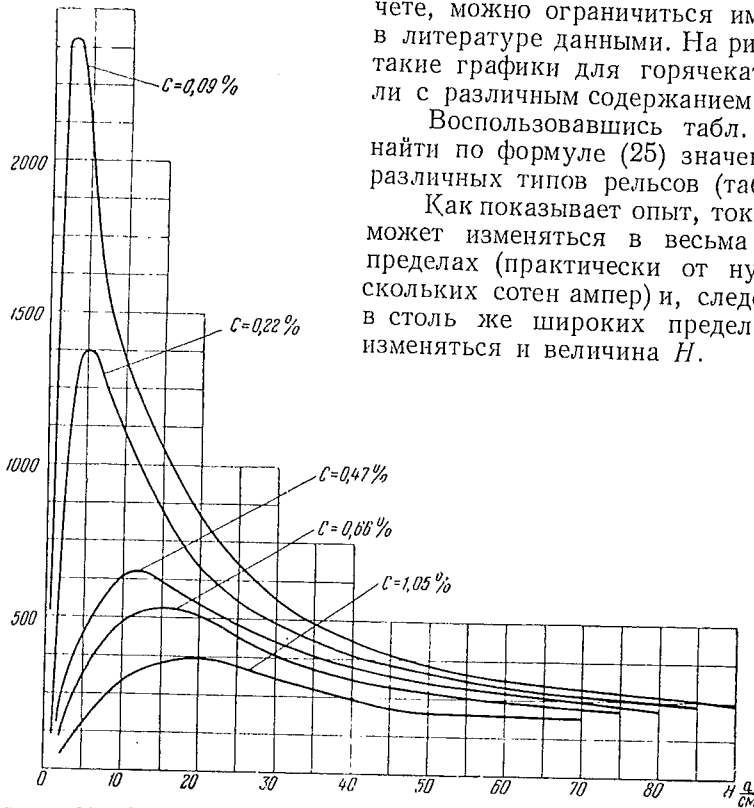


Рис. 61. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для проводников из стали с различным содержанием углерода

Как видно из кривых $\mu = f(H)$ (рис. 61), магнитная проницаемость увеличивается при увеличении H (а следовательно, и тока в рельсах) в зо-

Таблица 3

Тип рельса	P65	P50	P43
H	0,018 I	0,020 I	0,022 I

нах малого насыщения, т. е. до достижения максимума магнитной проницаемости, и наоборот, за пределами этого максимума падает при увеличении тока.

Интересно установить, какая часть кривой $\mu = f(H)$ имеет значение для расчетов активного сопротивления рельсов в практических условиях.

На рис. 61 для рельсовой стали (с содержанием углерода около 0,5%) кривая $\mu = f(H)$ имеет максимум для $H = 10 \div 12 \text{ а/см}$, что соответствует току в рельсе согласно табл. 3 от $\frac{10}{0,022}$ до $\frac{12}{0,018}$, т. е. от 450 до 670 а.

Соответственно, в двух рельсах одного пути получаются значения тока от 900 до 1340 а и еще вдвое больше для двухпутного участка. Такие значения токов в рельсах значительно превышают рабочие токи, могущие иметь место на самых грузонапряженных участках железных дорог переменного тока.

Эти соображения говорят о том, что рельсы на электрифицированных участках однофазного тока работают в зоне относительно слабых полей и, следовательно, с увеличением тока в рельсах их магнитная проницаемость и активное сопротивление растут.

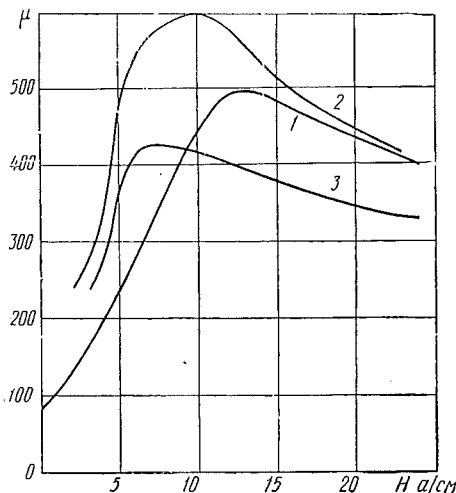


Рис. 62. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля для железнодорожных рельсов

На рис. 62 даны кривые, снятые для этой части напряженности магнитного поля. Кривая 1 построена по данным ЛИИЖТа, кривая 2 — по данным ВЭИ, кривая 3 — по данным магнитной лаборатории Академии наук СССР. Эти кривые используются для определения сопротивления рельсов при расчетах цепей автоблокировки [12].

Определим активное сопротивление рельсов для значений тока в пределах от 0 до 300 а. Задавшись величиной тока 0, 100, 200 и 300 а, найдем соответствующие значения H (воспользовавшись табл. 3) и затем для каждого значения H — относительную магнитную проницаемость μ (взятую как среднее из кривых рис. 62).

Зная величину μ и приняв для рельсов $\rho = 0,21 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, можно по формуле (24) найти значение коэффициента β , используя данные табл. 1.

Далее по одной из формул (23а) — (23 в), выбираемой в зависимости от величины коэффициента β , можно найти значение κ . Умножив омическое сопротивление рельсов (взятое из табл. 1) на κ , получим активное сопротивление целого рельса.

Результаты такого расчета сведены в табл. 4.

Таблица 4

$I \text{ а}$	$H \text{ а/см}$	μ	β	κ	$r_{pa} \text{ ом/км}$ по формуле (23, в)
Рельсы типа Р65					
0	0	100	3,56	4,9	0,124
100	1,8	125	3,96	5,4	0,137
200	3,6	250	5,62	7,3	0,185
300	5,4	380	6,91	8,76	0,220
Рельсы типа Р50					
0	0	100	3,12	4,4	0,143
100	2,0	130	3,56	4,9	0,159
200	4,0	270	5,12	6,8	0,220
300	6,0	400	6,23	8,0	0,260
Рельсы типа Р43					
0	0	100	3,00	4,24	0,160
100	2,2	135	3,50	4,8	0,181
200	4,4	310	5,30	6,8	0,256
300	6,6	420	6,20	8,0	0,302

Из специальных теоретических исследований, посвященных определению активного сопротивления ферромагнитных проводников, следует указать на работы проф. Л. Р. Неймана, который предложил расчетную формулу [12]:

$$r_{pa} = \frac{0,28}{P} \sqrt{\mu \rho f}.$$

Подставив сюда $\rho = 0,21 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ и $f = 50 \text{ гц}$, получим

$$r_{pa} = \frac{0,91}{P} \sqrt{\mu}. \quad (26)$$

Напряженность поля в этом методе подсчитывается по формуле $H = \frac{I}{P}$ и получается несколько меньшей, чем в первом случае.

Проделав расчет активного сопротивления рельсов для тех же условий, что и выше, но по формуле (26) (данные расчета сведены в табл. 5), из сопоставления результатов обоих расчетов (табл. 4 и 5) видим их хорошее совпадение.

Таблица 5

I	$H = \frac{I}{P}$	μ	$r_{pa} \text{ ом/км}$ по формуле (26)
Рельсы типа Р65			
0	0	100	0,130
100	1,4	112	0,138
200	2,9	180	0,175
300	4,3	300	0,226
Рельсы типа Р50			
0	0	100	0,147
100	1,6	118	0,160
200	3,2	210	0,214
300	4,9	344	0,274
Рельсы типа Р43			
0	0	100	0,163
100	1,8	134	0,187
200	3,6	250	0,258
300	5,4	380	0,318

Значения активных сопротивлений рельсов в табл. 4 и 5 даны для одного целого рельса, т. е. без учета увеличения сопротивления за счет стыков.

Согласно данным расчетов рельсовых цепей автоблокировки [12] сопротивление стыка принимается равным $0,024 \text{ ом/км}$ (при длине звена $12,5 \text{ м}$).

Взяв средние значения активных сопротивлений рельсов из табл. 4 и 5 и добавив сопротивление стыка, получим сопротивление (в ом/км) одной нити рельсов однофазному току промышленной частоты, приведенное в табл. 6.

Таблица 6

Ток в а	Сопротивление одной нити рельсов однофазному току промышленной частоты в ом/км для рельсов типа		
	Р65	Р50	Р43
0	0,15	0,17	0,19
100	0,16	0,18	0,21
200	0,20	0,24	0,28
300	0,25	0,29	0,33

Из полученных результатов видно, что активное сопротивление рельсов превышает омическое в 5—10 раз в зависимости от величины протекающего тока.

§ 14. ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

Полное сопротивление сети переменного тока состоит из активного и реактивного (в данном случае индуктивного) сопротивлений.

Индуктивность или коэффициент самоиндукции всякой двухпроводной длинной линии, как известно, зависит от расстояния между проводами этой линии и радиуса поперечного сечения проводов. При увеличении расстояния между проводами увеличивается магнитный поток, пронизывающий петлю, и растет индуктивность линии. При увеличении же радиуса сечения проводов индуктивность падает. Если ток одного направления распределяется между несколькими параллельно соединенными проводами, то индуктивность рассматриваемой линии уменьшается. Этим пользуются, например, в высоковольтных линиях передачи, «расщепляя» отдельные провода, т. е. заменяя один провод несколькими, соединенными между собой параллельно.

В контактных подвесках несущий трос и контактный провод можно рассматривать как расщепленный провод.

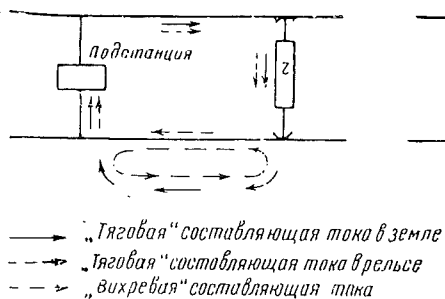


Рис. 63. Схема токораспределения на участке однофазного тока

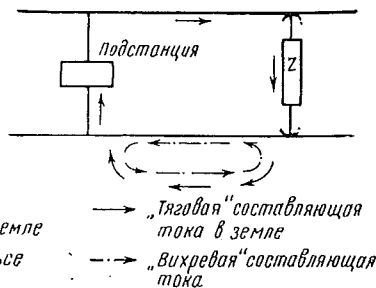


Рис. 64. Расчетная схема токораспределения на участке однофазного тока при большом расстоянии от подстанции до нагрузки

Аналогичное положение имеет место в рельсовой цепи в связи с протеканием части тока по земле, так как последняя проявляет себя как провод, параллельно присоединенный к рельсам. Поэтому при расчетах контактной сети переменного тока приходится определять сопротивление всего контура вместе, а не сопротивление отдельных проводов, составляющих этот контур (как это делается при постоянном токе). В соответствии с этим мы в дальнейшем под понятиями «полное сопротивление контактной сети» и «расчет контактной сети» будем понимать сопротивление и расчет всей схемы, состоящей из проводов, рельсов и земли.

В схеме одностороннего питания переменным током одной нагрузки (рис. 63) можно рассматривать три отдельные составляющие тока, протекающие по трем контурам:

- 1) ток, протекающий по контуру контактная подвеска — рельсы;
- 2) ток, протекающий по контуру контактная подвеска — земля;
- 3) вихревой ток в контуре рельсы — земля.

Условное направление этих токов показано на рис. 63. Таким образом, ток в рельсах получается как геометрическая сумма двух составляющих: тока контура 1 (назовем его условно «тяговой» составляющей тока, которая является частью тока, потребляемого электровозом) и тока контура 3 — «вихревой» составляющей.

Если рассматривать в рельсах один суммарный ток, то схему можно представить состоящей из двух контуров тока: контактная подвеска — земля и рельсы — земля (рис. 64). Исходя из этих двух контуров, мы и будем ниже вести определение полного сопротивления контактной сети.

При протекании тока по рельсам на участках постоянного тока, и расстояниях между подстанцией и нагрузкой 12—20 км на средней части участка ток в рельсах близок к нулю.

При переменном токе тяговая составляющая тока в рельсах падает значительно быстрее, чем при постоянном токе. Это объясняется тем, что полное сопротивление рельсов много больше омического (особенно в зоне больших токов, т. е. около подстанций и потребителей, — за счет активной составляющей) и, кроме того, длины фидерных зон при переменном токе значительно больше. Другими словами, при достаточно большом расстоянии от нагрузки до подстанции в рельсах будет протекать только вихревой ток и в таком случае можно считать, что ток в рельсах пропорционален току в контактной подвеске. При этом могут быть использованы коэффициенты самоиндукции и взаимной индукции, выведенные для линий бесконечно большой длины.

Определение индуктивностей сети с учетом конечной длины участка весьма сложно. Объясняется это тем, что ток в рельсах изменяется по длине пути. В практических расчетах заменяют этот изменяющийся ток некоторым средним значением и для определения коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции также пользуются формулами, выведенными в предположении бесконечно длинной линии.

Полное сопротивление любого контура можно представить в комплексной форме как сумму трех слагаемых

$$z = r_a + jx' + jx'' \text{ ом/км}, \quad (27)$$

где r_a — активное сопротивление;

x' — внешнее индуктивное сопротивление (т. е. сопротивление за счет магнитного поля вне проводника);

x'' — внутреннее индуктивное сопротивление (т. е. сопротивление за счет магнитного поля внутри проводника).

Так как активное сопротивление проводов контактной сети принимается равным омическому, то в дальнейшем эта величина будет обозначаться так же, как и сопротивление постоянному току, т. е. r_k . Активное же сопротивление рельсов много больше их сопротивления постоянному току, и эту величину будем обозначать через r_{pa} .

Величина внешнего индуктивного сопротивления может быть определена из выражения

$$x' = \omega L \text{ ом/км}, \quad (28)$$

где $\omega = 2\pi f$;

L — коэффициент самоиндукции (за счет внешнего магнитного поля) в гн/км.

Внутреннее индуктивное сопротивление проводов определяется формулой

$$x'' = \omega \frac{\mu}{2} 10^{-4} \text{ ом/км}. \quad (29)$$

Для медных и алюминиевых проводов магнитная проницаемость $\mu = 1$ и внутреннее индуктивное сопротивление проводов контактной сети определится выражением

$$x_k'' = \frac{\omega}{2} 10^{-4} \text{ ом/км}. \quad (30)$$

Что касается внутреннего индуктивного сопротивления рельсов, то из-за непостоянства величины магнитной проницаемости его определяют иначе. Приближенно можно принять [11], что внутреннее сопротивление рельсов составляет 75% от их активного сопротивления, т. е.

$$x_p'' = 0,75 r_{pa}.$$

Для определения коэффициента самоиндукции L при применяемых частотах переменного тока и высотах расположения проводов контактных сетей над землей наиболее подходящей является следующая формула:

$$L = \left(1 + 21 \ln \frac{2}{1,78 R \sqrt{4\pi\sigma\omega}} - j \frac{\pi}{2} \right) 10^{-4} \text{ гн/км}, \quad (31)$$

где R — радиус провода в см;

σ — проводимость земли (единицы CGSM).

Остальные обозначения те же, что и выше.

Соответствующая этому коэффициенту самоиндукции величина x' не является чисто индуктивным сопротивлением, так как она получается комплексной, мнимая часть которой представляет активное сопротивление земли как одного из обратных проводов.

Используя формулы (27)–(31) и заменив R на R_k , получим полное сопротивление для контура контактный провод — земля

$$z_k = r_k + j \frac{\omega}{2} 10^{-4} + j\omega \left(1 + 21 \ln \frac{2}{1,78 R_k \sqrt{4\pi\sigma\omega}} - j \frac{\pi}{2} \right) 10^{-4}.$$

Перейдя к десятичным логарифмам, для частоты тока $f = 50$ гц после упрощений получим

$$z_k = r_k + 0,05 - j 0,144 (1,42 + \lg R_k \sqrt{\sigma}). \quad (32)$$

Индекс k , как и выше, означает, что величина относится к контактному проводу.

Входящая в формулу (32) величина σ (проводимость грунта) в различных условиях изменяется в широких пределах. Для частоты 50 гц и некоторых средних условий принимают

$$\sigma = 10^{-14} \text{ CGSM}.$$

Полное сопротивление контура одиночный рельс — земля будет равно

$$z'_p = r_{pa} + j 0,75 r_{pa} + j\omega \left(1 + 21 \ln \frac{2}{1,78 R_p \sqrt{4\pi\sigma\omega}} - j \frac{\pi}{2} \right) 10^{-4}.$$

Здесь индекс p означает, что величина относится к рельсам, а R_p — радиус окружности с длиной, равной периметру поперечного сечения рельса в сантиметрах, т. е. $R_p = \frac{P}{2\pi}$ (величину периметра соответствующего типа рельса можно взять из табл. 1).

После подстановки $f = 50$ гц, перехода к десятичным логарифмам и упрощений получим

$$z'_p = r_{pa} + 0,05 - j 0,144 (1,53 - 5,2 r_{pa} + \lg R_p \sqrt{\sigma}). \quad (33)$$

Так как контактная сеть состоит из ряда проводов и ряда рельсов, то при расчетах приходится учитывать влияние взаимной индукции контуров, составленных каждый из провода и земли или рельса и земли.

Коэффициент взаимной индукции определяется по формуле

$$M = \left(1 + 21 \ln \frac{2}{1,78 a \sqrt{4\pi\sigma\omega}} - j \frac{\pi}{2} \right) 10^{-4} \text{ гн/км}, \quad (34)$$

где a — расстояние между осями проводов в см.

Значение составляющей индуктивного сопротивления, возникающей от взаимной индукции будет равно

$$x_M = \omega M \text{ ом/км}.$$

Произведя упрощения, подобные сделанным выше, получим полное сопротивление взаимоиндукции

$$z_M = j x_M = 0,05 - j 0,144 (1,53 + \lg a \sqrt{\sigma}). \quad (35)$$

Отметим, что при расчетах придется определять коэффициент взаимной индукции между рельсами и провисающим проводом. Последний можно заменить эквивалентным горизонтальным проводом. Для встречающихся соотношений стрел провеса и высоты провода над рельсом с достаточной для практики точностью можно ([13], стр. 416) принимать эквивалентный провод расположенным на $1/3$ стрелы провеса выше наинизшей точки провода.

§ 15. ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В соответствии с тем, как это было разобрано выше, можно заменить всю совокупность проводов и рельсов рядом контуров. Умея найти активное и реактивное сопротивления каждого контура и оценить их взаимное влияние, можно найти полное сопротивление контактной сети, а также его активную и реактивную составляющие.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай, а затем перейдем к более сложным, сводя их каждый раз к этому простому.

Однопутный участок с одним контактным проводом или цепной подвеской при стальном несущем тросе. Рассмотрим горизонтальное расположение контактного провода, симметричное относительно рельсового пути, т. е. будем полагать этот провод лежащим на одной и той же высоте в вертикальной плоскости, проходящей через ось пути. Сюда же можно отнести с достаточной точностью и случай зигзагообразного (относительно оси пути) расположения провода. Вследствие малой проводимости стального троса примем, что весь ток протекает по контактному проводу.

В качестве расчетной возьмем схему с одним контактным проводом и одним рельсом (рис. 65). Падение напряжения в контуре, составленном из контактного провода и рельса, можно рассматривать как разность падений напряжения в контурах провод—земля и рельс—земля (рис. 64). Так как ток в рельсах не остается постоянным, то удобнее говорить о падении напряжения в элементе контура длиной dx , считая на этой длине ток равным I_{px} .

Падение напряжения в элементе контура контактный провод—земля будет складываться из произведения тока в этом контуре I_0 на сопротивление элемента этого контура $z_k dx$ за вычетом э. д. с., вызываемой в этом контуре током рельса I_{px} , которая будет равна $I_{px} z_{kp} dx$.

Индекс kp означает, что величина, снабженная этим индексом, определяется взаимной индукцией между контурами контактный провод—земля и рельс—земля. Таким образом,

$$z_{kp} = j\omega M_{kp}.$$

Аналогично может быть определено и падение напряжения в контуре рельс—земля. Оно будет равно произведению тока рельса I_{px} на сопротивление элемента контура рельс—земля $z_{px} dx$, за вычетом э. д. с., вызываемой в этом контуре током контура контактный провод—земля I_0 . Последняя будет равна $I_0 z_{kp}$.

В дальнейшем для большей простоты изложения мы будем заменять понятия контур провод—земля или рельс—земля условно словами «провод» и «рельс», т. е. вместо падения напряжения в контуре провод—земля будем говорить падение напряжения в проводе. Аналогично вместо э. д. с., вызванной током контура рельс—земля в контуре провод—земля, будем говорить э. д. с., вызванная током рельса в проводе, и т. п.

Исходя из изложенного выше, можно написать, что падение напряжения в контактной сети на длине dx будет равно

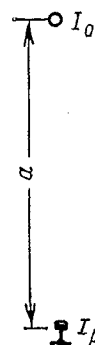


Рис. 65. Основная расчетная схема для определения сопротивления контактной сети

$$d\Delta\dot{U}_0 = (\dot{I}_0 z_k - \dot{I}_{px} z_{kp} + \dot{I}_{px} z_{px} - \dot{I}_0 z_{kp}) dx. \quad (a)$$

Падение напряжения на всем расстоянии l от нагрузки до подстанции определится

$$\Delta\dot{U}_0 = \int_0^l d\Delta\dot{U}_0,$$

или

$$\Delta\dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_k l - \dot{I}_0 z_{kp} l + \int_0^l (\dot{I}_{px} z_{px} - \dot{I}_{px} z_{kp}) dx. \quad (б)$$

Если пренебречь взаимной зависимостью между величинами \dot{I}_{px} и z_{px} и заменить ток в рельсе и его сопротивление их средними значениями \dot{I}_p и z_p по длине пути, а падение напряжения определять на длине, равной 1 км, то вместо уравнения (б) можно написать

$$\Delta\dot{U}_0 = \dot{I}_0 z_k - \dot{I}_0 z_{kp} + \dot{I}_p z_p - \dot{I}_p z_{kp}. \quad (36)$$

Так как полное сопротивление 1 км контактной сети (контура провод — рельс) z_0 равно отношению $\frac{\Delta\dot{U}_0}{\dot{I}_0}$, то из выражения (36) получим

$$z_0 = z_k - z_{kp} + (z_p - z_{kp}) \frac{\dot{I}_p}{\dot{I}_0}. \quad (37)$$

Уравнение (37) говорит о том, что параметры контактной сети однофазного тока зависят от величины тока в рельсах и, следовательно, от распределения тока между рельсами и землей.

Учет распределения тягового тока между рельсами и землей для упрощения производится, как и для постоянного тока, в предположении, что сопротивление земли равно нулю. При таком предположении распределение тока будет определяться величинами сопротивления рельсов и переходного сопротивления от рельсов к земле. Последнее включает в себя сопротивление земли и принимается не зависящим от расположения нагрузок относительно подстанций. В действительности, при различном расположении нагрузок влияние сопротивления земли на величину переходного сопротивления будет различно. Но так как это влияние невелико, то для практических расчетов допущение независимости переходного сопротивления от расположения нагрузок на участке вполне оправдано.

Схема решения поставленной задачи аналогична рассмотренной в § 12 для постоянного тока. Отличие в данном случае заключается в том, что ток, протекающий по контактному проводу, наводит э. д. с. в контуре рельс—земля. Обозначая (как и при постоянном токе) приращение тока на элементарном участке dx через $d\dot{I}_{px}$, можно написать

$$d\dot{I}_{px} = - \frac{\dot{\phi}_x}{z_n} dx, \quad (38)$$

где $\dot{\phi}_x$ — потенциал рельса в точке с координатой x в б;

z_n — переходное сопротивление в ом · км;

Обозначив через $d\dot{\phi}_x$ приращение потенциала рельса и приняв за положительное направление оси x на рис. 66 слева направо от начала 0, можно написать

$$d\dot{\phi}_x = (\dot{I}_{px} z_p - \dot{I}_0 z_{kp}) dx. \quad (39)$$

Выше было показано, что сопротивление рельсов зависит от протекающего по ним тока, т. е. не является постоянной величиной. Учет этой особенности дорог однофазного тока приводит к большим усложнениям. Исходя из этого, довольствуются приближенным решением, принимая z_p , как отмечено выше, постоянным и равным среднему его значению по длине пути.

Легко видеть, что уравнения (10) и (38) имеют одинаковый вид, уравнения же (9) и (39) отличаются за счет знака и нового члена $I_0 z_{кр}$.

В результате решения уравнений (38) и (39) получим выражение для тока в рельсе

$$I_{px} = \frac{1}{m} (Ae^{kx} - Be^{-kx}) + nI_0, \quad (40)$$

где

$$k = \sqrt{\frac{z_p}{z_n}}; \quad m = \sqrt{z_p z_n} \quad \text{и} \quad n = \frac{z_{кр}}{z_p}.$$

Величины K и m для рельсовых цепей по аналогии с терминологией, принятой для длинных линий, можно назвать соответственно коэффициентом распространения и волновым сопротивлением.

Уравнение (40) является общим для тока в рельсах на участках однофазного тока. Из этого уравнения легко получить выражение для тока в рельсах и для участков постоянного тока, положив $z_n = r_n$, $z_p = r_p$ и $n = 0$, так как $\omega = 0$.

Постоянные A и B , как обычно, определяются в зависимости от конкретных условий задачи.

Если рассмотреть условную схему, в которой в середине каждой фидерной зоны расположена одна нагрузка (рис. 67, а), то с точки зрения расчета, вследствие симметрии этой схемы, она может быть сведена к схеме, показанной на рис. 67, б, при которой рассматриваемый участок железной дороги

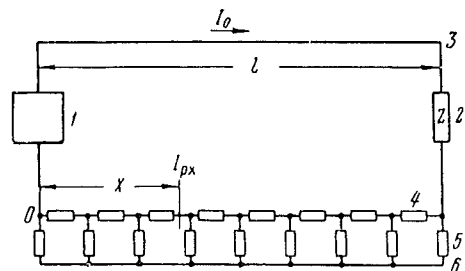


Рис. 66. Схема участка с одной подстанцией и одной нагрузкой:

1 — подстанция; 2 — электровоз; 3 — контактный провод; 4 — рельсы; 5 — переходное сопротивление; 6 — земля

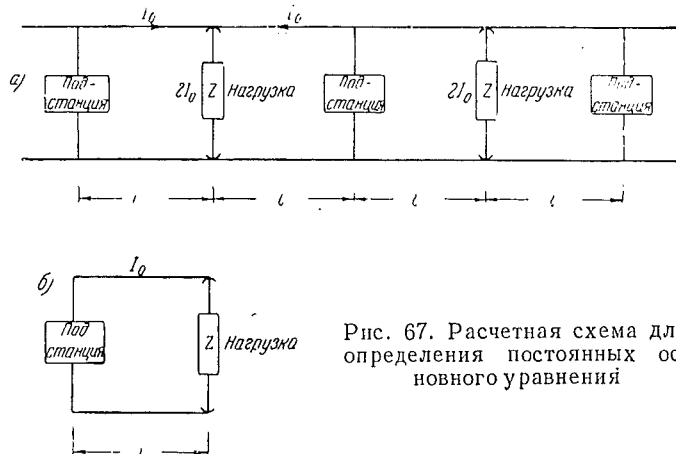


Рис. 67. Расчетная схема для определения постоянных основных уравнений

как бы ограничен подстанцией и нагрузкой. В этом случае для определения постоянных A и B легко устанавливаются граничные условия, заключающиеся в том, что на концах участка, т. е. при $x = 0$ и $x = l$, $I_{px} = I_0$.

Используя это положение, из выражения (40) получим

$$I_0 = \frac{1}{m} (A - B) + nI_0$$

и

$$I_0 = \frac{1}{m} (Ae^{kl} - Be^{-kl}) + nI_0,$$

откуда

$$B = A \frac{1 - e^{kl}}{1 - e^{-kl}}.$$

Решив эти уравнения, найдем

$$A = I_0 (1 - n) m \frac{1 - e^{-kl}}{e^{kl} - e^{-kl}};$$

$$B = I_0 (1 - n) m \frac{1 - e^{kl}}{e^{kl} - e^{-kl}}.$$

После простейших преобразований получим окончательные значения постоянных A и B

$$A = I_0 (1 - n) m \frac{e^{-\frac{kl}{2}}}{e^{\frac{kl}{2}} + e^{-\frac{kl}{2}}}$$

и

$$B = I_0 (1 - n) m \frac{e^{\frac{kl}{2}}}{e^{\frac{kl}{2}} + e^{-\frac{kl}{2}}}.$$

Подставив эти значения в уравнение (40), получим расчетную формулу для определения тока в рельсе

$$I_{px} = I_0 (1 - n) \frac{e^{k(x - \frac{l}{2})} + e^{-k(x - \frac{l}{2})}}{e^{\frac{kl}{2}} + e^{-\frac{kl}{2}}} + nI_0, \quad (41)$$

или

$$I_{px} = I_0 (1 - n) \frac{\operatorname{ch} k \left(x - \frac{l}{2} \right)}{\operatorname{ch} k \frac{l}{2}} + nI_0. \quad (41')$$

Средний ток в рельсах может быть найден из выражения

$$I_p = \frac{1}{l} \int_0^l I_{px} dx.$$

Подставив сюда значение I_{px} из формулы (41'), получим

$$I_p = \frac{I_0 (1 - n)}{l \operatorname{ch} k \frac{l}{2}} \int_0^l \operatorname{ch} k \left(x - \frac{l}{2} \right) dx + nI_0,$$

откуда

$$I_p = 2 \frac{I_0 (1 - n)}{kl} \operatorname{th} \frac{kl}{2} + nI_0$$

и

$$\frac{I_p}{I_0} = (1-n) \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} + n. \quad (41'')$$

Подставив полученное значение отношения $\frac{I_p}{I_0}$ в уравнение (37), найдем среднее значение полного сопротивления 1 км контактной сети

$$z_0 = z_k - z_{kp} + (z_p - z_{kp}) \left[(1-n) \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} + n \right].$$

Подставляя сюда вместо n равное ему отношение $\frac{z_{kp}}{z_p}$, получим окончательно выражение для определения z_0

$$z_0 = z_k - \frac{z_{kp}^2}{z_p} + \frac{(z_p - z_{kp})^2}{z_p} \cdot \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}}. \quad (42)$$

Для тех случаев, когда нагрузки расположены вблизи от подстанции и переходное сопротивление достаточно велико, так что можно принять $\frac{kl}{2} \rightarrow 0$ и $\operatorname{th} \frac{kl}{2} \rightarrow 0$ и, следовательно,

$$\lim_{\frac{kl}{2} \rightarrow 0} \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} = 1,$$

получаем

$$z_0 = z_k + z_p - 2z_{kp}. \quad (42')$$

Для случаев же, когда нагрузки значительно удалены от подстанции, а переходное сопротивление столь невелико, что можно считать $\frac{kl}{2} \rightarrow \infty$ и соответственно $\operatorname{th} \frac{kl}{2} \rightarrow 1$, будем иметь

$$z_0 = z_k - \frac{z_{kp}^2}{z_p}. \quad (42'')$$

Последний случай равносильно предположению, что весь ток в рельсе возникает вследствие наведения в нем э. д. с. током I_0 . Эта э. д. с. равна $I_0 z_{kp}$, а соответствующий ток в рельсе равен $\frac{I_0 z_{kp}}{z_p}$, откуда $\frac{I_p}{I_0} = \frac{z_{kp}}{z_p}$. Подставив значение этого отношения в уравнение (37), также получим уравнение (42'').

В действительных условиях значение величины z_0 , полученное по формуле (42), будет лежать в пределах, определяемых формулами (42') и (42'').

В наиболее простой практической схеме рис. 68, в отличие от рассмотренной выше расчетной схемы, на земле будут находиться два рельса, поэтому уравнение (36) заменится другим, учитывающим влияние тока во втором рельсе на падение напряжения в первом рельсе.

Полагая полное сопротивление обоих рельсов одинаковым и равным z'_p , а ток в каждом из них равным $\frac{1}{2} I_p$, напишем выражение падения напряжения в контуре контактный провод — первый рельс на длине, равной 1 км

$$\Delta u_0 = I_0 z_k - \frac{1}{2} I_p z_{kp1} - \frac{1}{2} I_p z_{kp2} + \frac{1}{2} I_p z'_p + \frac{1}{2} I_p z_{p1,2} - I_0 z_{kp1}.$$

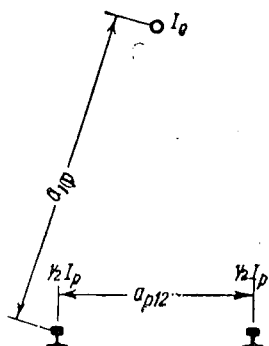


Рис. 68. Расчетная схема расположения проводов при цепной подвеске со стальным тросом

Здесь z_{kp1} и z_{kp2} — те же величины, что и выше, но относящиеся соответственно к первому и второму рельсам;

$z_{p1,2}$ — сопротивление от взаимной индукции между первым и вторым рельсами.

Очевидно, что $z_{p1,2} = j\omega M_{p1,2}$, где $M_{p1,2}$ — коэффициент взаимной индукции между первым и вторым рельсами. (Совершенно очевидно, что падение напряжения в контуре контактный провод — второй рельс будет то же самое.)

Положив $z_{kp1} = z_{kp2} = z_{kp}$, получим

$$\Delta u_0 = I_0 z_k - I_p z_{kp} + \frac{1}{2} I_p (z'_p + z_{p1,2}) - I_0 z_{kp}. \quad (43)$$

Сопоставление выражений (36) и (43) показывает, что два рельса могут быть заменены одним эквивалентным, расположенным по оси пути с сопротивлением $z'_{pэ}$, равным

$$z'_{pэ} = \frac{1}{2} (z'_p + z_{p1,2}). \quad (44)$$

Подставив в формулу (44) значения z'_p и $z_{p1,2}$, согласно выражениям (33) и (35), получим

$$z'_{pэ} = \frac{1}{2} [r_{pa} + 0,05 - j 0,144 (1,53 - 5,2 r_{pa} + \lg R_p \sqrt{\sigma}) + 0,05 - j 0,144 (1,53 + \lg a_{p1,2} \sqrt{\sigma})].$$

Здесь $a_{p1,2}$ — расстояние между осями первого и второго рельса в см; остальные обозначения те же, что и выше.

После упрощений получим окончательно

$$z'_{pэ} = \frac{r_{pa}}{2} + 0,05 - j 0,144 \left(1,53 - 5,2 \frac{r_{pa}}{2} + \lg \sqrt{R_p a_{p1,2}} \cdot \sqrt{\sigma} \right). \quad (45)$$

Сравнение выражений (45) и (33) показывает, что полное сопротивление 1 км эквивалентного рельса можно определять по формуле, выведенной для одиночного рельса (33), заменяя его активное сопротивление вдвое меньшим, а радиус поперечного сечения рельса — эквивалентным, определяемым формулой

$$R_{pэ} = \sqrt{R_p a_{p1,2}}. \quad (46)$$

При этом схема рис. 68 сводится к схеме рис. 65.

Аналогичные формулы имеют место в расчетах линий передачи с расщепленными проводами.

Однопутный участок с цепной подвеской. При определении параметров контактной сети, если применена цепная подвеска с медным несущим тросом (рис. 69), кривую провисания несущего троса, как указано выше, следует заменить горизонтальной линией, а два рельса — одним эквивалентным.

Падение напряжения в контуре контактный провод — эквивалентный рельс на длине в 1 км представляется уравнением

$$\Delta \dot{u}_{кр} = \dot{I}_к z_{кТ} + \dot{I}_Т z_{кТ} - \dot{I}_р z_{кр} + \dot{I}_р z'_{рз} - \dot{I}_к z_{кр} - \dot{I}_Т z_{Тр}. \quad (а)$$

Здесь индекс T означает, что величина относится к несущему тросу. Индексы $кТ$ или $Тр$ указывают соответственно, что величина, снабженная этим индексом, определяется взаимоиндуктивностью между контактным проводом и тросом или между тросом и рельсом.

Так как величины $z_{кр}$ и $z_{Тр}$ очень близки по величине друг к другу, то с достаточной для практики точностью можно принять $z_{Тр} = z_{кр}$. Учтя, кроме того, что $\dot{I}_к + \dot{I}_Т = \dot{I}_0$, получим

$$\Delta \dot{u}_{кр} = \dot{I}_к z_{кТ} + \dot{I}_Т z_{кТ} - \dot{I}_р z_{кр} + \dot{I}_р z'_{рз} - \dot{I}_0 z_{кр}. \quad (б)$$

Падение напряжения в контуре несущий трос — земля можно написать по аналогии, поменяв местами в последнем выражении индексы $к$ и T :

$$\Delta \dot{u}_{Тр} = \dot{I}_Т z_{ТТ} + \dot{I}_к z_{кТ} - \dot{I}_р z_{кр} + \dot{I}_р z'_{рз} - \dot{I}_0 z_{кр}.$$

Так как падения напряжения $\Delta \dot{u}_{кр}$ и $\Delta \dot{u}_{Тр}$ должны быть равны, то должно иметь место равенство

$$\dot{I}_к z_{кТ} + \dot{I}_Т z_{кТ} = \dot{I}_Т z_{ТТ} + \dot{I}_к z_{кТ},$$

откуда

$$\dot{I}_к (z_{кТ} - z_{кТ}) = \dot{I}_Т (z_{ТТ} - z_{кТ}),$$

или

$$\frac{\dot{I}_к}{\dot{I}_Т} = \frac{z_{ТТ} - z_{кТ}}{z_{кТ} - z_{кТ}}.$$

Взяв производную пропорцию

$$\frac{\dot{I}_к}{\dot{I}_к + \dot{I}_Т} = \frac{z_{ТТ} - z_{кТ}}{z_{кТ} + z_{ТТ} - 2z_{кТ}},$$

найдем

$$\dot{I}_к = \dot{I}_0 \frac{z_{ТТ} - z_{кТ}}{z_{кТ} + z_{ТТ} - 2z_{кТ}}. \quad (в)$$

По аналогии

$$\dot{I}_Т = \dot{I}_0 \frac{z_{кТ} - z_{кТ}}{z_{кТ} + z_{ТТ} - 2z_{кТ}}. \quad (г)$$

Подставив значения $\dot{I}_к$ и $\dot{I}_Т$ из уравнений (в) и (г) в уравнение (б) и заменив $\Delta \dot{u}_{кр} = \Delta \dot{u}_0$, получим

$$\Delta \dot{u}_0 = \dot{I}_0 \frac{z_{кТ} z_{ТТ} - z_{кТ}^2}{z_{кТ} + z_{ТТ} - 2z_{кТ}} - \dot{I}_р z_{кр} + \dot{I}_р z'_{рз} - \dot{I}_0 z_{кр}.$$

Из последнего выражения найдем полное сопротивление 1 км контактной сети

$$z_0 = \frac{z_{кТ} z_{ТТ} - z_{кТ}^2}{z_{кТ} + z_{ТТ} - 2z_{кТ}} - z_{кр} + (z'_{рз} - z_{кр}) \frac{\dot{I}_р}{\dot{I}_0}. \quad (47)$$

Сопоставив выражение (47) с выражением (37), мы видим, что цепная подвеска, состоящая из медного троса и провода, может быть заменена

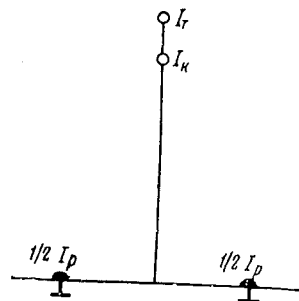


Рис. 69. Схема расположения проводов с медным несущим тросом

одним эквивалентным проводом с сопротивлением $z'_{кэ}$ Ом/км, которое равно

$$z'_{кэ} = \frac{z_k z_T - z_{кТ}^2}{z_k + z_T - 2z_{кТ}} \quad (48)$$

С достаточной для расчетов точностью можно считать, что этот эквивалентный провод расположен посредине между контактным и горизонтальным проводами, заменяющими несущий трос.

Таким образом, задача сводится к расчету простейшей схемы (рис. 65).

В расчетах удобнее пользоваться формулой для определения $z'_{кэ}$, приведенной к несколько иному виду,

$$z'_{кэ} = \frac{(z_k - z_{кТ})(z_T - z_{кТ})}{(z_k - z_{кТ}) + (z_T - z_{кТ})} + z_{кТ} \quad (48')$$

В этом выражении согласно формулам (32) и (35)

$$\left. \begin{aligned} z_k - z_{кТ} &= r_k + j 0,144 \left(0,11 + \lg \frac{a_{кТ}}{R_k} \right); \\ z_T - z_{кТ} &= r_T + j 0,144 \left(0,11 + \lg \frac{a_{кТ}}{R_T} \right); \\ z_{кТ} &= 0,05 - j 0,144 (1,53 + \lg a_{кТ} \sqrt{\sigma}). \end{aligned} \right\} \quad (48'')$$

Здесь $a_{кТ}$ — расстояние между контактным проводом и горизонтальной линией, заменяющей кривую провисания несущего троса, в см.

Двухпутный участок. На двухпутном участке все четыре рельсовые нити соединяются между собой. Провода же контактной сети первого и второго путей в зависимости от принятой схемы питания могут быть соединены параллельно или питаться отдельно. В обоих случаях следовало бы учесть влияние токов в отдельных рельсах на распределение тока между отдельными проводами контактной сети, равно как и влияние токов в этих проводах на распределение токов в рельсах. Такое решение задачи возможно, но оно приводит к весьма сложным выкладкам и формулам [13]. Если же принять некоторые допущения, можно без ощутимой погрешности значительно упростить как расчетные формулы, так и их вывод.

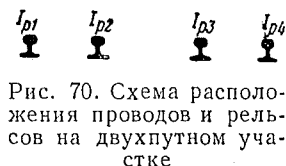


Рис. 70. Схема расположения проводов и рельсов на двухпутном участке

Схема расположения проводов и рельсов на двухпутном участке представлена на рис. 70. В общем случае токи в проводах контактной сети и в каждом рельсе отличаются друг от друга.

В проводах контактной сети отдельных путей при раздельном их питании токи могут быть различны из-за неравномерности нагрузки по путям и различий профиля. Токи отдельных проводов сети одного пути могут быть разными из-за неодинаковой проводимости и различного расположения этих проводов относительно рельсов.

Токи в отдельных рельсах также в общем случае не будут одинаковы вследствие различного влияния на каждый из четырех рельсов проводов контактной сети и остальных рельсов (так как расстояния от каждого рельса до проводов и других рельсов различны). Поэтому на рис. 70 токи во всех проводах и рельсах показаны различными.

Однако можно исходить из равномерного распределения тока по всем четырем рельсам, так как практически это не вносит заметной погрешности. Объясняется это тем, что влияние тока в проводах контактной сети смежного пути, расстояние от которых до внутреннего рельса другого пути меньше, чем до крайнего, приводит к увеличению тока в средних рельсах. Обратный резуль-

тат имеет место из-за влияния тока в рельсах смежного пути на каждый рельс другого, так как токи в рельсах имеют одинаковое направление, а расстояния от рельсов смежного пути меньше для внутреннего рельса, чем для крайнего. Таким образом, эти влияния вызывают лишь небольшую неравномерность распределения тока по отдельным рельсам, так как меньшее расстояние между рельсами по сравнению с расстоянием от рельсов до проводов компенсируется уменьшением тока в рельсах (часть тока ответвляется в землю). Наконец, следует отметить еще одно обстоятельство, способствующее выравниванию распределения тока в рельсах. Здесь имеется в виду зависимость сопротивления рельсов от тока в них. Повышение тока в рельсе вызвало бы увеличение его сопротивления и, следовательно, выравнивание тока по параллельно соединенным рельсам.

Переход к эквивалентному рельсу удобно осуществить в два приема, сперва заменить два рельса каждого пути одним эквивалентным с сопротивлением $z'_{pз}$, а затем найти сопротивление рельса, эквивалентного обоим путям $z''_{pз}$. При этом эквивалентный рельс можно считать расположенным в плоскости расположения четырех рельсов по оси междупутья.

Сопротивление рельса, эквивалентного двум рельсам каждого пути, согласно формуле (44) равно

$$z'_{pз} = \frac{1}{2} (z'_p + z_{p1,2}).$$

Так же может быть найдено сопротивление рельса, эквивалентного четырем рельсам двух путей,

$$z'_{pз} = \frac{1}{2} (z'_{pз} + z_{1,II}), \quad (49)$$

где $z_{1,II}$ — составляющая сопротивления от взаимной индукции эквивалентных рельсов, заменяющих первый и второй пути, в ом/км.

Тогда

$$z''_{pз} = \frac{1}{2} \left(\frac{z'_p + z_{p1,2}}{2} + z_{1,II} \right),$$

или

$$z''_{pз} = \frac{1}{4} (z'_p + z_{p1,2} + 2z_{1,II}). \quad (49')$$

Если подставить сюда значения входящих величин согласно формулам (33) и (35), то получим

$$z''_{pз} = \frac{r_{pa}}{4} + 0,05 - j0,144 \left(1,53 - 5,2 \frac{r_{pa}}{4} + \lg \sqrt[4]{R_p a_{p1,2} a_{1,II}^2 \cdot V \sigma} \right). \quad (50)$$

Следовательно, эквивалентное сопротивление четырех параллельно соединенных рельсов может быть определено по формуле, выведенной для одного рельса (33) при замене активного сопротивления величиной в четыре раза меньшей и радиуса поперечного сечения одного рельса R_p некоторым эквивалентным, определяемым формулой

$$R_{pз} = \sqrt[4]{R_p a_{p1,2} a_{1,II}^2}. \quad (51)$$

Определение сопротивления провода, эквивалентного проводам контактной сети путей, зависит от схемы питания, т. е. от того, соединены ли параллельно провода контактной сети путей или они питаются раздельно.

Рассмотрим случай параллельного соединения их.

Провода контактной сети каждого пути могут иметь из цветного металла или один контактный провод (при стальном тросе), или контактный провод и трос. В последнем случае каждая подвеска при помощи формул (48) или (48') может быть заменена одним эквивалентным проводом. При стальном же тросе из-за его очень малой проводимости, как отмечалось выше, можно считать то-

конесущим лишь один контактный провод. Следовательно, в обоих случаях будут иметь место два параллельно соединенных между собой провода (контактных или эквивалентных).

Полагая сечения проводов обоих путей одинаковыми, можно заменить эти провода одним эквивалентным, расположенным на той же высоте над эквивалентным рельсом. Полное сопротивление 1 км такого провода определяется формулой, аналогичной полученной для эквивалентного рельса (49),

$$z'_{кз} = \frac{1}{2} (z'_{кз} + z_{I, II}). \quad (52)$$

Здесь $z'_{кз}$ — или полное сопротивление одного контактного провода, определяемое по формуле (32), или провода, эквивалентного проводам подвески одного пути, определяемое по формулам (48) или (48'); $z_{I, II}$ — составляющая полного сопротивления от взаимной индукции между контактными или эквивалентными проводами сети двух путей, определяемая согласно формуле (35). Эта величина одинакова для проводов и эквивалентных рельсов двух путей вследствие равенства расстояний между проводами двух путей и эквивалентными рельсами.

Если подставить в выражение (52) значения составляющих для того случая, когда каждый путь имеет только один контактный провод (проводимостью стального троса пренебрегаем), то получим

$$z'_{кз} = \frac{r_k}{2} + 0,05 - j 0,144(1,48 + \lg \sqrt{R_k a_{I, II}} \cdot \sqrt{\sigma}). \quad (52')$$

Рис. 71. Расчетная схема для определения сопротивления контактной сети на двухпутном участке



При наличии проводящего троса подобное выражение было бы при использовании формул (48') и (48'') очень сложным, поэтому лучше производить вычисления каждого члена формулы (52) отдельно.

При раздельном питании проводов контактной сети путей задача замены проводов двух путей одним эквивалентным усложняется.

Пусть ток в проводах первого пути равен I (рис. 71), а второго пути — $I' = \alpha I$, где $\alpha = \frac{I'}{I}$. Тогда падение напряжения в контуре: провода первого пути — рельсы на длине 1 км будет равно

$$\Delta u_1 = I z_{кз1} + I_p z''_{pz} + \alpha I z_{I, II} - I_p z_{kp} - I z_{kp} - \alpha I z_{kp}.$$

Здесь первый член представляет собой падение напряжения в проводах сети первого пути; второй — в рельсах; третий — учитывает влияние тока в проводах второго пути; четвертый — влияние тока в рельсах на падение напряжения в проводах первого пути; пятый — влияние тока в проводах первого пути и шестой — влияние тока в проводах второго пути на падение напряжения в рельсах.

Из этого выражения можно получить значение эквивалентного сопротивления 1 км контактной сети первого пути

$$z_{з1} = z_{кз1} + \alpha z_{I, II} - (1 + \alpha) z_{kp} + (z''_{pz} - z_{kp}) \frac{I_p}{I}. \quad (53)$$

Это уравнение сходно с уравнением (37).

Выше [формула (4'')] было показано, что

$$\frac{\dot{I}_p}{\dot{I}_0} = (1-n) \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} + n.$$

В данном случае

$$\dot{I}_0 = \dot{I} + \alpha \dot{I} = (1 + \alpha) \dot{I}.$$

Следовательно,

$$\frac{\dot{I}_p}{\dot{I}} = (1 + \alpha) \left[(1-n) \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} + n \right].$$

Подставив значения этого отношения в уравнение (53), получим

$$\begin{aligned} z_{\partial 1} = z_{\kappa \partial 1} + \alpha z_{I, II} - (1 + \alpha) z''_{\kappa p} + (z''_{p \partial} - z_{\kappa p}) (1 + \alpha) \times \\ \times \left[(1-n) \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} + n \right]. \end{aligned} \quad (54)$$

По аналогии, заменив $z_{\kappa \partial 1}$ на $z_{\kappa \partial 2}$ и α на $\frac{1}{\alpha}$, можно написать выражение для эквивалентного сопротивления 1 км контактной сети второго пути

$$\begin{aligned} z_{\partial 2} = z_{\kappa \partial 2} + \frac{1}{\alpha} z_{I, II} - \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) z_{\kappa p} + \\ + (z''_{p \partial} - z_{\kappa p}) \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \left[(1-n) \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} + n \right]. \end{aligned} \quad (55)$$

Если предположить подобно тому, как это было сделано для однопутного участка, что нагрузка расположена вблизи от подстанции и переходное сопротивление достаточно велико, то, приняв

$$\lim_{\frac{kl}{2} \rightarrow 0} \frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} = 1,$$

получим вместо уравнений (54) и (55) соответственно

$$z_{\partial 1} = z_{\kappa \partial 1} + \alpha z_{I, II} + (1 + \alpha) (z''_{p \partial} - 2z_{\kappa p}) \quad (56)$$

и

$$z_{\partial 2} = z_{\kappa \partial 2} + \frac{1}{\alpha} z_{I, II} + \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) (z''_{p \partial} - 2z_{\kappa p}). \quad (57)$$

Если же нагрузка значительно удалена от подстанции и переходное сопротивление невелико, то

$$\frac{\operatorname{th} \frac{kl}{2}}{\frac{kl}{2}} \rightarrow 0.$$

Подставив $n = \frac{z_{кр}}{z_{рз}}$, получим вместо уравнений (54) и (55)

$$z_{з1} = z_{кз1} + \alpha z_{I, II} - (1 + \alpha) \frac{z_{кр}^2}{z_{рз}} \quad (58)$$

и

$$z_{з2} = z_{кз2} + \frac{1}{\alpha} z_{I, II} - \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \frac{z_{кр}^2}{z_{рз}}. \quad (59)$$

Как и для однопутного участка, во всех случаях истинные значения $z_{з1}$ и $z_{з2}$ будут лежать в пределах, определяемых формулами (56) и (58), (57) и (59).

Анализ выведенных формул. В качестве основной, т. е. наиболее общей, выше была предложена формула (42).

При выводе данной формулы были приняты некоторые допущения, которые ограничивают пределы пользования ею. Пренебрежение этим обстоятельством может повести к ошибкам. Дело в том, что принятые выше формулы для определения коэффициентов самоиндукции L и взаимной индукции M выведены в предположении участка бесконечно большой длины. При таком условии ток, наведенный в рельсах (в контуре рельсы—земля), принимается постоянным по всей длине.

В действительности, на концах участка должно иметь место некоторое изменение (затухание) наведенного тока, т. е. он должен увеличиваться от концов к середине. Естественно, что влияние затухания при бесконечно большой длине участка сводится к нулю и выражения для L и M становятся точными. Практически при достаточно большом расстоянии от подстанции до нагрузки (примерно 20—30 км) влияние затухания тока на концах участка незначительно и им можно пренебречь, что позволяет пользоваться указанными формулами для L и M .

Однако по мере уменьшения этого расстояния должны изменяться и величины L и M . Действительно, при малом расстоянии от подстанции до нагрузки влияние затухания станет столь значительным, что наведенный ток практически даже в середине не достигнет того значения, которое он получает при $l = \infty$. С дальнейшим уменьшением l весь ток в рельсах должен стремиться стать равным (по величине и фазе) току в проводах контактной сети. В таком случае примененные выражения для коэффициентов L и M уже не соответствуют условиям задачи и должны быть заменены выражениями для этих коэффициентов, выведенными для двухпроводной линии, изолированной от земли. В противном случае на ток в рельсах, который почти равен всему рабочему току, из-за неточности расчета будет наложен ток, вызванный в контуре рельсы—земля. Иначе говоря, ток в рельсах получится больше, чем ток в контактном проводе, а это даст расчетное значение падения напряжения в рельсах больше действительного, так как мы полное сопротивление рельсового пути находим как частное от деления этого падения напряжения на ток в контактном проводе, то в результате (при малых l) это сопротивление получится больше действительного.

Необходимо отметить, что для крайнего случая, т. е. когда $l=0$, этой ошибки не получится, так как составляющие, зависящие от проводимости земли, взаимно уничтожаются.

Действительно, как было показано, если перейти от общего случая [т. е. от формулы (42)] к тем, когда $l = \infty$ и $l = 0$, то полное сопротивление контактной сети лежит в пределах от

$$z_0 = z_k - \frac{z_{кр}^2}{z_p}$$

до

$$z_0 = z_k + z_p - 2z_{кр}.$$

Очевидно, первое выражение относится к случаю, когда тяговая составляющая тока в рельсах равна нулю (т. е. при $z_n = 0$), и второе — когда весь тяговый ток идет по рельсу (т. е. при $z_n = \infty$).

Исходя из изложенного, нетрудно прийти к выводу, что мы можем достаточно точно установить пределы, в которых изменяется значение z_0 , по формулам (42') и (42'').

Для наиболее типичных случаев дадим численные значения величины z_0 .

Однопутный участок

1) Цепная подвеска состоит из медного контактного провода $s_k = 100 \text{ мм}^2$ и биметаллического несущего троса с содержанием меди примерно $s_m = 40 \text{ мм}^2$. Рельсы типа Р50, $\sigma = 10^{-14} \text{ CGSM}$.

По формулам (42') и (42'') получим пределы изменения сопротивления контактной сети в зависимости от протекающего тока (табл. 7).

Таблица 7

l а	При $z_n = 0$ ом	При $z_n = \infty$ ом
0	$0,188 + j \cdot 0,455$	$0,235 + j \cdot 0,551$
100	$0,190 + j \cdot 0,457$	$0,240 + j \cdot 0,555$
200	$0,198 + j \cdot 0,466$	$0,270 + j \cdot 0,577$
300	$0,204 + j \cdot 0,474$	$0,295 + j \cdot 0,595$

2) Подвеска $s_k = 100$ мм²; $s'_m = 0$ (трос стальной); $s''_m = 95$ мм² и $s'''_m = 120$ мм² (табл. 8).

Таблица 8

s_k мм ²	s_m мм ²	l а	При $z_n = 0$ ом	При $z_n = \infty$ ом
100	0	100	$0,228 + j \cdot 0,610$	$0,278 + j \cdot 0,702$
		300	$0,234 + j \cdot 0,627$	$0,333 + j \cdot 0,748$
100	95	100	$0,137 + j \cdot 0,442$	$0,187 + j \cdot 0,534$
		300	$0,142 + j \cdot 0,459$	$0,242 + j \cdot 0,570$
100	120	100	$0,126 + j \cdot 0,440$	$0,176 + j \cdot 0,531$
		300	$0,132 + j \cdot 0,457$	$0,231 + j \cdot 0,578$

Двухпутный участок

$s_k = 100$ мм²; $s_m = 40$ мм²; остальные данные те же (табл. 9).

Таблица 9

l а	При $z_n = 0$ ом	При $z_n = \infty$ ом
100	$0,102 + j \cdot 0,276$	$0,120 + j \cdot 0,314$
300	$0,114 + j \cdot 0,288$	$0,148 + j \cdot 0,334$

РЕЖИМЫ РАБОТЫ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА И ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

§ 16. НАЗНАЧЕНИЕ РАСЧЕТОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Основное назначение всех расчетов системы энергоснабжения сводится к установлению таких параметров этой системы, которые обеспечили бы надежные и экономичные условия работы электрической железной дороги. Бесперебойная эксплуатация данной железной дороги должна быть обеспечена при всех возможных режимах движения.

Выше уже приходилось говорить о том, что электрическая железная дорога как потребитель электрической энергии в нормальных условиях характеризуется как резкими и частыми колебаниями потребляемой от энергосистемы мощности, так и длительными ее отклонениями от среднего значения. При проектировании системы энергоснабжения необходимо учитывать эту особенность. Кроме того, при выборе мощности элементов системы энергоснабжения следует принимать во внимание и значительно более тяжелые режимы работы по сравнению с нормальными условиями. Такие режимы могут возникнуть в результате аварийных повреждений в системе энергоснабжения или в других устройствах сложного железнодорожного хозяйства.

Проектировщику необходимо уметь предвидеть такие режимы работы и соответственно подбирать необходимую мощность системы энергоснабжения. В противном случае недостаточная мощность системы энергоснабжения сама может явиться причиной дальнейшего нарушения нормального режима работы или, во всяком случае, надолго затян timer возвращение к этому нормальному режиму.

Конечно, без особых исследований легко наметить столь высокую мощность устройств энергоснабжения, что она окажется достаточной для всех возможных режимов работы на данной линии.

При этом совершенно очевидно, что сколь угодно большое увеличение мощности системы энергоснабжения не может ухудшить условия работы электрифицированной линии при нормальных режимах, но поведет к дополнительным расходам. Отсюда ясно, что верхний предел расчетной мощности всех элементов системы энергоснабжения может быть ограничен только экономическими соображениями.

Требования, предъявляемые ко всякому сооружению и, в частности, к системе энергоснабжения электрических железных дорог, принято разделять на технические и экономические.

Под техническими понимают требования, выполнение которых обеспечивает надежную длительную работу в самых разнообразных условиях, могущих возникнуть в эксплуатации; под экономическими понимают такие требования, удовлетворение которых обеспечивает наибольший экономический эффект от всех производимых капитальных затрат с точки зрения народного хозяйства. Подробно на этом вопросе мы остановимся ниже, здесь же отметим, что не всегда легко провести резкую границу между теми и другими требованиями.

Действительно, недостаток мощности тяговой подстанции может привести к ее отключению в период максимального (в свое время не предусмотренного) сгущения поездов. Это вызовет задержку в движении и может повести к боль-

шим неоправданным затратам. Так что, казалось бы, этот пример может быть отнесен к категории, охватываемой экономическими требованиями. Но, с другой стороны, трудно предсказать, как часто могут возникать те или иные отклонения от нормальной работы, а следовательно, трудно учесть и материальный ущерб, к которому они могут привести. В таких случаях принимают решения без каких-либо экономических расчетов, просто на основе имеющегося опыта, и относят их к техническим требованиям. К техническим же относятся все требования, связанные с обеспечением безопасности движения, работы персонала, обеспечением необходимых размеров движения в особых, например, аварийных или послеаварийных условиях и т. п.

При проектировании системы энергоснабжения расчет можно вести в каком угодно порядке, т. е. можно сперва определить экономически целесообразные параметры (или пределы, в которых эти параметры примерно равноценны) и затем проверить соответствие их техническим требованиям с тем, чтобы при необходимости соответственно изменить эти параметры. Можно сделать наоборот — сперва выбрать рассчитываемый параметр по одному из технических требований, а затем проверить его соответствие другим техническим, а также и экономическим требованиям.

Вопросы обеспечения нормальной работы электрифицированной линии тесно связаны с качеством электрической энергии. В сетях переменного тока качество энергии определяется степенью отклонения частоты и напряжения от номинальных значений, а также наличием в кривой напряжения высших гармонических составляющих. При постоянном токе практически качество электрической энергии определяется лишь режимом напряжения.

Выше уже отмечалось, что в сетях с переменной нагрузкой и потребителями, расположенными в различных точках сети, а тем более перемежающимися (как на железной дороге) вследствие потерь напряжения во всех элементах системы, невозможно иметь постоянное и равное для всех потребителей напряжение и поэтому каждый потребитель неизбежно будет работать при напряжении, изменяющемся в некоторых пределах. Влияние колебаний и отклонений напряжения на работу электроподвижного состава и участка в целом также было рассмотрено (см. главу II). Известно, что чем больше мощность системы энергоснабжения, тем меньше, при прочих равных условиях, колебания или отклонения напряжения у потребителя и, следовательно, тем лучше условия его работы.

Однако увеличение мощности элементов системы энергоснабжения неизбежно потребует увеличения денежных и материальных затрат. Поэтому необходимо уметь по техническим соображениям определять максимально допустимые пределы колебаний и отклонений напряжения и, как следствие, минимально необходимую (по этим же соображениям) мощность элементов системы энергоснабжения.

Максимально допустимые пределы отклонений и колебаний напряжения в ряде случаев (для различных сооружений) регламентируются соответствующими техническими условиями.

Для всех потребителей электрической энергии эти пределы даются в ПУЭ [1], а для системы электрических железных дорог — в специальных Технических условиях на проектирование электрических железных дорог — в настоящее время ТУПЭ—57.

Однако очень часто по экономическим соображениям может оказаться целесообразным выбор элементов системы энергоснабжения большей мощности, чем это необходимо по техническим требованиям. Таким образом, только сопоставление технических и экономических соображений позволяет окончательно выбрать необходимые параметры системы энергоснабжения, а тем самым определить и качество энергии.

В любой электрической установке вследствие ряда причин возможен временный перерыв снабжения потребителя электрической энергией. Такой перерыв происходит, например, при отключении питающих устройств, когда требуемая мощность превосходит допустимое значение для соответствующего звена

системы энергоснабжения. На этот случай и предусмотрены различные защитные устройства, отключающие систему энергоснабжения, если нагрузка становится опасной для ее элементов. Такие отключения могут произойти вследствие резкого увеличения нагрузки при скоплении поездов наиболее тяжелого типа, к тому же одновременно потребляющих большие токи, если такое положение при расчетах не было предусмотрено. Отключения могут возникнуть и при повреждениях в элементах системы, которые приводят к коротким замыканиям.

Для нормальной эксплуатации линии необходимо, чтобы отключения с перерывом питания электроподвижного состава происходили возможно реже и были по времени как можно менее длительны. К этому, собственно, и сводятся требования об обеспечении со стороны системы энергоснабжения бесперебойности работы электрифицируемой линии.

В большой степени надежность работы системы энергоснабжения и ее экономичность зависят от правильно выбранного резерва. Всякий элемент устройства системы энергоснабжения должен время от времени осматриваться, проверяться и ремонтироваться, для чего на это время с него должно быть снято напряжение. Естественно, что в этот период мощность системы должна оставаться достаточной для обеспечения нормальной работы линии железной дороги. Если нарушится нормальная работа отдельных элементов устройств и они будут отключены, то и в этом случае мощность оставшихся в действии устройств должна быть достаточной для нормальной работы линии. Для замены выбывших из работы и отключенных элементов предусматриваются соответствующие резервные устройства, при этом чем больше резерв, тем надежнее работа, но и тем дороже все устройство. Выбор способов резервирования и определение величины резервных мощностей зависят от применяемых устройств и рассматриваются в соответствующих разделах этой книги и других специальных курсах.

Не останавливаясь подробно на вопросах экономичности (ниже этому будет отведено достаточно места) отметим, что по существу эти вопросы сводятся к оценке эффективности капиталовложений (в денежном и натуральном выражении). При этом надо подчеркнуть, что для получения высокой степени этой эффективности, во-первых, все затраты должны соответствовать действительным потребностям данной линии железной дороги с учетом ее специфических особенностей, а не производиться с запасом из-за неучета ее особенностей; во-вторых, это необходимо, чтобы все элементы системы энергоснабжения, представляющие собой последовательно соединенные звенья одной цепи, были «равнопрочны», т. е. имели бы по возможности одинаковую мощность, одинаковый резерв и т. п. В противном случае избыток мощности в одном элементе не может быть использован, если другие элементы этому будут препятствовать.

Особое значение для бесперебойной работы железных дорог имеет правильная оценка возможных отклонений от нормального режима работы данной линии и выбор мощности элементов системы энергоснабжения таким образом, чтобы и при этих отклонениях обеспечивалось питание поездов электрической энергией.

Следует рассматривать два случая возможного отклонения от нормальной работы электрифицированной линии.

К первому можно отнести такое положение, когда в процессе нормальной ритмичной работы данной линии выходит из работы такой из элементов системы энергоснабжения, который оказывает влияние на работу данной линии. В этих случаях могут измениться условия работы данной линии, а следовательно, и системы энергоснабжения.

Ко второму, наиболее общему, можно отнести положение, возникающее после достаточно длительного нарушения работы данной линии, вызванного или повреждением устройств энергоснабжения, или какими-либо другими причинами, возможными в сложном железнодорожном хозяйстве. В результате такого длительного нарушения работы на ближайших станциях и даже перегонах может скопиться большое число поездов.

После устранения повреждения, послужившего причиной скопления поездов, уже при нормальной схеме работы системы энергоснабжения по линии будет пропускаться максимально возможное число поездов для того, чтобы как можно скорее перейти к работе линии по нормальному графику движения. Если вспомнить, что за все время этого периода продолжают подходить со смежных линий или участков все новые поезда, то легко представить себе сложность таких режимов работы и необходимость обеспечения их энергией со стороны системы энергоснабжения.

В том и другом случае, т. е. при работе со схемой энергоснабжения, отличной от нормальной; и при работе с нормальной схемой энергоснабжения вопрос по существу сводится к установлению того максимума числа поездов, которое в этих условиях может быть пропущено по данной линии, т. е. по существу к определению пропускной способности линии по условиям работы системы энергоснабжения данного участка.

Пропускной способностью участка железнодорожной линии называется наибольшее число поездов или пар поездов установленного веса, которое может быть пропущено по данному участку в течение суток при заданных технической вооруженности, типе тяги и подвижного состава и принятой организации движения [14]. Пропускная способность может быть также выражена числом вагонов или тонн груза.

Различают несколько понятий пропускной способности: потребной, т. е. необходимой для выполнения запланированных перевозок и обеспечения установленного резерва, и наличной, которая может быть реализована при наличных технических средствах. Расчет пропускной способности обычно производят по отдельным тяговым участкам. При этом фактическая — результативная пропускная способность участка определяется по наименьшей пропускной способности отдельных устройств (станций, перегонов, депокских и экипировочных устройств и системы энергоснабжения). Обычно пропускная способность участка представляется в виде сводных диаграмм (рис. 72).

Надо подчеркнуть, что хотя такие особые режимы (возникшие, как указывалось выше, в результате отклонения от нормального режима) являются для системы энергоснабжения значительно более тяжелыми, чем нормальные, но с точки зрения эксплуатационных экономических показателей они не играют существенной роли, так как возникают редко и работа в основном идет при нормальном графике движения.

При таких редких режимах можно, например, допускать значительно большие потери энергии, в ряде случаев более высокие температуры обмоток трансформаторов, относительно пониженный уровень напряжения (обеспечивающий необходимую пропускную способность, но не обеспечивающий высоких скоростей, необходимых для экономически эффективной эксплуатации). При нормальных же условиях работы такие положения не могут быть допущены, так как это отразится на экономической эффективности данной линии.

Отсюда ясно, что при проектировании системы энергоснабжения для экономичной и надежной работы ее необходимо уметь производить расчеты не только для нормальных, но и для особых режимов.

Итак, параметры системы энергоснабжения должны быть выбраны так, чтобы:

1. При нормальной схеме питания имелась необходимая мощность для обеспечения всех возможных режимов движения на рассматриваемой линии при полном соответствии мощности отдельных элементов друг другу.

2. Обеспечивалось качество энергии, необходимое для нормальной работы электрифицированной линии.

3. Имелся достаточный резерв, позволяющий при выходе отдельных эле-

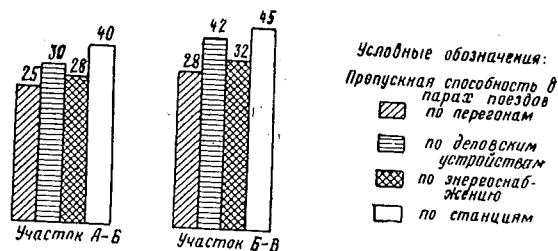


Рис. 72. Диаграмма пропускной способности участка

ментов устройств системы энергоснабжения обеспечивать работу по нормальному графику движения, а при нормальной схеме энергоснабжения обеспечивать возможные, наиболее напряженные режимы движения, вызванные нарушением работы отдельных устройств железной дороги или другими причинами.

4. При выполнении всех перечисленных требований обеспечивалась наибольшая эффективность капитальных вложений в денежном и материальном выражении.

§ 17. РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Отличительной особенностью производства электрической энергии является необходимость в каждый момент времени отпускать из энергоснабжающей системы такое количество продукции (электроэнергии), какое нужно потребителям. Это принуждает энергоснабжающие организации не только непрерывно следить за изменением спроса на электрическую энергию, но и своевременно его предугадывать.

Мощность, потребляемая отдельными потребителями энергии (это особенно относится к электрическим железным дорогам), распределяется по времени неравномерно. В отдельные периоды времени потребная мощность значительно превышает среднее ее значение за весь период работы. Поэтому, зная общее количество энергии, требуемое потребителем, еще нельзя определить необходимой мощности устройств системы энергоснабжения как в энергосистеме, так и у самого потребителя.

Правильные предположения о распределении потребной мощности по времени позволяют наиболее рационально проектировать системы энергоснабжения и вести их эксплуатацию.

Так, в условиях эксплуатации эти данные дадут возможность при приближении периода большой нагрузки своевременно подготовить к пуску соответствующие агрегаты, а в ожидании уменьшения нагрузки — часть из них подготовить к остановке.

Все эти соображения относятся не только к энергосистемам, питающим электрические железные дороги, но и к тяговым подстанциям.

Длительная практика эксплуатации энергосистем позволила установить методы оценки режимов потребления энергии различными потребителями.

Так как энергосистемы совместно с электрическими железными дорогами питают и других потребителей, которые в большинстве случаев расходуют значительно большую долю энергии, то полезно ознакомиться с показателями, которыми оценивают их нагрузку, приходящуюся на энергосистему, и использовать эти показатели для оценки электрической железной дороги как потребителя энергии.

Наиболее удобной формой сведений о потребности в энергии являются графики нагрузок потребителей в зависимости от времени. По роду нагрузки различают графики активных и реактивных нагрузок, а по продолжительности времени, в течение которого регистрируется нагрузка, — суточные, месячные и годовые. По месту регистрации нагрузок в энергетической системе графики могут быть потребительские и станционные, графики нагрузок отдельных частей энергетической системы (сетевые) и всей энергетической системы в целом.

Графики нагрузки тяговых подстанций электрифицированных железных дорог имеют специфический характер, заключающийся в резких и частых изменениях нагрузок при относительно устойчивой величине среднесуточных значений их (при неизменных суточных размерах движения).

Изменение интенсивности движения по часам суток приводит к неравномерности потребления энергии в течение суток. Сезонные перевозки, метеорологические условия, отопление поездов в зимнее время и т. п. меняют потребление энергии по временам года. Для установления возможности питания электрической дороги и ряда других потребителей от одной и той же энергетической системы необходимо располагать как графиками нагрузки за часы интен-

сивного движения, так и суточными и годовыми или другими данными, их заменяющими.

Как уже было отмечено, графики нагрузок широко используются как при эксплуатации, так и при проектировании новых систем или расширении существующих. На основании графиков устанавливается необходимое количество энергии за сутки и за год, определяется необходимое количество топлива на тепловых станциях и расход воды на гидростанциях. В энергосистемах, пользуясь графиками, устанавливают необходимое число машин и трансформаторов на электрических станциях и подстанциях или намечают необходимое увеличение мощности, а также режим работы машин и трансформаторов, который обеспечит наименьшую стоимость энергии.

Графики нагрузок, кроме того, дают пределы, до которых повышается или понижается нагрузка, что позволяет определить отклонения напряжения, а следовательно, и уровень напряжения, при котором будет работать тот или иной потребитель.

Руководствуясь этими данными, можно решить вопрос о целесообразности тех или иных средств регулирования напряжения, а также о пределах регулирования, которые должны быть обеспечены этими средствами.

Не касаясь пока графиков нагрузки, создаваемых электрическими дорогами, можно отметить, что обычно потребительские графики нагрузки имеют специфический характер для каждого рода потребителя (освещение, заводы, работающие с тем или другим количеством смен, шахты и т. п.). В то же время графики нагрузки всякого потребителя, взятые за разные сутки, в общем случае отличаются друг от друга. Такие отличия вызываются целым рядом различных причин.

Для того чтобы отделить закономерное изменение нагрузки у данного потребителя от случайных, обычно при исследовании накладывают один график нагрузки на другой, суммируя их ординаты за ряд суток и деля на число этих суток. При этом случайные изменения, вошедшие в графики, компенсируют друг друга и с увеличением числа графиков теряют свое значение. Закономерные же изменения, наоборот, выявляются все с большей четкостью и график получает определенный устойчивый характер. Этот устойчивый характер графиков позволяет предусмотреть спрос на энергию со стороны данного потребителя.

В результате сложения ряда таких потребительских графиков получают графики нагрузки подстанций, линий передачи, электрических станций и энергосистем, также имеющие достаточно устойчивый характер. В качестве примера на рис. 73 приведен типичный график активной и реактивной нагрузок электростанции или энергосистемы.

Устойчивый характер таких графиков позволяет вывести ряд показателей (коэффициентов), характеризующих потребителя; ниже приводятся основные из них.

Коэффициент нагрузки, или коэффициент заполнения графика. Этот коэффициент относят как к суткам, так и к году; он представляет собой отношение средней нагрузки к максимальной за рассматриваемый промежуток времени

$$\alpha = \frac{P_{cp}}{P_{max}} \quad (60)$$

Значение рассматриваемого коэффициента становится более ясным, если правую часть приведенного выражения умножить и разделить на число часов данного отрезка времени (24 для суток и 8760 для года)

$$\alpha = \frac{P_{cp} t}{P_{max} t}$$

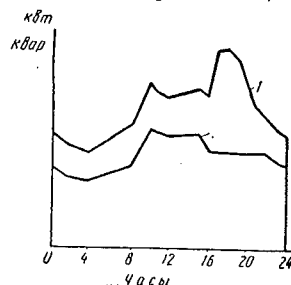


Рис. 73. Суточный график активной и реактивной нагрузок электростанции или энергосистемы:

1 — активная нагрузка;
2 — реактивная нагрузка

В таком виде числитель будет представлять собой действительное количество выработанной или переработанной энергии, а знаменатель — возможное ее количество, если бы станция или подстанция все время работала с максимальной нагрузкой.

Таким образом, коэффициент нагрузки характеризует заполнение графика, показывая в среднем, насколько велики и продолжительны спады нагрузки против максимальной.

При установлении коэффициента под максимальной нагрузкой обычно понимают не отдельные пики, а среднюю за отрезок времени не менее получаса.

Иногда взамен рассматриваемого коэффициента берут обратную величину

$$\kappa_{\max} = \frac{1}{\alpha}. \quad (61)$$

Зная этот коэффициент и среднюю мощность потребителя, можно легко установить величину максимальной потребной мощности.

Коэффициент попадания в максимум. Для того чтобы понять назначение этого коэффициента, необходимо обратить внимание на то, что при определении мощности машин и трансформаторов, устанавливаемых на электростанциях, недостаточно иметь сведения о величине средней и даже максимальной мощности потребителей. Максимальная мощность, которая может быть израсходована группой потребителей, как правило, не равна сумме максимальных нагрузок отдельных потребителей, так как обычно время потребления максимальной нагрузки у различных потребителей не совпадает.

Если какая-либо электрическая станция или энергетическая система питает ряд потребителей и имеет определенные часы максимума, то при присоединении нового потребителя важно знать, какую мощность он потребует в часы максимума нагрузки станции, так как именно эта нагрузка может определить необходимость увеличения мощности станции.

Коэффициент β , показывающий, какую часть своей установленной мощности требует от станции или системы данный потребитель в часы ее максимальной нагрузки, называется коэффициентом попадания в максимум.

Если установленная мощность (суммарная мощность всех агрегатов, включая резервные, питающихся от данной энергосистемы) ряда подстанций $P_{уст}$, а мощность, требуемая ими в период максимума системы, P_1 , то

$$\beta = \frac{P_1}{P_{уст}}; \quad (62)$$

этот коэффициент для различных потребителей различен.

Коэффициент использования установленной мощности. Коэффициентом использования установленной мощности станции (или подстанции) называется отношение ее средней нагрузки к установленной мощности. Этот коэффициент характеризует степень использования агрегатов станции или подстанции

$$\gamma = \frac{P_{cp}}{P_{уст}}. \quad (63)$$

Коэффициент использования установленной мощности косвенным образом отражает и характер заполнения графика, так как чем меньше коэффициент α , т. е. чем неравномернее график нагрузки, тем меньше будет коэффициент γ .

Продолжительность использования суточного или годового максимума нагрузки. Эта величина представляет собой отношение переработанной за сутки или за год энергии к максимальной нагрузке подстанции (или станции) за данный период времени в часах

$$T_{\max} = \frac{A}{P_{\max}}. \quad (64)$$

Под P_{\max} и здесь удобно понимать ту же величину, что и при определении коэффициента нагрузки.

Рассматриваемая величина показывает, какое число часов должна была бы проработать электрическая станция или подстанция с максимальной нагрузкой, чтобы переработать количество энергии, равное переработанному в действительности. Эта величина, как и коэффициент нагрузки, характеризует качество графика нагрузки, точнее говоря, его заполнение. Умножив левую и правую части коэффициента нагрузки на число часов t , соответствующее рассматриваемому промежутку времени, получим

$$\alpha t = \frac{P_{cp} t}{P_{max}},$$

откуда

$$T_{max} = \alpha t,$$

т. е. продолжительность использования суточного или годового максимума нагрузки равна произведению коэффициента нагрузки на число часов за данный период времени.

Обычно этот показатель относят к году, и тогда

$$T_{max} = 8760 \alpha,$$

или

$$T_{max} = \frac{8760}{\kappa_{max}}.$$

Таким образом, чем ближе T_{max} к числу 8760 (к числу часов в году), тем спокойнее, т. е. равномернее график нагрузки. Следовательно, увеличение числа часов (продолжительности) максимума нагрузки надо рассматривать как явление положительное. Для оценки характера нагрузки этот показатель при проектировании и эксплуатации энергосистем получил широкое распространение.

В главе II указывалось, что при расчетах системы энергоснабжения возникает необходимость в определении возможных отклонений напряжения (как понижения, так и повышения его). Это необходимо для выявления условий работы электроподвижного состава, для выбора диапазона и средств регулирования напряжения, применяемых в питающей энергосистеме и на тяговых подстанциях, а при системах переменного тока и на подвижном составе.

Понижение напряжения обычно вызывается ростом нагрузки, а повышение — уменьшением ее. Для характеристики возможных снижений нагрузки (с целью определения соответствующего повышения напряжения) введем понятие коэффициента минимума нагрузки κ_{min} .

Последний определяется отношением минимальной (в среднем за наименее нагруженные полчаса) нагрузки к средней, т. е.

$$\kappa_{min} = \frac{P_{min}}{P_{cp}}. \quad (65)$$

В практике часто для характеристики графика нагрузки вводят отношение максимальной и минимальной нагрузок

$$\kappa_0 = \frac{P_{max}}{P_{min}}. \quad (66)$$

Очевидно, что

$$\kappa_0 = \frac{\kappa_{max}}{\kappa_{min}}.$$

Коэффициент резерва. Резервная мощность на электрической станции (или подстанции) может характеризоваться коэффициентом резерва, представляющим отношение рабочей мощности к установленной, т. е.

$$\delta = \frac{P_{раб}}{P_{уст}}. \quad (67)$$

Под рабочей мощностью понимается суммарная мощность всех агрегатов станции или подстанции без учета резервных, т. е.

$$P_{раб} = P_{уст} - P_{рез}.$$

Часто взамен коэффициента δ пользуются обратной величиной

$$K_{рез} = \frac{1}{\delta}. \quad (68)$$

Все изложенное выше об устойчивом характере графиков нагрузки различных потребителей не может быть полностью отнесено к графикам нагрузки различных элементов системы энергоснабжения, создаваемых электрическими железными дорогами. Этот вопрос представляет исключительную важность как для оценки нагрузки, приходящейся на энергосистему, так и для определения мощности тяговых подстанций и сечения проводов контактной сети. Поэтому его следует осветить более подробно.

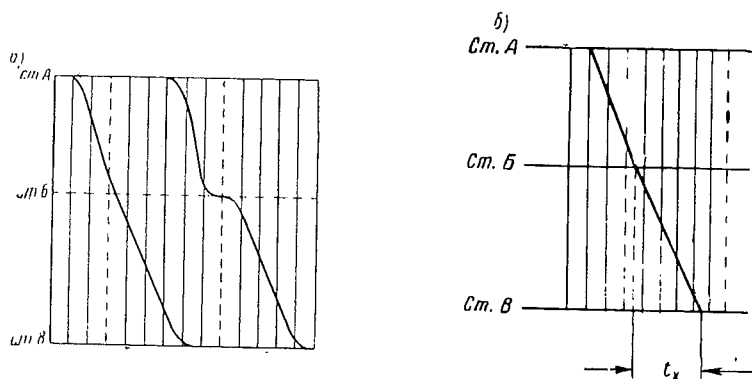


Рис. 74. Графическое изображение движения поезда:
а — точное; б — условное

Мощность, которая требуется электрифицированным участком от энергосистемы, зависит от числа поездов, их категорий и расположения на данном участке в рассматриваемый момент времени, т. е. от графиков движения. С этой точки зрения необходимо различать магистральные дороги, где на электрическую тягу переведено только пригородное движение, метрополитены и магистральные дороги с грузовым и пассажирским движением. К последним могут быть отнесены и участки со смешанным движением, т. е. пригородным и грузовым.

График движения поездов, как известно, представляет собой зависимость пути, пройденного поездом, который откладывается на оси ординат, от времени, которое откладывается на оси абсцисс. Наносят такие графики движения на заранее подготовленную сетку, состоящую из горизонтальных и вертикальных линий. Горизонтальные линии соответствуют осям станций, разъездов, блок-постов и обгонных пунктов. Вертикальные линии делят ось абсцисс на часы и десятиминутные интервалы. На оси ординат указываются названия отдельных пунктов, данные о числе путей на перегонах и станциях, применяемые средства сношения при движении поездов, времена хода и другие данные.

Точное графическое изображение движения поезда по участку должно отражать изменения времени хода при различных режимах движения (разгон, установившаяся скорость, выбег, торможение). В этом случае график получает вид рис. 74, а.

При расчетах системы энергоснабжения такими точными графиками пользуются для метрополитенов и иногда для пригородного движения. Для магистральных дорог график движения поезда обычно изображается прямой линией (рис. 74, б).

Основной особенностью пригородного движения является закономерная неравномерность движения по часам суток. Это объясняется тем, что большую часть пассажиров составляют проживающие в пригородах, приезжающие утром в определенные часы в город на работу, а в другие, тоже определенные часы, возвращающиеся из города обратно. На рис. 75 показано типичное распреде-

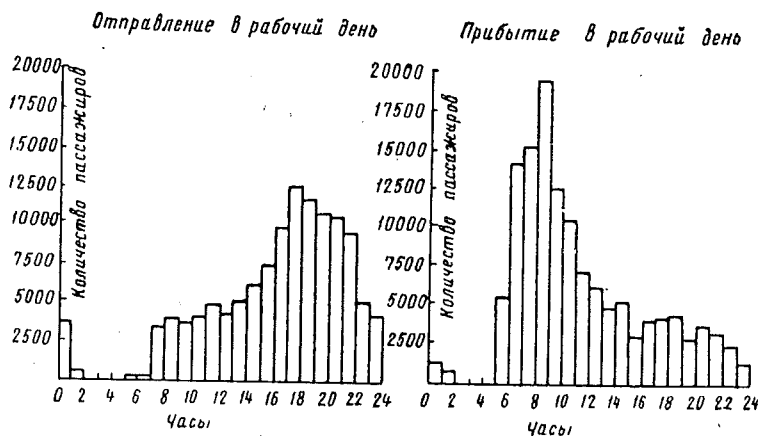


Рис. 75. Диаграмма отправления и прибытия пригородных пассажиров на один из московских вокзалов

ление пригородных пассажиров по часам суток. Этот же характер движения и по тем же причинам имеет место и на метрополитене. Второй весьма существенной и также закономерной особенностью является быстрое уменьшение пассажиропотока по мере удаления от города (рис. 76).

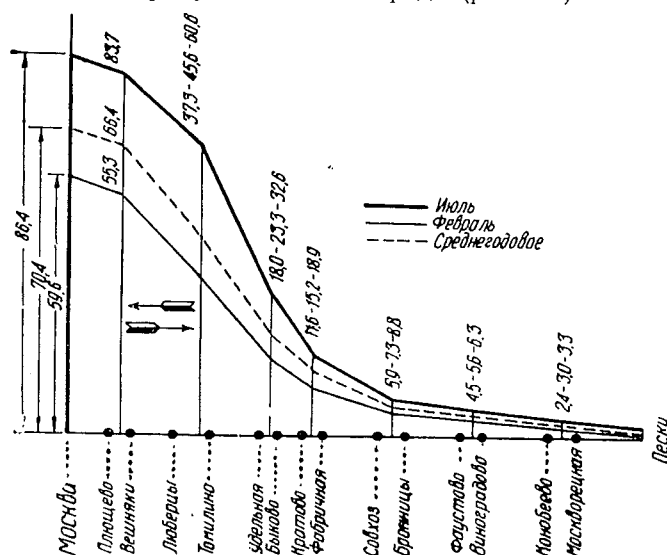


Рис. 76. Диаграмма пригородных пассажиропотоков на Московско-Рязанской ж. д. (в тысячах пассажиров в сутки)

Соответственно такой устойчивой закономерности распределения пассажиропотоков по часам суток составляется график движения или расписание пригородных поездов и поездов метрополитенов. Как следствие, и нагрузки тяговых подстанций получают устойчивый характер с закономерным распределением по часам суток. На рис. 77, а показаны нагрузки отдельных тяговых подстанций и нагрузка энергосистемы, полученная как сумма этих нагрузок. Легко видеть, что как для отдельных тяговых подстанций, так и для энергосистемы графики сохраняют примерно одинаковый характер.

Иначе обстоит дело с построением графиков движения на магистральных железных дорогах с грузовым движением. Для правильной и четкой работы железнодорожных линий необходима строгая согласованность работы главных и примыкающих линий, железнодорожных станций, где происходит формирование поездов, депо, обеспечивающих эти поезда локомотивами, и т. п. При этом для установленных весов поездов и скоростей их движения по перегонам назначается время стоянок на станциях и время для обработки поездов.

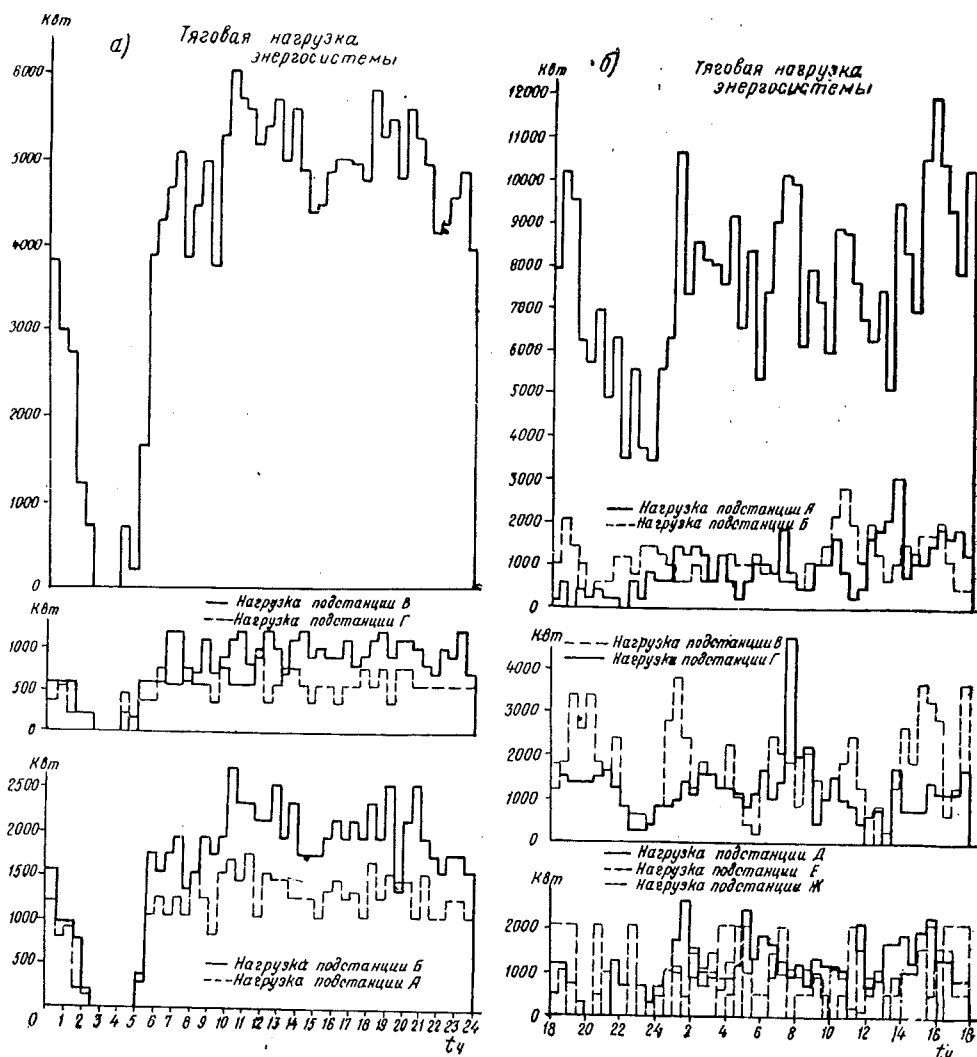


Рис. 77. Графики среднеполучасовой нагрузки отдельных тяговых подстанций и всего участка (энергосистемы):

а—для участка железной дороги с чисто пригородным движением; б—для участка магистральной железной дороги с грузовым и пассажирским движением

Такое согласование всех видов работ по месту и времени достигается путем составления графиков движения поездов, которые составляются ежегодно в соответствии с намеченным планом работы дорог и вводятся обычно в мае. В ряде случаев эти графики в связи с изменившимися условиями работы корректируются на зимний период. Нагрузка данной железнодорожной линии обычно достигает максимума в определенный период года, чаще всего это происходит в третьем квартале. В соответствии с этими размерами движения и строится график движения, при этом предусматривается некоторый резерв

на случай увеличения перевозок при перевыполнении плана. Если в течение рассматриваемого времени размеры движения могут изменяться в значительных пределах, то составляют варианты графиков на различные размеры движения.

Как уже отмечалось, график движения представляет собой ряд линий, называемых «нитками» графика. По этим ниткам должны пропускаться поезда. Часть поездов, составляемых из устойчивых грузопотоков, занимает постоянно определенные нитки на графике движения, остальные же нитки занимают в соответствии с планом работы на ближайший период. При этом число новых факторов, которые не могли быть учтены при составлении годового графика, определяющих наивыгоднейшее расположение поездов, как правило, весьма велико. В это число входит состояние погрузки вагонов клиентом, зависящее, например, от перевыполнения плана отдельными предприятиями, возможность закончить формирование отдельных поездов и отправить их в данные сутки по ниткам более ранним, чем в предыдущие, ликвидация опозданий, наличие свободных транспортных средств и т. п.

Большинство из этих факторов невозможно учесть даже за несколько дней или недель, т. е. во всяком случае они не могут быть учтены при составлении годового графика движения. Тем более невозможно все это учесть при проектировании, т. е. за несколько лет до введения участка в действие. Необходимо отметить, что план, являясь руководством к действию, не освобождает работников эксплуатации от учета многообразия возникающих конкретных условий в данный период времени. Для учета этих условий на основе заданного плана грузовой и поездной работы составляются оперативные планы. Такие планы составляются на декаду, сутки и смену. Кроме того, на расположение поездов в графике движения оказывает влияние диспетчерское регулирование, основной задачей которого является ликвидация отклонений от графика, возможные в условиях нормальной эксплуатации. Для этой цели диспетчер прибегает к ускорению хода поездов по перегонам, сокращению времени стоянок, изменению пунктов скрещения и обгона и стоянок для технических операций и т. п.

На электрифицированных участках поездной диспетчер в тесном взаимодействии с энергодиспетчером организует движение поездов с учетом возможностей системы энергоснабжения. Для этой цели стремятся чередовать тяжеловесные поезда, особенно с кратной тягой, с более легкими поездами; при пропуске же тяжеловесных поездов вслед — соблюдать установленный минимальный интервал и т. п. В результате всего изложенного становится ясным, что невозможно задолго, например при проектировании электрификации, предсказать точное расположение поездов в графиках движения, тем более с учетом их типа.

Этими же соображениями объясняется и то, что в графиках нагрузки тяговых подстанций и тяговой нагрузки энергосистем на магистральных дорогах невозможно подметить никакой закономерности распределения нагрузки по часам суток. В качестве примера на рис. 77, б представлены графики нагрузки нескольких тяговых подстанций и энергосистемы. Следует подчеркнуть, что если графики нагрузки для пригородного движения, представленные на рис. 77, а, могут быть отнесены к любым суткам периода, в течение которого действует заданный график движения (исключения могут составить только праздничные и предпраздничные дни, когда добавляется некоторое количество поездов), то графики рис. 77, б относятся к одним определенным суткам. Опыт показывает, что графики даже смежных суток заметно отличаются друг от друга.

Таким образом, как это ясно из всего изложенного, нагрузка системы энергоснабжения и ее элементов непосредственно зависит от графиков движения, применяемых на данной линии.

Следует также отметить, что графики суммарной нагрузки по всему участку, т. е. нагрузки всех или даже части подстанций, носят всегда более спокойный характер по сравнению с графиками нагрузки отдельных подстанций,

что в случае питания их от одной и той же энергетической системы имеет существенное значение. Например, расчеты по приведенным графикам показывают, что коэффициенты нагрузки (в данном случае отношение получасового максимума к среднесуточной нагрузке) отдельных подстанций магистральной дороги лежат в пределах 1,8—2,7, тогда как для суммарных графиков это отношение равно 1,6. Этой особенностью определяется и то, что при уменьшении числа тяговых подстанций на участке мощность каждой подстанции растет, а все приведенные коэффициенты ближе подходят к единице, т. е. использование оборудования улучшается. Приводимые соображения можно подтвердить, если принять такой теоретический случай, когда весь участок питался бы от одной подстанции. В этом случае график нагрузки подстанции совпал бы с графиком нагрузки всей системы (рис. 77) и, следовательно, имел бы более равномерный характер. Отсюда ясно и то, что при изменении числа тяговых подстанций нагрузка первичной системы не изменяется.

Рассмотрим подробнее некоторые вопросы, связанные с графиками движения. Прежде всего последние разделяются на параллельные и непараллельные.

При параллельном графике (рис. 78, а и в) предусматривается движение поездов только с одинаковой скоростью, что дает возможность пропустить наибольшее число поездов. При непараллельном графике (рис. 78, б и г) имеет место движение поездов различного типа (категорий), пассажирских и грузовых.

Характер графика в известной степени зависит от соотношения времен хода по перегонам. Различают при этом идентичные и неидентичные перегоны. Под первыми понимают перегоны, проходимые поездом (на двухпутных линиях) или парой поездов (на однопутных линиях) в одинаковое время, соответственно неидентичными — проходимые в различное время. Если число поездов в обоих направлениях одинаково, то график называют парным, в противоположном случае — непарным.

Существенную роль при расчетах системы энергоснабжения играет порядок следования попутных поездов. По этому признаку графики подразделяют на пачечные и пакетные. При пропуске поездов пачкой (рис. 79, а), т. е. при пачечном графике, поезда, отправляющиеся один за другим, разделяются между собой межстанционным перегонном. При этом между этими попутными поездами нельзя проложить ни одного поезда встречного направления. При пакетном движении (рис. 79, б) попутные поезда отделяются друг от друга межпостовыми перегонами или блок-участками. В этом случае на межстанционном перегоне может находиться несколько поездов одного направления. В исключительных случаях при пакетном движении разграничение поездов может производиться по времени.

Большую роль в построении графиков движения играет определение интервалов между поездами. Эти интервалы определяются временами пребывания поездов на станциях и перегонах. Первые учитываются так называемыми станционными интервалами; эти интервалы зависят от характера операций, проводимых на станциях. Вторые учитывают время, потребное для прохода поездом соответствующего перегона.

При применении на участке автоблокировки наименьшая величина интервала между поездами может быть получена при пакетном движении. Это время должно быть достаточным, чтобы позади идущий поезд не снижал своей скорости из-за несвоевременного освобождения перегона поездом, идущим впереди. Это может быть достигнуто, если машинист поезда, подходя к сигналу, разрешающему вход на перегон, видит его на расстоянии, не меньшем тормозного пути, в открытом положении. Возможное расположение поездов при трехзначной автоблокировке показано на рис. 80.

При езде на зеленый огонь (рис. 80, а) поезда разграничиваются расстоянием L_p , не меньшим трех блок-участков,

$$L_p = l'_{бл} = l''_{бл} + l'''_{бл} + l, \quad (69)$$

где $l'_{бл}$, $l''_{бл}$, $l'''_{бл}$ — длины блок-участков;
 l — длина поезда.

При езде поезда под зеленый огонь (на желтый огонь — рис. 80, б) поезда разграничиваются двумя блок-участками. При этом

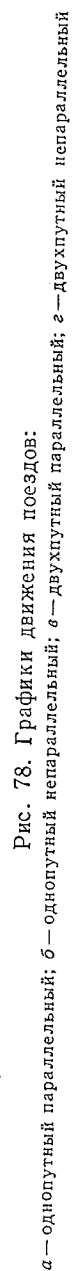
$$L_p = l'_{бл} + l''_{бл} + l. \quad (70)$$

При езде под желтый огонь (рис. 80, в) поезда разграничиваются одним блок-участком и при этом

$$L_p = l'_{бл} + l_m + l, \quad (70')$$

где l_m — длина тормозного пути.

Нормально движение осуществляется по первой схеме (рис. 80, а), во второй схеме приходят, если пропускная способность оказывается недостаточной, но только не для пассажирских поездов или идущих вслед за ними, причем обычно это допускается только



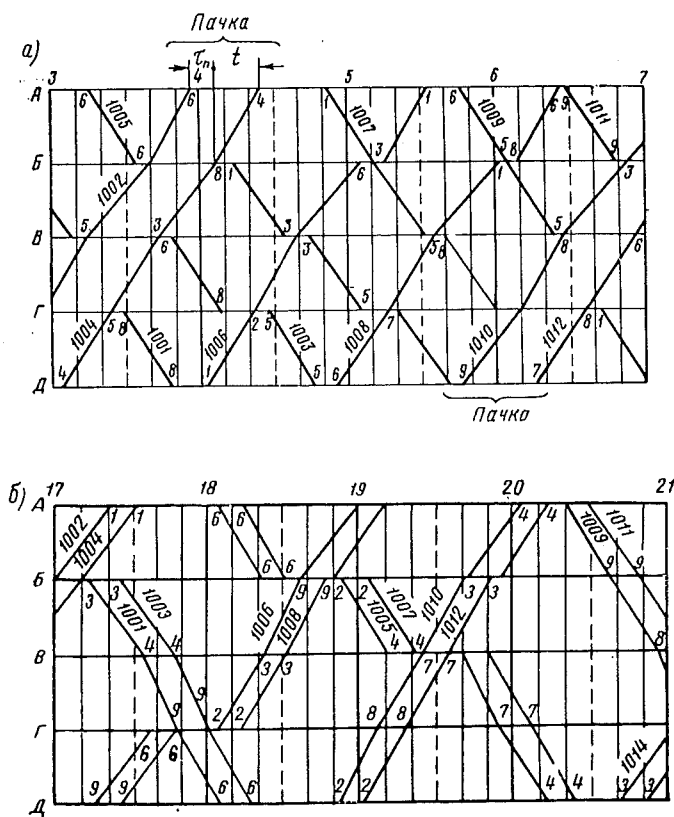


Рис. 79. Однопутные графики:
а — непарный пачечный; б — пакетный



Рис. 80. Схема разграничения поездов
при трехзначной автоблокировке:
а —езда на зеленый огонь; б —езда под
зеленый огонь (на желтый); в —езда под
желтый огонь; L_p — расстояние между
поездами; $l'_{бл}$ — длина блок-участка;
 l — длина поезда; l_m — тормозной путь

на затяжных подъемах, где скорость поездов несколько снижается. Езда под желтый огонь применяется в исключительных случаях и только на блок-участках, расположенных на затяжных подъемах.

Возможные расположения поездов при применении на участке полуавтоматической блокировки показаны на рис. 81. Расстояние между поездами определяется при первой схеме (рис. 81, а) для поезда, выходящего со станции, расстоянием от оси станции до ближайшего блок-поста. При сквозном проходе межпостового перегона расстояние может быть получено из схемы рис. 81, б. Схема рис. 81, в показывает необходимое расстояние между поездами при сквозном проходе станции и, наконец, схема рис. 81, г — расстояние для поезда прибывающего на станцию с остановкой на ней.

Расчетным интервалом является здесь наибольшая величина из возможных.

Выше было показано, что для расчетов системы энергоснабжения магистральных электрических железных дорог с грузовым движением невозможно исходить из какого-либо одного определенного графика движения, а следовательно, и из определенного графика нагрузки элементов системы энергоснабжения. Для таких случаев должны быть созданы иные методы оценки нагрузки.

Рассмотрим несколько подробнее возможные пути решения таких задач.

Пусть для некоторого участка железной дороги при проектировании известно (задано) суточное число поездов и места расположения сигналов, по которым можно судить о максимально возможном числе поездов, могущих одновременно занимать рассматриваемый участок.

Как показывает опыт, в условиях нормальной эксплуатации в отдельные периоды суток часть поездов может быть пропущена с минимальным интервалом попутного следования. При этом не исключена возможность, что могут совпадать по времени максимальные значения токов, потребляемых этими поездами. Если такой режим работы может возникать достаточно часто, то, очевидно, следует так выбирать мощность элементов системы энергоснабжения, чтобы было обеспечено бесперебойное питание и при таком режиме работы. Если же он может возникать очень редко, то было бы неразумно затрачивать значительные средства на излишнюю мощность системы энергоснабжения. В этом случае надо было бы располагать сведениями, как часто может возникать такой режим, иначе говоря, какое количество отключений защиты, предохраняющей от связанных с таким режимом перегрузок, будет иметь место за определенный промежуток времени при той или иной мощности системы энергоснабжения. Если частота появления таких режимов или количество отключений защиты выходило бы за допускаемые пределы, то следовало бы увеличить мощность системы энергоснабжения. Однако, поскольку никакого постоянного типового графика нагрузки в этом случае не может быть, то и количество

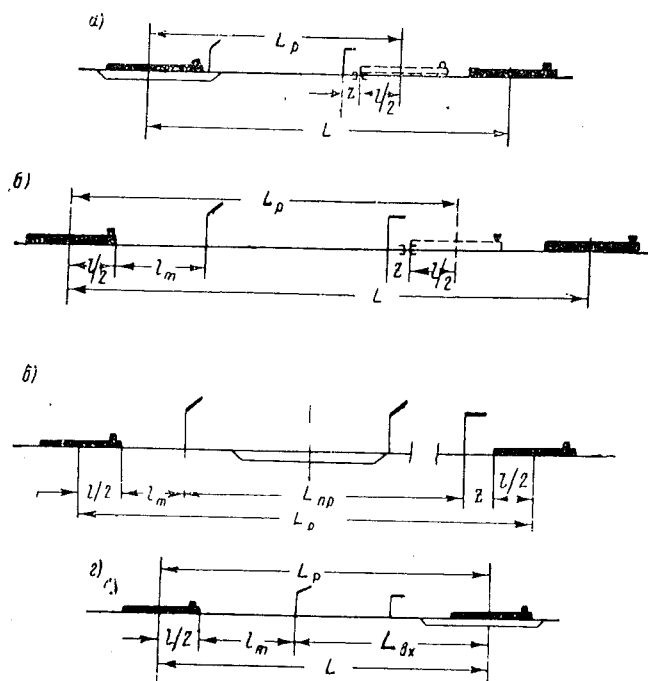


Рис. 81. Схема разграничения поездов при полуавтоматической блокировке:

L_p — расстояние между поездами; l — длина поезда; l_m — тормозной путь; z — гарантийное расстояние

таких отклонений обычным путем, исходя из графика нагрузки, определить невозможно.

Такое положение в условиях эксплуатации создается и при заданном графике движения.

Выше было упомянуто о том, что для построения типовых графиков нагрузок различных потребителей применяют метод наложения одного графика на другой, пока выявится его устойчивый характер. Если мы и для магистральной линии электрической дороги с грузовым движением применим тот же метод, то увидим, что постепенно суммарный график за ряд суток будет тем больше стремиться к горизонтальной линии, чем больше суток будет рассмотрено.

Это говорит о том, что никакого типового графика нагрузки элементов системы энергоснабжения магистральных электрических дорог не существует. Тот же результат получается, если накладывать друг на друга диаграммы изменения количества поездов, одновременно занимающих рассматриваемую зону, построенные по большому числу исполненных суточных графиков движения.

В различных областях деятельности приходится сталкиваться с изучением явлений, в которых цепь причинной зависимости настолько сложна, что практически не удастся проследить ее от начала до конца для того, чтобы получить однозначное решение поставленной задачи. Такие явления, цепь причинной зависимости которых от всех связанных с ними предыдущих явлений невозможно проследить, называют случайными явлениями. При изучении случайных явлений классическая схема решения задачи, т. е. путь от заданного комплекса исходных условий к установлению достоверного факта (однозначного решения), практически не может быть использована и приходится искать закономерности, управляющие случайными явлениями. Отысканием этих закономерностей занимаются математическая статистика и теория вероятностей.

Схема решения задач в этом случае отличается от классической схемы тем, что здесь вместо всего сложного комплекса исходных условий берут только те, которые наиболее сильно влияют на результат и причинно-следственные связи которых возможно установить.

При таком подходе к решению задачи уже не может быть дан совершенно определенный ответ, так как ряд исходных факторов остается неучтенным. Следовательно, в зависимости от того, какое значение будут приобретать эти факторы, будет меняться и результат решения рассматриваемой задачи. Зная пределы, в которых могут изменяться эти неучтенные факторы, можно предсказать и пределы изменения интересующей нас величины. Пользуясь математической статистикой и теорией вероятностей, взамен точного однозначного решения устанавливают возможность появления того или иного результата расчета, лежащего в этих пределах, и вводят специальные численные оценки такой возможности, устанавливая тем самым, как часто тот или иной результат будет появляться из общего числа случаев. Однако следует особенно подчеркнуть то, что математическая статистика и теория вероятностей могут быть использованы только при определенных условиях.

Математическая статистика широко использует положение, что в случаях, когда одинаковые явления многократно повторяются в сходных условиях, то обнаруживается определенная устойчивая закономерность. Именно это обстоятельство навело на мысль, что есть основания ожидать появления таких законов, управляющих массовыми событиями, при анализе графиков нагрузки и графиков движения действующих линий железных дорог. Действительно, здесь мы имеем явление — движение отдельных поездов, протекающее в весьма сходных условиях: тот же путь, трасса, профиль, та же расстановка сигналов, близкое к постоянному ежесуточное число поездов (примерно при одних и тех же типах поездов) и т. п. Обследование большого количества графиков движения (плановых и исполненных) и графиков нагрузки подтвердило закономерность использования математической статистики для расчетов энергоснабжения.

При изложении различных положений математической статистики и теории вероятностей вводят понятия «событие» и «опыт». Под событием понимают всякий факт, который в результате проведения опыта может произойти или не произойти. Положим, что нас интересует вопрос о том, будет ли в подстанционной зоне в некоторые отдаленные моменты времени находиться одновременно три поезда. Этот интересующий нас факт, т. е. появление на рассматриваемом участке одновременно трех поездов, и составляет в нашем случае событие. Если же мы дождемся наступления этих моментов времени и проведем наблюдение, это значит, что мы проведем опыт. При этом может оказаться, что число поездов, одновременно наблюдаемое на участке, будет иное. Это может быть в отдельные моменты времени, а может быть и при всех опытах.

Различные события (например различные значения случайной величины) могут появляться различное число раз в общем количестве проведенных опытов. Отношение числа появлений данного события к числу всех опытов, в которых оно могло появиться, называется частотой появления данного события, или его статистической вероятностью.

В рассмотренном выше примере отношение числа событий, в которых появлялось бы три поезда, к общему числу опытов (рассмотренных моментов времени) и будет частотой, или статистической вероятностью данного события (появление трех поездов).

Статистические методы исследования были применены при обследовании ряда суточных графиков движения. Определялось время, в течение которого в фидерной или подстанционной зоне находился только один поезд, затем два, три и т. д., откуда получалась относительная суммарная длительность пребывания в рассматриваемой зоне того или иного числа поездов. При этом всегда оказывалось, что наибольшее время на участке одновременно пребывало число поездов, близкое к тому, которое соответствует равномерному графику. Другие же числа поездов имели длительность одновременного пребывания тем меньшую, чем больше они отличались от этого числа. Например, заметили, что из общего числа обследованных суток в течение 5,5% всего времени не было ни одного поезда на рассматриваемом участке, в течение 10% — один поезд, в течение 16,5% — два поезда, в течение 36% — три поезда, в течение 18% — четыре поезда, в течение 9,5% — пять поездов и в течение 4,5% — шесть поездов (максимально возможное на данном участке).

В этом примере частота появления 0; 1; 2; 3; 4; 5 и 6 поездов соответственно равна 0,055; 0,100; 0,165; 0,360; 0,180; 0,095 и 0,045. Здесь можно было бы рассматривать не все время пребывания поездов на участке, а отдельные моменты времени, например от-

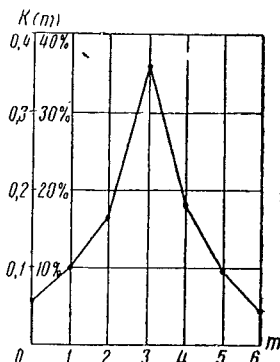


Рис. 82. График (многоугольник) распределения числа поездов

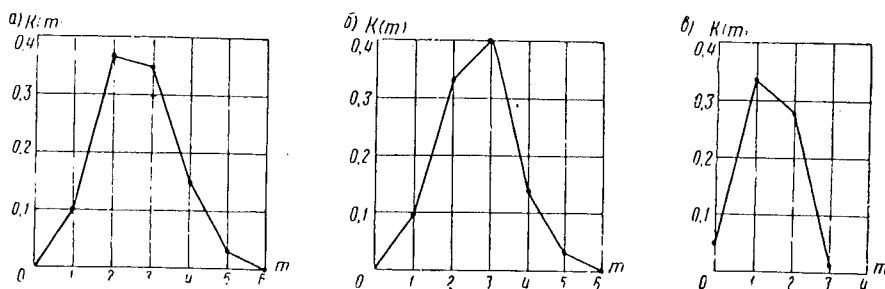


Рис. 83. Графики (многоугольники) распределения числа поездов на фидерных зонах обоих путей двухпутного участка дороги:

а — построено по плановому графику движения на лето; б — то же на зиму; в — то же для одного пути двухпутного участка

стоящие друг от друга на минуту, тогда вместо длительности пребывания на участке того или иного числа поездов будем иметь число случаев, в которых появилось это число поездов.

Во всех случаях сумма частот появления различных значений рассматриваемой величины составит единицу.

В математической статистике и теории вероятностей ряд частот появления различных значений рассматриваемой величины называется рядом распределения данной величины.

Если бы мы попытались результаты описанного выше примера изобразить графически, то получили бы расположение точек, изображенное на рис. 82. Такие диаграммы представляют либо в виде ряда вертикальных отрезков, характеризующих частоты появления определенного события (например, определенного числа поездов), или соединяют верхние концы этих прямых, получая фигуру в виде многоугольника. Такие диа-

граммы называют графиками или многоугольниками распределения случайной величины. В данном случае мы получили бы многоугольник распределения числа поездов.

Несомненно, что число обследованных суточных графиков влияет на результаты такого распределения числа поездов (по длительности пребывания этого числа) в данной зоне. Однако, продолжая увеличивать число опытов, т. е. число рассматриваемых суток, можно заметить, что колебание частот постепенно уменьшается. Другими словами, практика показывает, что частота событий, будучи подвержена при малом числе опытов весьма значительным случайным изменениям, с увеличением числа опытов стремится к некоторому определенному пределу. Исследование всех подобных закономерностей и нахождение объективных законов для установления таких пределов составляет содержание таких наук, как математическая статистика и теория вероятностей.

На рис. 83 и 84 приведено несколько примеров распределения числа поездов, полученных из анализа ряда графиков движения для одного и того же участка железной дороги.

Неоднократно проводившиеся исследования плановых и исполненных графиков движения полностью подтвердили устойчивый характер распределения числа поездов. Графики, приведенные на рис. 83 и 84, относятся к различным дорогам по числу путей и характеру их работы. Рис. 83 относится к участку двухпутной линии равнинного профиля. Суточное число пар поездов равно 55, из которых около 20% пассажирских. Система сношений — автоблокировка.

Такой же характер распределения получился и для двухпутных участков горного

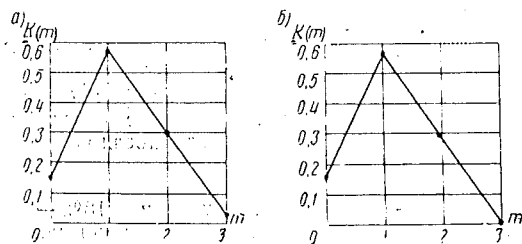


Рис. 84. Графики (многоугольники) распределения числа поездов на фидерной зоне однопутного участка:

а — построен по плановому графику на лето;
б — то же на зиму

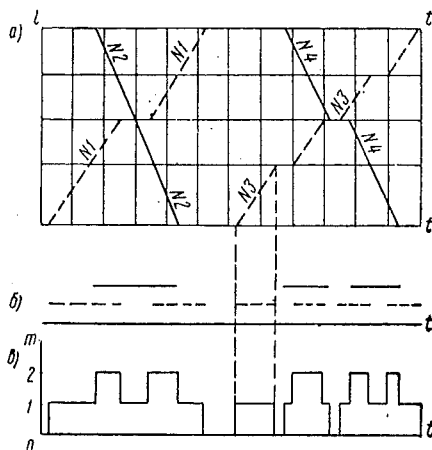


Рис. 85. Схема построения графика изменения числа поездов в фидерной зоне по времени:

а — элемент графика движения; б — время пребывания поездов в фидерной зоне;
в — график изменения числа поездов

профиля при незначительных размерах пассажирского движения. К этому случаю относится рис. 84. Здесь число пар поездов в сутки равно 25, система сношений — автоблокировка. Проанализировано было также большое количество исполненных графиков движения. И в этом случае результаты показали такой же устойчивый характер распределения числа поездов.

Как правило, на основе анализа нескольких исполненных графиков движения уже получается устойчивая картина распределения числа поездов в фидерной зоне. Практически, как показал анализ весьма большого количества графиков движения, даже один суточный график движения часто дает устойчивый характер распределения. Методика построения графика изменения числа поездов видна из рис. 85, где представлена часть некоторого графика движения для двухпутного участка. Под графиком движения (рис. 85, а) отложено время пребывания поезда в данной зоне (рис. 85, б) и построен график изменения числа поездов, одновременно находящихся в рассматриваемой зоне (рис. 85, в).

В качестве примера рассмотрим наудачу взятый график движения для однопутного участка (рис. 86). Здесь условно в качестве фидерной зоны рассмотрены три перегона А—Б, Б—В и В—Г. Для этих перегонов построен график изменения числа поездов в рассматриваемой зоне (рис. 87).

На основании этого графика можно установить, что за сутки, т. е. за 1 440 мин, на участке было поездов

в течение	142 мин	0
»	»	576 » 1
»	»	590 » 2
»	»	132 » 3

Следовательно, частота появления каждого числа поездов получается

$$\kappa(0) = \frac{142}{1440} = 0,086;$$

$$\kappa(1) = \frac{576}{1440} = 0,394;$$

$$\kappa(2) = \frac{590}{1440} = 0,458;$$

$$\kappa(3) = \frac{132}{1440} = 0,062.$$

Как и следовало ожидать, сумма частот равна единице.

Полученные данные, представленные в виде многоугольника на рис. 88, еще раз демонстрируют устойчивый характер распределения числа поездов (в данном случае даже на примере одного графика движения).

Итак, как это видно из изложенного, не зная внутренней сущности явления, определяющего ход и результат того или иного опыта, и, следовательно, не имея никакой возможности предсказать появление того или иного события (результата), для массы этих же событий мы можем делать достаточно близкие к достоверности предсказания. Это говорит о том, что в окружающем нас мире объективно действуют определенные закономерности, которым подчинены процессы протекания массовых событий. Очевидно, есть все основания полагать, что эти объективные закономерности могут быть оценены теми пределами, к которым стремится частота появления событий.

Таким образом, надо считать, что независимо от того, проводились или не проводились испытания, такие пределы существуют объективно. Называют их вероятностью событий. Следовательно, вероятность событий есть численная мера степени объективной возможности этого события.

Как было отмечено, если увеличивать число опытов, то, в конце концов, удастся определить эти пределы частот появления различных значений случайной величины. Зависимость этих пределов или вероятностей появления интересующей нас случайной величины от значения этой величины может быть представлена также многоугольниками или кривыми распределения.

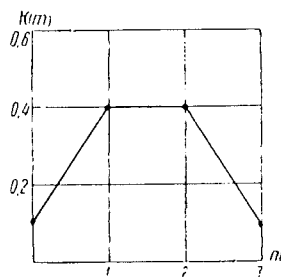


Рис. 88. Многоугольник распределения числа поездов

Используя все изложенное, можно прийти к выводу, что если на данной линии железной дороги не меняются условия работы, то, проведя достаточно длительные наблюдения и соответствующим образом их обработав, возможно предсказать и на будущее время, какое значение будут иметь все интересующие нас величины, например, как часто и сколько будет поездов в фидерной или подстанции или т. п. Однако все эти весьма интересные предвидения будут иметь цену только для той зоны или подстанции, т. е. для тех конкретных условий, где они велись, и только при сохранении всех условий работы. При изменении же условий работы или для других зон и подстанций, т. е. для других конкретных условий, они потеряют свою ценность. Следовательно, мало иметь уверенность, что данное явление при большом числе опытов подчиняется какому-то устойчивому закону, надо уметь оценить его с количественной стороны.

Ценность науки, именуемой теорией вероятностей, заключается в том, что на основе ряда строго научных положений, исходя из заданных условий, она дает для ряда практических задач возможность, минуя не всегда выполнимые и всегда весьма громоздкие опыты, найти значения вероятностей интересующих нас событий.

Конечно, в практике нас интересует действительное количество появлений события, т. е. частота, но, как указывалось, эта величина может быть установлена только после проведения опыта, т. е. тогда, когда уже будет утрачен интерес к ее установлению. В этом случае в большинстве практических задач (например при определении возможного числа поездов в данной зоне), когда

речь идет о рассмотрении большого количества явлений, эти сведения могут быть заменены вероятностью с тем большим успехом, чем большее количество условий будет учтено и чем на большее количество опытов оно будет распространено, т. е., в нашем случае, чем большее количество суток войдет в расчет.

Таким же образом, как это было сделано с графиками движения, удалось исследовать ряд суточных графиков нагрузки подстанций или линий передачи, питающих электрические дороги, и установить долю времени, в течение которого нагрузка (ток или мощность) будет лежать в определенных пределах.

Для этого были взяты записи почасовых расходов энергии ряда тяговых подстанций различных дорог и построены графики распределения

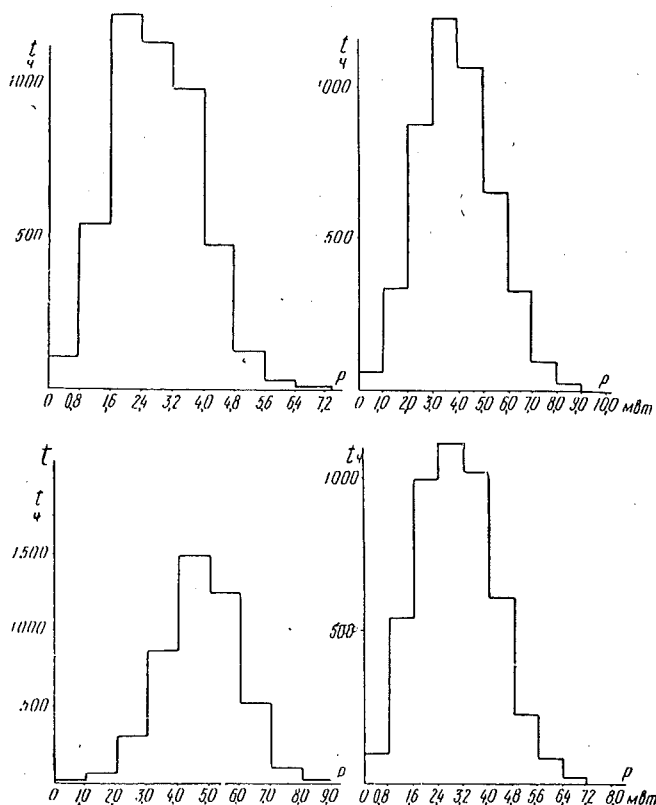


Рис. 89. Графики распределения среднечасовых нагрузок тяговых подстанций

этих среднечасовых нагрузок (рис. 89). На рис. 89 по оси абсцисс отложены значения среднечасовой нагрузки, а по оси ординат — суммарное время действия соответствующей (т. е. лежащей в установленном интервале) нагрузки за все рассматриваемое время.

Здесь выявляется устойчивый характер распределения, так как после обследования ряда суток дальнейшее добавление данных последующих суток уже не меняет полученный характер распределения. Другими словами, данное явление можно изучать и оценивать (рассчитывать), опираясь на законы, проявляющиеся в массовых процессах. Надо отметить, что характер таких кривых распределения находится в большой зависимости от величины интервала, за

который берется средняя нагрузка. Так, например, если бы мы взяли среднюю нагрузку за сутки, т. е. усреднили нагрузку во всем диапазоне ее изменений, то диаграмма свелась бы к одной вертикальной линии, определяющей статистическую вероятность, равную единице (если принять, что расход энергии за все сутки одинаков), как показано на рис. 90, а. Если же весь диапазон изменения нагрузок разделить сначала на три части $P_{1,0}$, $P_{2,1}$ и $P_{3,2}$, то график распределения уже представится тремя вертикальными линиями (рис. 90, б), а при делении диапазона изменения нагрузок на пять частей — в виде пяти вертикальных линий (рис. 90, в) и т. д.

Таким образом, если рассматривать не средние почасовые нагрузки, а средние за меньшие интервалы, то кривые распределения будут несколько изменяться. В пределах эти диаграммы превратятся в кривую распределения, показанную на рис. 90, г.

На основе кривых распределения можно судить о вероятности того, что нагрузка превысит определенную, заранее заданную величину.

При проектировании системы энергоснабжения часто возникает необходимость знать не только суммарное время, в течение которого имеет место та или иная нагрузка, но и то, сколько раз в процессе своего колебания нагрузка проходит через это, т. е. некоторое определенное (назовем его заданное) значение. Такая необходимость может возникнуть, например, в том случае, если предполагается осуществить регулирование напряжения на тяговой подстанции, и надо знать, сколько раз в сутки будет работать переключающее устройство, так как от этого зависит срок его службы.

Как уже указывалось, большое значение для бесперебойной работы железнодорожного участка имеет число отключений выключателей, автоматически отключающих фидеры, которые питают контактную сеть, как только нагрузки этих фидеров выходят за пределы допустимых. В этом случае также недостаточно знать вероятность того, что действительная нагрузка превысит уставку выключателя, так как эта вероятность определяется той долей времени, в течение которого меняющаяся нагрузка может иметь такие значения. Однако

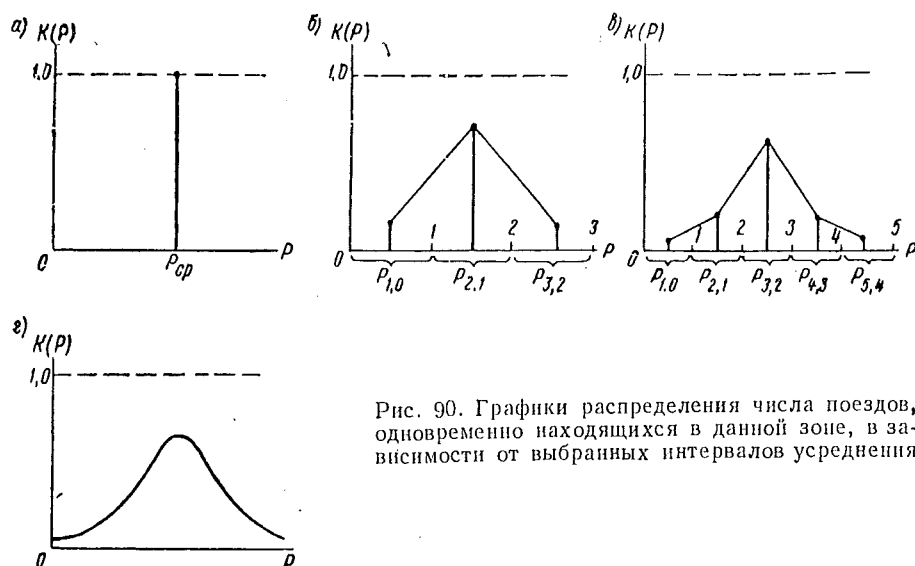


Рис. 90. Графики распределения числа поездов, одновременно находящихся в данной зоне, в зависимости от выбранных интервалов усреднения

эта доля времени определяется суммой длительностей всех отдельных появлений таких нагрузок в течение рассматриваемого периода, а число таких появлений, каждое из которых вызовет отключение выключателя, этой вероятностью не определяется.

Проведенные в МИИТе статистические исследования показали, что и эта величина, т. е. частота (а при непрерывном изменении и плотность вероятности) числа проходов значения нагрузки через заданную величину, имеет совершенно устойчивый характер и представляется кривыми того же вида, что и на рис. 90, г.

Выше много внимания было уделено вопросам режима напряжения в контактной сети электрических железных дорог. Отмечалось, что уровень напряжения непрерывно колеблется, что вызывается изменением нагрузки ряда потребителей, питающихся от энергосистемы, и особенно колебанием тяговой нагрузки. Поэтому естественно ожидать, что и потери напряжения подчиняются тем же законам распределения.

Все изложенное говорит о том, что оценка различных показателей тяговой нагрузки на магистральных железных дорогах возможна только на основе законов математической статистики и теории вероятностей.

Следовательно, говоря о том или ином значении расчетной величины, необходимо приводить соображения о ее вероятности. Если, характеризуя нетягового потребителя, называют его максимальной нагрузкой, то все понижают, что речь идет о нагрузке, появляющейся периодически, например еже-

суточно. Совсем иначе обстоит дело с таким потребителем, как магистральная железная дорога. Подсчитанная или замеченная в эксплуатации наибольшая нагрузка, как правило, будет появляться очень редко. Поэтому-то всегда уславливаются, какую комбинацию нагрузок принимать в качестве наиболее тяжелой, хотя в действительности могут возникать и более тяжелые, но значительно реже.

В настоящее время методика определения расчетных значений различных величин (нагрузок, уровней напряжения, числа отключений выключателей и т. п.) по заданной вероятности находится в стадии разработки, и можно думать, что в недалеком будущем она займет прочное место в расчетах системы энергоснабжения. В других отраслях техники такие методы расчета уже давно и прочно укоренились.

Определение средних значений расчетных величин, например, средней квадратичной нагрузки, средних потерь мощности и т. п. значительно проще. Здесь по существу учитываются все возможные значения расчетных величин, как бы ни была мала их вероятность. Влияние отдельных значений определяемой величины на ее среднее значение тем меньше, чем меньше вероятность этого отдельного значения, и учет мало возможных случаев практически не меняет окончательных результатов. Поэтому и не приходится задумываться о том, какими величинами в этом случае можно было бы пренебречь и следует ли это делать.

Таким образом, применение теории вероятностей позволит определить возможные пределы изменения тех расчетных величин, которые характеризуют необходимые энергетические показатели рассматриваемого участка электрифицированной дороги. Так, при рассмотрении показателей (коэффициентов), характеризующих нагрузку потребителей, было отмечено, что эти показатели не могут быть полностью отнесены к графикам нагрузки, создаваемым электрическими железными дорогами.

Ознакомившись теперь достаточно подробно с режимом работы системы энергоснабжения на магистральных участках с грузовым движением, можно установить и способы оценки нагрузки в условиях нормальной эксплуатации. Основные коэффициенты, характеризующие нагрузку (K_{\max} , K_{\min} , T_{\max} и K_0), связаны с величинами максимальной, средней и минимальной мощности. В качестве максимальной должна приниматься мощность, имеющая достаточную вероятность, чтобы с ней следовало считаться. Значения таких вероятностей должны устанавливаться техническими условиями на проектирование энергоснабжения электрических железных дорог.

Средняя мощность, как обычно, определяется по расходу энергии и практически не зависит от того, при каких графиках осуществляется движение данного количества поездов за рассматриваемый период.

Что касается коэффициента попадания в максимум, весьма важного для питающей энергосистемы, то приходится считаться с тем, что максимум нагрузки на магистральной дороге может возникнуть в любое время суток. С этой точки зрения его как будто бы следовало просто принять равным отношению максимальной мощности к установленной. Однако следует иметь в виду, что обычно коэффициентом попадания в максимум характеризуют нагрузку, возникающую ежедневно (или по рабочим дням) в установленные часы. Из всего изложенного выше ясно, что к максимальной нагрузке магистральных железных дорог это отнесено быть не может. Чем больше величина коэффициента попадания в максимум, тем меньше его вероятность, т. е. тем реже возможность попадания такой нагрузки в максимум энергосистемы. Поэтому и здесь наиболее правильным было бы связать величину коэффициента максимума с тем значением вероятности этой величины, с которым еще следует считаться [15].

Определение минимальной нагрузки (или связанных с нею коэффициентов K_{\min} и K_0) находится в тех же условиях, что и определение максимальной нагрузки. Другими словами, и здесь в качестве расчетной должна приниматься нагрузка, имеющая достаточно высокую вероятность.

§ 18. РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПРИ МАКСИМАЛЬНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНИИ

С развитием электрификации железных дорог в нашей стране принципы и методы выбора необходимой мощности элементов системы энергоснабжения непрерывно совершенствовались, так как росли опыт эксплуатации и уровень знаний, развивалась техника, изменялись условия работы вновь электрифицированных линий. Последнее обстоятельство сыграло особую роль, когда перешли к электрификации линий с максимальной грузонапряженностью. Развитие этого вопроса в основном идет по пути изучения неизбежной неравномерности движения на железных дорогах, способов ее оценки и определения необходимой в таких условиях мощности устройств энергоснабжения.

Мы уже отмечали, что резкие отклонения от равномерного расположения поездов в графике или, как их называют, «сгущения» поездов, приводят к увеличению требуемой мощности системы энергоснабжения.

Ознакомление с работой ряда электрифицированных участков показывает, что минимальный интервал попутного следования поездов на различных участках заметно различается. На наиболее нагруженных направлениях он составляет 7—8 мин, а в особо трудных условиях, когда допускается движение поездов с уменьшенным интервалом (относительно нормальных условий движения), снижается иногда даже до 5—6 мин. На ряде же участков минимальный интервал попутного следования не бывает меньше 15—20 мин.

Кроме того, в условиях нормальной эксплуатации при движении с минимальным интервалом попутного следования могут иметь место случаи совпадения по времени в одной и той же зоне ряда поездов максимального веса. При этом в практике можно наблюдать графики движения, в которые входят периоды движения поездов с минимальным интервалом попутного следования самой различной продолжительности.

Мы уже отмечали, что такие режимы работы возникают после временного перерыва в движении, когда диспетчер стремится как можно скорее восстановить нормальную работу и поэтому посылает поезда один за другим с минимально возможным интервалом попутного следования. Эти режимы движения и могут создать наиболее тяжелые условия для работы системы энергоснабжения. При этом наибольшее скопление поездов, естественно, происходит на участках с наибольшим числом поездов в нормальном графике движения. При этом ликвидировать такое скопление особенно трудно, потому что со смежных участков в этот период подходит большое число поездов. На дорогах же с меньшими размерами движения за то же время перерыва в движении скопится меньшее число поездов и, что особенно важно, во время ликвидации такого сгущения подходит также меньшее число поездов. Этим в большой мере и определяется то, что на участках с густым движением перерыв в движении отражается значительно сильнее, нарушая нормальную работу на период, значительно превышающий тот же период на линиях с меньшими размерами движения.

С другой стороны, на участках с относительно невысоким использованием пропускной способности пропуск поездов с минимальным интервалом попутного следования вызывает значительное увеличение потребляемой от подстанций мощности. Например, при пропускной способности $N_0 = 144$ пары поездов и суточном числе поездов $N = 48$ пар сгущение может быть оценено отношением этих величин $\frac{N_0}{N} = 3$. При очень густом движении, т. е. при высоком использовании пропускной способности, это отношение будет, конечно, значительно меньше. Максимальная нагрузка на подстанцию, линию передачи и, наконец, на энергосистему возникает от скопления поездов в зоне, получающей питание от этого элемента системы энергоснабжения. Некоторое значение имеет и появление более тяжелых поездов. Однако, если число таких поездов в суточном графике относительно невелико, то они играют тем меньшую роль, чем больше зона, питаемая от рассматриваемого элемента

системы энергоснабжения, так как нагрузка от этих поездов составляет тем меньшую долю общей нагрузки, чем больше на линии поездов основного типа.

Следовательно, основной причиной возникновения максимальной нагрузки следует считать «сгущение» поездов в графике, т. е. пропуск поездов пакетами. Возникает весьма важный вопрос — какой же величины могут быть эти максимальные нагрузки и какова их длительность. Рассмотрим в каче-

стве примера график для одностороннего движения при однотипных поездах (рис. 91, а). Пусть в течение времени t_n поезда идут с минимальным интервалом попутного следования θ , т. е. пакетом (t_n — длительность пакета), а в остальное время распределяются более или менее равномерно по часам суток. Легко видеть, что роль такого пакета в образовании максимальной нагрузки будет зависеть от длины зоны, питаемой от данного элемента системы энергоснабжения (т. е. подстанции, линии передачи или электростанции). Изобразим под графиком движения (рис. 91, а) схематично графики нагрузки различных элементов системы энергоснабжения. Для фидерной зоны АБ график нагрузки показан на рис. 91, б; здесь по оси ординат отложена величина κ_{\max} [см. § 17, формула (61)], а по оси абсцисс — время. До

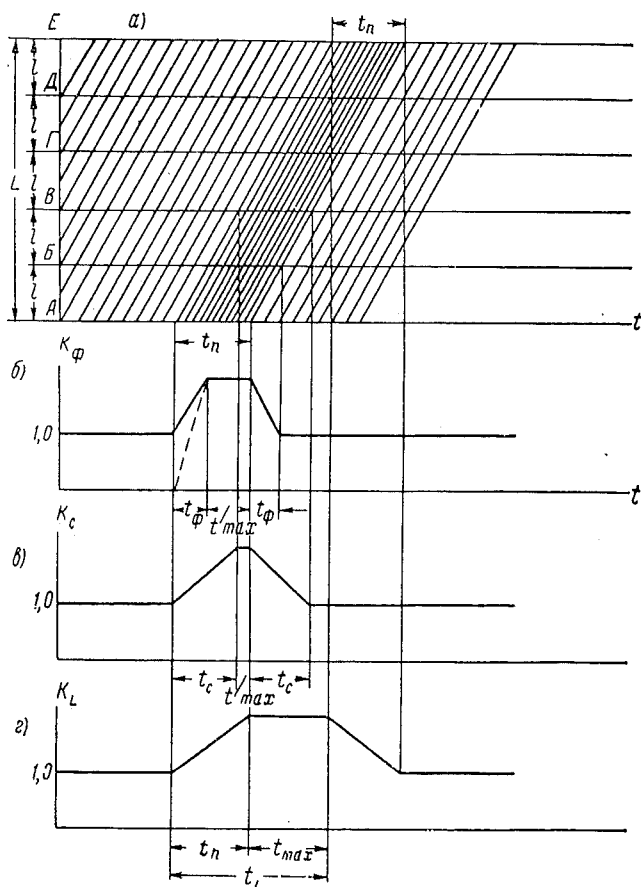


Рис. 91. К определению величины κ_{\max} :
 L — расстояние между электрическими станциями; l — длина фидерной зоны

начала пакета нагрузка будет равна средней, затем с накоплением поездов она начнет расти (отрезок времени t_ϕ) до тех пор, пока фидерная зона АБ не окажется заполненной поездами, следующими с минимальным интервалом попутного следования.

Если движение пакета началось после перерыва в движении, то нарастание мощности пойдет от нуля (пунктирная линия на рис. 91, б).

Далее в течение времени t_{\max} нагрузка равна максимально возможной и держится до конца времени движения поездов пакетом. Затем в течение времени t_ϕ нагрузка понижается и, наконец, возвращается к первоначальному (среднему) значению. Легко видеть, что при $t_n > t_\phi$ (t_ϕ — время хода поезда по фидерной зоне), сколько мы ни будем увеличивать длительность пакета, максимальное значение нагрузки уже не увеличится, расти будет только длительность такой нагрузки.

Нагрузка же любой подстанции, например подстанции Б, зависит от того, захватит ли пакет всю подстанционную зону АБ, получающую питание от подстанции Б (рассматривается двустороннее питание). Как видно из

графика, приведенного на рис. 91, а, длительность пакета также больше времени хода по подстанционной зоне и, следовательно, график нагрузки получит вид, данный на рис. 91, в. Отношение максимальной нагрузки к средней (т. е. K_{\max}) осталось тем же, что и в графике нагрузки фидерной зоны (рис. 91, б), но длительность максимальной нагрузки уменьшилась, так как $t_c > t_\phi$ (здесь t_c — время хода поезда по подстанционной зоне). Если взять теперь еще большую длину L , пусть это будет длина зоны, питаемой линией передачи или электрической станцией, то время хода по ней t_L будет уже больше длительности пакета, т. е. $t_L > t_n$. При таком положении окажется, что уже не вся зона L заполнена поездами до предела перегонной пропускной способности и график нагрузки линии передачи или электрической станции будет иной (рис. 91, г). В этом случае максимальная нагрузка образуется не только поездами пакета, но и частью поездов, движущихся за пределами пакета. Нет сомнения, что в этом случае, т. е. когда $t_L > t_n$, чем больше t_L по сравнению с t_n , тем меньше будет величина K_{\max} .

Таким образом, соотношения времени хода по рассматриваемой зоне (t_ϕ , t_c или t_L) и длительности пакета t_n определяют отношение максимальной нагрузки к средней.

Рассмотрим вопрос определения расчетной (возможной) длительности пакета t_n .

Нет никакого сомнения в том, что если в расчете принимать эту длительность неограниченной, т. е. вплоть до того, что все суточное число поездов пропускается одним пакетом, а остальную часть времени данная линия не загружена поездами, то это будет наиболее тяжелым случаем и расчетная мощность окажется максимальной для всех элементов системы энергоснабжения (контактной сети, тяговых подстанций, линий передачи и электрических станций) и, следовательно, конечно, достаточной. Однако, если такой расчетный режим не вызовет больших дополнительных расходов на линиях с высокой степенью использования пропускной способности, то на линиях с меньшими размерами движения эти дополнительные расходы будут тем выше, чем меньше используется пропускная способность. Отсюда ясно, что без учета особенностей данной линии (в первую очередь заданных размеров движения) нельзя обеспечить наиболее экономичных решений.

Кроме того, энергосистема, снабжающая электрической энергией железные дороги, на основании имеющегося опыта нормально не предусматривает для всех проектируемых участков запаса мощности, соответствующего такому режиму работы электрической дороги, так как это в некоторых случаях потребовало бы увеличения необходимой доли мощности энергосистемы для обеспечения питания электрической дороги в 1,5—2 раза. Если такой режим будет возникать очень редко, то он может рассматриваться с тех же позиций, как и любой аварийный режим, для которого допускают использование резерва системы и даже отключение ряда менее ответственных потребителей. Несомненно то, что, предусматривая какой-либо расчетный режим при проектировании тяговой части системы энергоснабжения электрических железных дорог, необходимо обеспечить возможность питания при этом режиме и со стороны энергосистемы, в противном случае, т. е. если энергосистема поставит ограничения, все дополнительные затраты в тяговой части энергоснабжения потеряют смысл.

Надо отметить, что при расчетах, исходящих из пакета поездов неограниченной длительности, величина K_{\max} окажется одинаковой для всех звеньев системы энергоснабжения (контактной сети, тяговых подстанций, линий передачи и энергосистемы) и будет зависеть только от степени использования

пропускной способности $\frac{N}{N_0}$ (N — среднегодовое суточное число поездов,

а N_0 — поперегонная пропускная способность). Обратная величина $\frac{N_0}{N}$ показывает, во сколько раз максимальная нагрузка может оказаться больше средней.

Так же одинаковой для всех элементов системы энергоснабжения окажется и связанная с κ_{\max} величина T_{\max} . Однако это находится в противоречии с практикой.

В табл. 10 приведены опытные данные, полученные на весьма грузонапряженной линии железной дороги с большим суточным числом поездов. Следует отметить, что здесь приняты во внимание и редко повторяющиеся максимумы и поэтому возможно, что значения κ_{\max} получились несколько завышенными, а T_{\max} — заниженными. Однако общая картина от этого не изменяется.

Т а б л и ц а 10

Объект исследования	$\kappa_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}}$	$T_{\max} = 8760 \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\max}}$
Линия железной дороги длиной около 500 км	1,45	6 070
Отдельные энергосистемы, питающие линию длиной около 250 км	1,53÷1,62	5760÷5400
Различные энергоучастки длиной около 100—125 км	1,62÷1,86	5410÷4700
Участок, питаемый двумя подстанциями длиной около 45—50 км	2,14	4 100
Отдельные тяговые подстанции, питающие участки длиной около 20—25 км	2,37÷3,53	3700÷2480

Из табл. 10 видно, что отношение максимальной мощности к средней меняется для различных элементов системы энергоснабжения в очень широких пределах (от 1,45 до 3,53).

Аналогичные результаты получены и для ряда других дорог, подтверждающая различие в коэффициентах κ_{\max} для зон различной длины [15].

Такой закон изменения коэффициента κ_{\max} известен специалистам, работающим в области энергоснабжения. Можно представить себе этот закон даже в общем виде, выразив изменения коэффициента κ_{\max} в зависимости от длины питаемой зоны, или, точнее, от времени хода поездов по этой зоне. Если принять (условно), что суточное число поездов остается неизменным, то на длине пути, который проходится поездами за сутки, нагрузка должна оставаться постоянной, т. е. никакого максимума быть не должно и $\kappa_{\max} = 1$.

Если теперь переходить от «суточной» длины пути к длинам все меньшим, то отношение максимально возможной нагрузки к средней будет расти. В пределе при длине участка, обращаемого в точку, максимальная нагрузка будет равна максимальной мощности, потребляемой одним из проходящих через эту точку поездов. Средняя же мощность является величиной, пропорциональной длине участка, и, следовательно, при уменьшении его длины до нуля средняя мощность также стремится к нулю. Поэтому коэффициент κ_{\max} стремится при этих условиях к бесконечности. Таким образом, график зависимости κ_{\max} от длины зоны будет представлять собой кривую, падающую от бесконечности (при увеличении длины участка или времени хода поезда по этому участку) до единицы (рис. 92). Соответственно, число часов использования максимума T_{\max} будет изменяться от 0 до 8760 (рис. 93).

Таким образом, величина κ_{\max} (или T_{\max}) непосредственно связана с длиной участка, питаемого от того элемента системы энергоснабжения, для которого данная величина определяется. Именно поэтому κ_{\max} для энергосистемы и линий передачи, питающих несколько тяговых подстанций, меньше (T_{\max} соответственно больше), чем для отдельной тяговой подстанции. Однако, если величина максимальной нагрузки и установлена, этого еще недостаточно для выбора параметров системы энергоснабжения. Дело в том, что большое значение для выбора параметров системы энергоснабжения

имеет время действия нагрузки различной величины на элементы системы энергоснабжения. Это имеет место потому, что нагрев проводов контактной сети, обмоток машин и трансформаторов определяет механическую прочность первых (у контактных проводов также и износостойкость) и срок службы вторых (по старению изоляции). К тому же, малая нагрузка большой длительности может привести к более значительному износу или уменьшению механической прочности, чем большая, но малой длительности.

Время действия нагрузки необходимо учитывать также и при установлении максимальных и минимальных значений напряжений в контактной сети.

Без учета этого времени пришлось бы закладывать средства в расчете на предельные значения, которые могли бы возникнуть, если бы совпали все возможные неблагоприятные условия, т. е., например, на условия, которые практически никогда не наблюдались на эксплуатируемых железных дорогах.

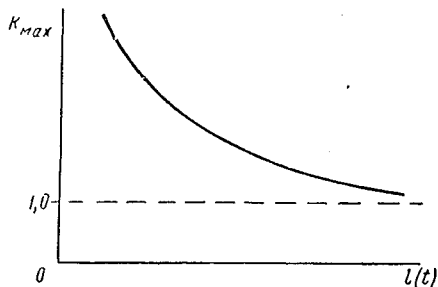


Рис. 92. Зависимость κ_{max} от длины зоны или времени хода по ней

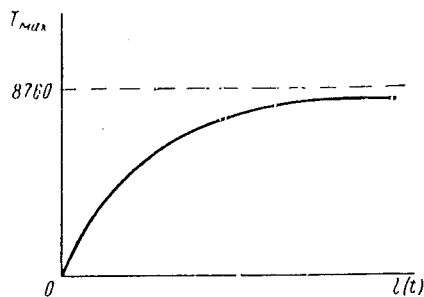


Рис. 93. Зависимость T_{max} от длины зоны или времени хода по ней

Методика такого учета может быть построена только на базе широкого использования статистических данных, позволяющих сделать правильные обобщения опыта работы электрифицированных дорог. Такие исследования ведутся в ряде научных организаций, однако эта работа еще не доведена до уровня, при котором она уже может быть широко использована при проектировании. Поэтому необходимо найти такую расчетную схему (расчетный режим) для выбора параметров системы энергоснабжения, которая по возможности удовлетворяла бы всем поставленным выше требованиям. Такая расчетная схема движения поездов (т. е. по существу расчетный график движения) должна обеспечивать выбор параметров системы энергоснабжения, отвечающих перечисленным в § 16 условиям. Другими словами, она должна обладать следующими качествами:

1) обеспечивать любую практически возможную и принимаемую в расчет неравномерность движения;

2) обеспечивать такое положение, при котором выбранная (необходимая) мощность элементов системы энергоснабжения находилась бы в зависимости от перевозочной работы (т. е. чтобы расчетная мощность системы энергоснабжения увеличивалась с увеличением грузопотока и уменьшалась с его уменьшением);

3) обеспечивать необходимую (логическую) зависимость коэффициента максимальной нагрузки κ_{max} от протяженности питаемой зоны (согласно рис. 92).

Исходя из первого требования, очевидно, необходимо, чтобы расчетный график движения предусматривал движение части поездов пакетом с минимальным интервалом попутного следования, так как такой режим может иметь место в практике.

Однако при этом должна быть установлена продолжительность такого пакета, которая обеспечила бы необходимую надежность работы и не требовала бы чрезмерных средств. Приведем некоторые соображения, позволяющие хотя бы приближенно наметить методику подхода к решению подобных задач,

т. е. к определению возможной длительности пакета t_n , которой мы пользовались выше (рис. 91).

В качестве исходного положения для определения максимальной потребной мощности системы энергоснабжения рассмотрим условия движения части суточного числа поездов с минимальным интервалом попутного следования после некоторого перерыва в движении. Рассматривать будем условия работы на двухпутном участке, где диапазон степени использования пропускной способности на различных линиях значительно больший.

Примем, что двухпутная линия имеет пропускную способность N_0 поездов в сутки в каждом направлении. Для простоты будем считать все поезда однотипными и число их в сутки наиболее напряженного месяца в каждом направлении равным N_1 .

Пусть в результате каких-либо причин произошел перерыв в движении сразу по обоим путям длительностью t_s часов. Количество поездов, которые могут накопиться на близлежащих станциях и перегонах, зависит от действующего графика движения. Однако с достаточной для практических расчетов точностью здесь можно допустить, что распределение поездов по часам суток происходит достаточно равномерно. Для коротких периодов (около одного часа) это предположение может и не оправдаться, но такие короткие задержки и не вызовут особых трудностей в работе системы энергоснабжения. Если же речь идет о перерывах в несколько часов, то допущенное предположение не дает заметной ошибки, так как распределение поездов по периодам суток тем равномернее, чем длительнее эти периоды.

Тогда, если для поставленной цели исходить из предположения, что в каждый час проходит $\frac{N_1}{24}$ поездов, то за время t_s окажется задержанным в каждом направлении

$$\frac{N_1}{24} t_s \text{ поездов.}$$

Допустив, исходя из тех же соображений, что поезда со смежных участков будут после этого перерыва подходить равномерно, получим число подходящих поездов (кроме скопившихся на станциях) в час $\frac{N_1}{24}$. Допустим, что после ликвидации причины задержки диспетчер начнет пропускать поезда с минимальным интервалом, т. е. по $\frac{N_0}{24}$ поездов в час. Следовательно, в каждый час из скопившихся поездов он сможет пропускать

$$\frac{N_0}{24} - \frac{N_1}{24} = \frac{N_0 - N_1}{24} \text{ поездов.}$$

Тогда ликвидировать сгущение он сможет в число часов, равное

$$t_n = \frac{N_1}{24} t_s : \frac{N_0 - N_1}{24} = \frac{t_s}{\frac{N_0}{N_1} - 1}. \quad (71)$$

На основе уравнения (71) построена кривая $\frac{t_n}{t_s} = f\left(\frac{N_1}{N_0}\right)$ (рис. 94), из которой наглядно видно, как быстро растет длительность пакета t_n при одном и том же перерыве в движении по данной линии. Так, при $\frac{N_1}{N_0} = 0,5$ длительность пакета равна длительности перерыва в движении, а при $\frac{N_1}{N_0} = 0,75$ она уже в два раза больше этого перерыва.

Если принять $t_3 = 4$ ч, то соответственно получим 4 и 8 ч. В реальных условиях в связи с обработкой поездов на станции длительность пакета может быть больше.

В теоретическом случае, когда число поездов приближается к пропускной способности, длительность пакета стремится к бесконечности. Это следует понимать так, что при данной пропускной способности ликвидация скопления поездов затягивается на очень длительное время и поэтому-то в практике при $\frac{N_1}{N_0}$, приближающемся к единице, приходится для ликвидации скопления поездов переходить на другие схемы движения, отличные от нормальных, позволяющие пропускать поезда с меньшим интервалом попутного следования (например отправлять поезда на желтый сигнал и т. п.), т. е. как бы временно повышать перегонную пропускную способность участка. Наоборот, при малой степени использования пропускной способности время, потребное на ликвидацию скопления поездов, может быть в несколько раз меньше времени перерыва в движении, т. е. может не представить никаких трудностей.

На шкале слева (рис. 94) в качестве примера приведена длительность пакетов при четырехчасовом перерыве движения (для пропускной способности, определяемой минимальным интервалом попутного следования, 10 и 8 мин).

При пропуске поездов пакетом потребуется увеличенная мощность от системы энергоснабжения. Если принять все поезда одного типа (средневзвешенные по расходу энергии) и рассматривать движение по одному пути, то увеличение мощности по отношению к средней будет пропорционально увеличению числа поездов, одновременно находящихся в рассматриваемой зоне, т. е.

$$K_{\max} = \frac{m_{\max}}{m_{cp}},$$

где m_{\max} — максимальное число поездов в рассматриваемой зоне;

m_{cp} — среднее число поездов в той же зоне.

Обозначим время хода поезда по определенной зоне (фидерной, подстанционной или зоне данной электрической станции) через t . В соответствии с тем, как это было изложено выше (см. рис. 91), следует рассматривать два случая: $t > t_n$ и $t < t_n$.

Для первого случая

$$m_{\max} = \frac{N_0}{24} t_n + (t - t_n) \frac{N_1}{24}$$

и

$$m_{cp} = \frac{N_1}{24} t,$$

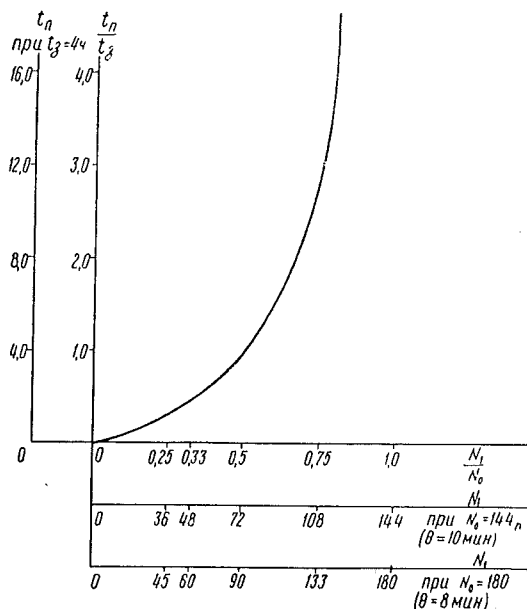


Рис. 94. К определению длительности пакета поездов в зависимости от времени перерыва движения и от степени использования пропускной способности

а следовательно,

$$\kappa_{\max} = \left(\frac{N_0}{N_1} - 1 \right) \frac{t_n}{t} + 1. \quad (72)$$

Легко видеть, что наибольшего значения этот коэффициент достигает при $t = t_n$, когда он становится равным $\frac{N_0}{N_1}$. Это же значение сохраняет он и для $t < t_n$, так как дальнейшее увеличение κ_{\max} невозможно.

Подставив в уравнение (72) значение t_n из (71), получим

$$\kappa_{\max} = \frac{t_s}{t} + 1 \quad (73)$$

и при $t \leq t_n$

$$\kappa_{\max} = \frac{N_0}{N_1}. \quad (74)$$

Формулой (73) можно пользоваться для всех случаев, в которых $t > t_n$. Соответственно, в тех случаях, когда $t \leq t_n$, надо пользоваться формулой (74).

На рис. 95, а построена примерная диаграмма зависимости κ_{\max} от t_s . Из этого рисунка видно, насколько быстрее растет κ_{\max} для тяговой подстанции ($t=1$ ч), чем для электрической станции ($t=5$ ч).

Здесь надо оговориться, что для простоты построение ведется

Рис. 95. Увеличение нагрузки при движении пакета и ее длительности в зависимости от степени использования пропускной способности

так, как если бы электрическая станция и подстанции не работали в параллель с другими станциями или подстанциями. При нормальной же работе необходимо было бы еще учесть и распределение нагрузки (возникающей от скопления поездов) между смежными станциями или подстанциями. При этом значения κ_{\max} уменьшились бы. На рис. 95, б показана длительность соответствующего максимума нагрузки, которая найдена из выражения

$$t_{\max} = t - \frac{t_s}{\frac{N_0}{N_1} - 1}. \quad (75)$$

В пределах $t > t_n$ или $t_s < t \left(\frac{N_0}{N_1} - 1 \right)$, t_{\max} уменьшается с увеличением t_s , как это показано на рис. 96. При значении $t_s = t \left(\frac{N_0}{N_1} - 1 \right)$ длительность нагрузки с κ_{\max} обращается в нуль. При дальнейшем увеличении t_s максимум уже не увеличивается, κ_{\max} остается постоянным [см. формулу (74)], а длительность максимума равняется $t - t_n$ или превышению t_s ее величины, при которой $\kappa_{\max} = 0$, т. е. $t \left(\frac{N_0}{N_1} - 1 \right)$.

Если движение на время t_s было прервано одновременно на обоих путях, то графики, приведенные на рис. 94—96, сохраняют свой вид. Если же

приня
по де
форму
Е
в и
то κ_m

где κ_1

и при $t \leq t_n$

Формулой (73) мож-

но пользоваться для

всех случаев, в кото-

рых $t > t_n$. Соответ-

ственно, в тех случаях,

когда $t \leq t_n$, надо поль-

зоваться формулой (74).

На рис. 95, а по-

строена примерная ди-

аграмма зависи-

мости κ_{\max} от t_s . Из

этого рисунка видно,

насколько быстрее

растет κ_{\max} для

тяговой подстанции

($t=1$ ч), чем для

электрической

станции ($t=5$ ч).

Здесь надо огово-

риться, что для

простоты постро-

ение ведется

принять, что движение было прервано только по одному пути, а по другому поезды пропускались равномерно, то κ_{\max} может быть получен при помощи формулы (73) следующим образом.

Если средняя мощность по первому пути, на котором произошел перерыв в движении, равна P_1 , а на втором, где движение поддерживается, — P_2 , то κ_{\max} можно найти из выражения

$$\kappa_{\max} = \frac{\kappa'_{\max} P_1 + P_2}{P_1 + P_2},$$

где κ'_{\max} — коэффициент максимума нагрузки от движения по первому пути

Обозначив $\frac{P_1}{P_2} = c$, получим

$$\kappa_{\max} = \frac{\kappa'_{\max} c + 1}{c + 1}.$$

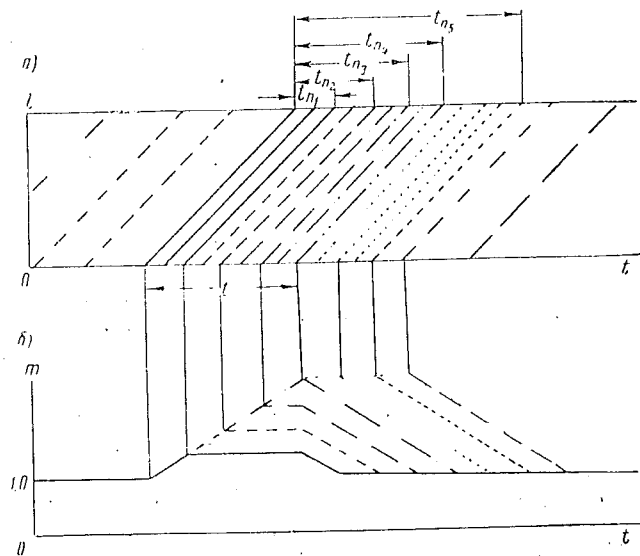


Рис. 96. К характеру образования максимальной нагрузки при движении поездов пакетом

Принимая во внимание формулу (73), можно написать

$$\kappa_{\max} = \frac{\left(\frac{t_g}{t} + 1\right) c + 1}{c + 1}. \quad (76)$$

Соответственное значение κ_{\max} при $t \leq t_n$ будет равно

$$\kappa_{\max} = \frac{\frac{N_0}{N} c + 1}{\frac{N_0}{N} + 1} = \frac{N_0 c + N}{N_0 + N}. \quad (77)$$

В частном случае, если $P_1 = P_2$ ($c = 1$),

$$\kappa_{\max} = \frac{\kappa'_{\max} + 1}{2}.$$

Подставив значение κ'_{\max} из (73), получим

$$\kappa_{\max} = \left(\frac{t_g}{t} + 1 + i\right) \frac{1}{2} = \frac{t_g}{2t} + 1. \quad (77')$$

В случае если по действующему пути организовано двустороннее движение, то значение κ_{\max} займет среднее положение между значениями, даваемыми формулами (73) и (76) или (74) и (77).

Необходимо отметить, что приведенные соображения и графики не имеют отношения к случаям, когда по условиям эксплуатации на данную линию может быть направлен поток поездов со смежного направления, т. е. с другой линии, при длительном перерыве движения на этой смежной линии. В этом случае длительность периода работы на полной пропускной способности может увеличиться во много раз. Такие требования могут быть установлены только в связи со специфическими условиями работы линии и должны быть заданы при проектировании. Естественно, что такие требования нуждаются в соответствующем обосновании, так как удовлетворение их может привести к значительным дополнительным капитальным вложениям, особенно в их натуральном выражении (цветной металл, сложное оборудование и т. п.).

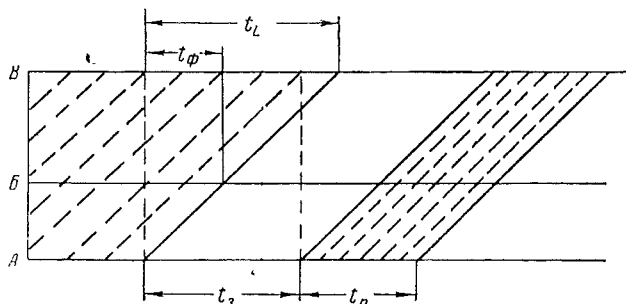


Рис. 97. К определению минимальной нагрузки

Необходимо еще обратить внимание на то, что в некоторых случаях длительность пакета может ограничиваться наличием парка локомотивов данного тягового плеча. При недостаточном числе локомотивов, очевидно, изменяется или длительность пакета, или интервал попутного следования в пакете.

До сих пор нами рассматривались условия, при которых нагрузка получала наибольшее значение. Рассмотрим возможные условия, при которых нагрузка получит минимальное значение, что также необходимо при расчетах энергоснабжения (уровень напряжения).

Как и выше, будем исходить из предположения, что по тем или иным причинам, т. е. в соответствии с проведением ремонтных работ или вследствие непредвиденных обстоятельств, получил место временный перерыв в движении.

Очевидно, именно во время этого перерыва нагрузка и получит минимальное значение. Величина этой минимальной нагрузки будет, так же как и максимальной (рассмотренной выше), зависеть от длительности перерыва в движении, времени хода по рассматриваемой зоне, типа поездов и организации движения.

Если допустить, что перерыв в движении произошел одновременно на обоих путях (рис. 97) и t_{ϕ} (время хода по данной зоне АВ) меньше времени перерыва t_3 , то в течение этого времени нагрузка будет равна нулю. (Минимальные и максимальные нагрузки для расчета уровня напряжения берут обычно длительностью не менее получаса. Здесь мы этого не учитываем).

В этом случае отношение максимальной нагрузки к средней обращается в бесконечность. Если же время хода, например, по зоне электрической станции АВ $t > t_3$ ($t = t_L$), то часть поездов будет находиться в зоне. Приняв, что до перерыва пропускалось среднее число поездов, получим минимальную нагрузку

$$P_{\min} = P_{cp} \frac{t - t_3}{t} \quad (78)$$

Пользуясь этой формулой и формулой (73), можно найти отношение максимальной нагрузки к минимальной.

Если перерыв в движении произошел на одном пути, а на другом поддерживается движение с числом поездов, равным среднему по данному пути,

то для случая, когда перерыв движения произошел на пути со средней мощностью P_1 , получим

$$P_{\min} = P_2.$$

В случае, когда $t_3 < t \left(\frac{N_0}{N_1} - 1 \right)$,

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{\kappa_{\max} P_1 + P_2}{P_2} = \kappa_{\max} c + 1. \quad (79)$$

Если сюда подставить значение κ_{\max} из формулы (73), то

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \left(\frac{t_3}{t} + 1 \right) c + 1. \quad (80)$$

Наконец, когда $t_3 > t \left(\frac{N_0}{N_1} - 1 \right)$,

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} = \frac{N_0}{N_1} c + 1. \quad (81)$$

Аналогично могут быть найдены P_{\min} и $\frac{P_{\max}}{P_{\min}}$ для других исходных условий.

По данным, построенным на основе обработки многочисленных статистических наблюдений [16], это отношение лежит в пределах 2—2,5.

Все приведенные здесь выражения построены на ряде допущений, а результаты, получаемые при пользовании ими, находятся в непосредственной зависимости от исходных положений: времени задержки t_3 (на одном или двух путях она произошла), организации движения до перерыва (и в течение этого перерыва на другом пути, если задержка произошла на одном из путей). Поэтому все, приведенное здесь по этому вопросу, должно рассматриваться как одна из возможных расчетных схем, позволяющих внести некоторую четкость в расчет. Исходные же величины, от которых зависят результаты, могут быть заданы или непосредственно в технических условиях или, если это не предусмотрено техническими условиями, на основе анализа конкретных условий работы данной линии железной дороги.

§ 19. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Основные положения. Питание электрической энергией некоторого электрифицированного участка железной дороги может быть осуществлено при нескольких вариантах системы энергоснабжения, т. е. с различным числом тяговых подстанций, при различном их расположении, разнообразных схемах питания, разном сечении проводов линий передачи и контактной сети и т. д.

При этом варианты могут быть примерно технически равноценны, т. е. все они в одинаковой мере обеспечивают необходимые размеры движения, пропускную и провозную способность, высокую надежность и другие показатели работы участка.

В таком случае для выбора одного из намеченных вариантов не остается никаких других критериев, кроме экономических, если эти варианты различаются величиной капитальных (единовременных) затрат на их создание и ежегодными расходами. Следовательно, вопрос выбора (из числа технически равноценных) наиболее выгодного варианта сводится к весьма широкой и сложной проблеме экономической эффективности капитальных затрат в условиях социалистической системы хозяйства.

Как известно, эта проблема охватывает не только вопросы экономической эффективности создания и расширения отраслей промышленности, но и вопросы эффективности новой техники.

Несмотря на то, что до сих пор проблема эффективности капиталовложений еще не имеет законченного решения, большинство советских экономистов признают, что задача определения экономической эффективности капиталовложений в условиях социалистической системы хозяйства может быть решена только при народнохозяйственном подходе к ней, а не с позиций отдельных предприятий или ведомств. Так, в процессе широких обсуждений вопросов экономической эффективности пришли к выводу, что при оценке эффективности данного варианта должны быть учтены затраты не только на создание проектируемого объекта, но и на развитие отраслей народного хозяйства, сопряженных с этим объектом, в той мере, в какой это вызывается его (варианта) потребностью. В качестве примера указывается на необходимость при проектировании тепловой электростанции учитывать капиталовложения не только в проектируемый объект, но также и в каменноугольные шахты соответствующей производительности [17]. Только при таком подходе возможно правильное планирование капиталовложений в различные отрасли народного хозяйства. Поэтому при определении капитальных затрат на электрификацию железных дорог также необходимо одновременно учитывать и капиталовложения в энергосистему, вызываемые потребностями электрификации данной линии.

Однако в настоящее время вследствие недостаточной разработки вопросов оценки экономической эффективности капиталовложений, обычно отыскивая наименее выгодное решение, ограничиваются рассмотрением последних в пределах данного ведомства, а иногда только данной линии. При таком подходе, конечно, не учитываются интересы смежных отраслей народного хозяйства, а это может повести к неправильным решениям, т. е. не наиболее выгодным для народного хозяйства.

В частности, в проект могут быть заложены дополнительные капиталовложения, материалы и оборудование сверх того, что требуется для нормальной работы данного объекта, например электрифицированной линии. Такие дополнительные вложения, хотя и дают некоторый экономический эффект, но значительно меньший, чем если бы они были вложены, например, в электрификацию других, еще не электрифицированных линий.

Вопросам борьбы с излишними затратами в проектировании уделено специальное внимание в Директивах XX съезда КПСС по шестилетнему плану развития народного хозяйства. Там указывается, что рациональные методы проектирования должны «...ликвидировать излишества в проектировании, приводящие к расточительному расходованию государственных средств». При разработке проектов предлагается «...учитывать новейшие достижения науки и техники, а также наиболее высокие технико-экономические показатели, достигнутые на передовых отечественных и зарубежных предприятиях».

Сравнение вариантов необходимо вести не только по стоимостным, но и по натуральным показателям. Поэтому большое значение приобретает сравнение вариантов по расходам дефицитных цветных металлов и оборудования.

Сравнение вариантов по капиталовложениям и ежегодным расходам. При технико-экономическом выборе оптимального варианта могут встретиться различные сочетания технических и экономических качеств проектируемого сооружения. В том случае, когда технически наиболее целесообразный вариант или хотя бы близкий по техническим качествам к другим вариантам, участвующим в сравнении, требует наименьших капиталовложений и обеспечивает наименьшие ежегодные расходы в эксплуатации, задача выбора оптимального варианта чрезвычайно упрощается, так как такой вариант будет по всем признакам наименее выгодным.

Более сложным является положение, при котором вариант в техническом отношении значительно более ценный, требует больших капитальных вложений и ведет к увеличению ежегодных расходов. В таком случае, очевидно, только путем общего сравнения всех качеств вариантов, не поддающихся денежной оценке (запасов прочности, степени резервирования, потребности в дефицитных материалах и т. д.), вопрос может быть решен в пользу того или иного варианта.

Наиболее часто при технико-экономических расчетах для сравнения двух (или нескольких) в техническом отношении достаточно равноценных вариантов оказывается, что вариант, дающий снижение ежегодных расходов, требует более высоких капитальных затрат.

Лучшим примером этому является расчет проводов контактной сети. Подвеска проводов большего сечения, т. е. увеличение капитальных затрат, приводит к снижению потерь энергии и в определенных пределах увеличения сечения проводов сети — к снижению общих ежегодных расходов. В результате при выборе варианта возникает необходимость сопоставления капиталовложений, т. е. единовременных затрат и ежегодных расходов.

Так как единовременные затраты измеряются рублями, а ежегодные расходы — *руб/год*, то для их сопоставления необходим дополнительный критерий, при помощи которого можно было бы приводить одни расходы к другим (к одной и той же размерности), позволяя тем самым решить вопрос о наивыгоднейшем варианте.

В настоящее время в качестве критерия экономической выгодности сравниваемых вариантов, в которых увеличение капиталовложений сопровождается снижением ежегодных расходов, принимают отношение разности капиталовложений по двум вариантам к разности ежегодных расходов по их эксплуатации.

Если K_1 и K_2 — капиталовложения по первому и второму вариантам;
 E_1 и E_2 — соответствующие ежегодные расходы, то при $K_1 < K_2$
и $E_1 > E_2$ значение этого критерия определится выражением

$$\frac{K_2 - K_1}{E_1 - E_2} = t_{1,2}. \quad (82)$$

Очевидно, что это отношение имеет размерность времени (годы) и его называют сроком окупаемости, так как оно показывает, в какое число лет превышение капиталовложений по второму варианту окупается экономией в ежегодных расходах.

Если в результате расчета принимается вариант с большими капиталовложениями, то коэффициент $t_{1,2}$ показывает также, какой дополнительной единовременной затратой (в рублях) достигается каждый рубль экономии в ежегодных расходах. Если же выбран вариант с меньшими капиталовложениями, тот же коэффициент выражает размеры экономии в капитальных затратах на каждый рубль получающегося повышения ежегодных расходов.

Формулу (82) иногда представляют в другом виде.

Взяв обратное отношение, получим

$$\frac{E_1 - E_2}{K_2 - K_1} = \frac{1}{t_{1,2}} = \delta_{1,2}. \quad (82')$$

Величину δ называют экономической эффективностью, или коэффициентом относительной экономической эффективности.

Из формул (82) и (82') ясно видно, что чем меньше срок окупаемости (или чем больше коэффициент экономической эффективности), тем скорее дополнительно вложенные в более дорогой вариант капиталовложения возвращаются народному хозяйству и могут быть вновь использованы для его дальнейшего развития.

Наоборот, при большом сроке окупаемости (или соответственно малом коэффициенте экономической эффективности) дополнительные капиталовложения будут возвращены государству не так скоро, но зато в последующем более дорогой вариант будет требовать меньших ежегодных расходов.

Очевидно, если бы имела место установленная (нормированная) величина расчетного срока окупаемости T , тогда условием выгодности более дорогого варианта было бы следующее положение:

$$t_{1,2} < T, \quad (83)$$

или

$$\delta_{1,2} > \Delta,$$

(83')

где $\Delta = \frac{1}{T}$.

Отказ от такого критерия практически приводит к сравнению вариантов только по ежегодным расходам, в которых вкладываемые капиталы оцениваются только амортизационными отчислениями. Однако, если бы каждое предприятие приносило доход только в размерах, могущих покрыть ежегодные расходы, то ни о каком расширении хозяйства не могло бы быть и речи.

Само собой разумеется, что при таком подходе преимущества получает вариант с наименьшими ежегодными расходами. Но стремление к минимуму ежегодных расходов, как правило, приведет к выбору вариантов, требующих настолько больших капиталовложений, что осуществлять их будет нерационально или даже невозможно, принимая во внимание ограниченность фондов,

выделяемых для развития данной отрасли народного хозяйства из общих фондов.

Рассмотрим несколько подробнее вопросы, связанные с применением указанного критерия в проектной практике.

Если преобразовать выражение (82), то можно получить

$$K_1 + E_1 t_{1,2} = K_2 + E_2 t_{1,2}.$$

Каждая часть этого выражения представляет собой сумму

капитальных затрат по данному варианту с ежегодными расходами за $t_{1,2}$ лет (подобная связь может быть найдена между любой парой вариантов). Такую сумму называют условными капиталовложениями, т. е.

$$K_y = K + Et. \quad (84)$$

Таким образом, условные капиталовложения представляют собой расходы на сооружение в течение t лет. Если представить графически зависимость условных капиталовложений для каждого варианта от времени, то мы получим ряд прямых, где K будет отрезок на оси ординат, а E — угловой коэффициент этих прямых (рис. 98).

Здесь $t_{1,2}$ — число лет, за которое уравниваются расходы по 1-му и 2-му вариантам;

$t_{1,3}$ — то же по 1-му и 3-му вариантам;

$t_{2,3}$ — то же по 2-му и 3-му вариантам.

В данном примере

$$K_1 < K_2 < K_3 \text{ и } E_1 > E_2 > E_3.$$

Преобразуя выражение (82'), найдем, что

$$K_1 \delta_{1,2} + E_1 = K_2 \delta_{1,2} + E_2.$$

Подобно условным капиталовложениям сумму каждой части этого равенства называют условными ежегодными расходами, т. е.

$$E_y = E + K\delta. \quad (84')$$

Это выражение представляет собой сумму действительных ежегодных расходов с частью капиталовложений, распределенных на t лет.

На рис. 99 показано изменение условных ежегодных расходов для каждого варианта, подобно тому, как это сделано для условных капиталовложений.

В настоящее время при проектировании системы энергоснабжения электрических железных дорог поступают следующим образом. Если установлено, что в данный период наиболее выгодным является срок окупаемости $T = T_1$, лежащий в пределах от 0 до $t_{1,2}$, то оптимальным оказывается 1-й вариант, так как $t_{1,2} > T_1$. Если заданный срок окупаемости $T = T_2$ лежит в интервале $t_{1,2} \div t_{1,3}$, то 2-й вариант оказывается более выгодным, чем 1-й, так как $t_{1,2} < T_2$. При этом условии переходить к следующему (3-му) варианту нецелесообразно, так как $t_{2,3} > T_2$.

Если бы при заданном сроке окупаемости $T = T_3$ оказалось, что $t_{2,3} < T_3$, то это говорило бы о целесообразности перехода от второго варианта к 3-му. При таком подходе если $t_{2,3}$ оказывается меньше заданного значения T , то наиболее выгодный вариант рекомендуется искать в области еще больших капитальных затрат.

Этот подход и выдвинул определенное требование к последовательности сравнения вариантов. Если один вариант отличается от другого таким образом, что при своем развитии 1-й вариант сначала переходит во 2-й, а затем в 3-й, то во избежание ошибки необходимо идти последовательно, т. е. сравнивать n -й вариант только с $n-1$ -м, т. е. не сравнивать между собой непосредственно такие варианты, между которыми могут лежать другие с промежуточными параметрами.

Если принять некоторое значение срока окупаемости за заданное (нормированное), то условие выгодности любого последующего варианта будет иметь вид

$$\frac{K_{i+1} - K_i}{E_i - E_{i+1}} < T = \frac{1}{\Delta}, \quad (85)$$

где T — заданное значение срока окупаемости;

Δ — соответствующее значение коэффициента экономической эффективности.

Отсюда можно написать

$$K_{i+1} + E_{i+1} T < K_i + E_i T, \quad (86)$$

или

$$E_{i+1} + K_{i+1} \Delta < E_i + K_i \Delta. \quad (86')$$

Иначе говоря, имея в виду обозначения, принятые выше [см. формулы (84) и (84')], условие выгодности любого последующего варианта принимает вид

$$K_{y(i+1)} < K_{y(i)}, \quad (87)$$

или

$$E_{y(i+1)} < E_{y(i)}. \quad (87')$$

Таким образом, при заданном (нормированном) сроке окупаемости тот вариант должен быть признан оптимальным, для которого условные капиталовложения или условные ежегодные расходы являются наименьшими.

Условные ежегодные расходы могут быть определены по следующей формуле:

$$E_y = E_s + \alpha K + K\Delta,$$

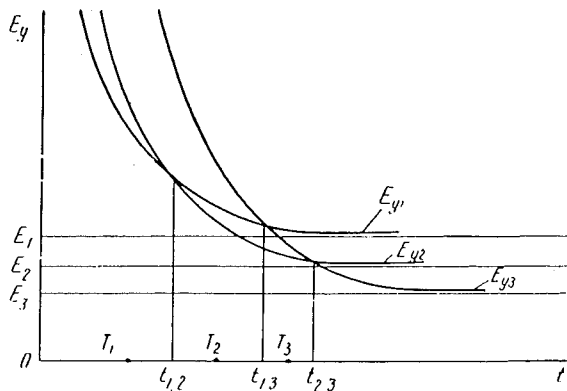


Рис. 99. График $E_y = \varphi(t)$

или

$$E_y = E_s + (\alpha + \Delta) K, \quad (88)$$

где E_s — ежегодные эксплуатационные расходы по рассматриваемому варианту сооружения;

α — амортизационная квота в долях единицы.

Остальные обозначения те же, что и выше.

Аналогично могут быть подсчитаны и условные капиталовложения

$$K_y = K + (E_s + \alpha K) T,$$

или

$$K_y = K(1 + \alpha T) + E_s T. \quad (88')$$

В некоторых случаях искомый параметр может получать или сколько угодно большое число значений или, с учетом практических соображений, если и не бесконечное, то все же столь большое, что использовать описанный выше метод выбора варианта становится неудобным. В этом случае возникает задача, которую называют «определением оптимального параметра», и наиболее ярким примером ее является выбор оптимального сечения проводов, передающих каким-либо потребителям электрическую энергию.

Для решения такой задачи используем условие (87) или (87').

Если

$$E_y = f(x),$$

или

$$K_y = \varphi(x),$$

т. е. если капиталовложения и ежегодные расходы по проектируемому сооружению зависят только от изменения основного параметра сооружения (обозначенного выше через x), а последний может в некоторых пределах принимать любые значения, то условие выгодности некоторого варианта сооружения по сравнению с остальными будет

$$E_y = f_{\min}(x) = f(x'),$$

или

$$K_y = \varphi_{\min}(x) = \varphi(x'),$$

где x' — значение параметра, определяющее наивыгоднейший вариант сооружения (при значении $x = x'$ функция принимает наименьшее значение).

Электрификацию железных дорог можно рассматривать как новую технику на железнодорожном транспорте. Согласно же существующим воззрениям экономическая эффективность внедрения новой техники определяется достижением наименьшего срока окупаемости при наименьших капитальных вложениях. Другими словами, чем меньше срок окупаемости капитальных вложений, при которых удастся решить поставленную задачу, тем, при прочих равных условиях, эффективнее новая техника. Вместе с тем вопрос о целесообразности внедрения того или другого варианта новой техники может быть решен только в том случае, если заранее будут установлены предельно допустимые значения срока окупаемости (или, соответственно, коэффициента экономической эффективности).

Вопрос установления наивыгоднейшего срока окупаемости для различных отраслей народного хозяйства чрезвычайно сложен и поэтому нормированной величины срока окупаемости (или, что то же, коэффициента относительной экономической эффективности) не установлено, да и вряд ли она может быть установлена как единая для любых отраслей хозяйства и на все время.

Отметим, что на железнодорожном транспорте СССР при сопоставлении проектных вариантов обычно принимают срок окупаемости 8—10 лет. Другими словами, если некоторое запланированное мероприятие может быть выполнено в различных вариантах и рассматриваемый вариант обеспечивает возврат

дополнительных капиталовложений за счет экономии в ежегодных расходах в сроки, не превышающие 8—10 лет, то его считают целесообразным. В противном случае останавливаются на другом техническом решении, требующем меньших капитальных затрат.

Таким образом, установленный срок окупаемости указывает тот предел, выше которого идти по пути вложения капитальных затрат не следует. Но это не значит, что к этому пределу во всех случаях следует стремиться. Как известно, электрификация железнодорожной линии окупается в 2,5—3 года, т. е. в срок, значительно меньший, чем установленный на железнодорожном транспорте; это происходит вследствие высокой эффективности электрификации железных дорог. Малые сроки окупаемости электрификации совершенно справедливо отмечаются как одно из главнейших достоинств этого пути усиления провозной способности транспорта. Такая оценка малых сроков окупаемости соответствует установившимся воззрениям, что новая техника тем эффективнее, чем меньше потребные капиталовложения и срок их окупаемости.

Само собой разумеется, что электрификацию железных дорог можно выполнить и при больших размерах капиталовложений, получив при этом еще некоторое дополнительное уменьшение ежегодных расходов. Например, можно было бы увеличить сечение проводов и число подстанций; то и другое привело бы к уменьшению потерь энергии и потерь напряжения, а последнее, в свою очередь, к некоторому увеличению скорости движения поездов. Посмотрим, к каким выводам мы придем, если будем руководствоваться при выборе варианта электрификации заданным сроком окупаемости (8—10 лет) не как предельным, а как оптимальным.

Пусть на основе действующих методов спроектирована электрификация некоторой линии железной дороги. Согласно расчету на каждые 100 км длины получилось по 4 тяговых подстанции с пятью агрегатами каждая при сечении проводов 320 мм². Пусть также согласно расчетам полученная экономия в годовых расходах по сравнению с паровой тягой окупает все капиталовложения, связанные с электрификацией в 3 года. При этом обеспечиваются все запланированные перевозки и бесперебойная работа. Если же исходить из установленного для железнодорожного транспорта срока окупаемости 8—10 лет, т. е. считать его оптимальным, к которому следует стремиться, то следовало бы еще продолжать вкладывать дополнительные средства в электрификацию для дальнейшего уменьшения ежегодных расходов, пока срок окупаемости капиталовложений не достигнет 8—10 лет.

В результате таких действий срок окупаемости электрификации железнодорожной линии будет увеличен, а эффективность капитальных затрат искусственно уменьшена. Другими словами, при таком подходе дополнительные капиталы, особенно дефицитные металлы и оборудование, пришлось бы вкладывать в уже электрифицированную линию (или в ту, которая может быть электрифицирована без этих металлов и капиталовложений) вместо того, чтобы вложить их во вновь электрифицируемые участки железной дороги, т. е. теми же средствами электрифицировать большую длину железных дорог.

Надо помнить, что эти денежные и материальные вложения на новых электрифицированных линиях окупятся в значительно более короткий срок. Отсюда ясно, что с народнохозяйственной точки зрения в целях ограничения капитальных вложений, особенно в их натуральном выражении, наиболее выгодной является электрификация железных дорог с минимальными капиталовложениями и минимальным сроком окупаемости. При этом система энергоснабжения должна проектироваться и сооружаться таким образом, чтобы в дальнейшем была возможность усиливать ее элементы.

Посмотрим, как будет влиять выбор какого-либо элемента электрической железной дороги по сроку окупаемости, отличному от срока окупаемости электрификации железных дорог.

Пусть электрификация некоторой железнодорожной линии спроектирована так, что все элементы выбраны исходя из одного и того же срока окупаемости t_1 и общий срок окупаемости всех затрат при электрификации рассматриваемой линии также равен t_1 .

Это значит, что

$$\frac{\Delta K_1}{\Delta E_1} = t_1,$$

где ΔK_1 — капиталовложения, связанные с электрификацией рассматриваемой линии железной дороги;

ΔE_1 — экономия в эксплуатационных расходах, связанная с электрификацией этой линии.

Предположим теперь, что решено вложить дополнительные средства в один из элементов электрифицированной линии для дальнейшего увеличения экономической эффективности ее электрификации. Пусть эти дополнительные вложения равны ΔK_2 и дают экономии в эксплуатационных расходах ΔE_2 . При этом

$$\frac{\Delta K_2}{\Delta E_2} = t_2.$$

Теперь полные затраты будут равны

$$\Delta K_1 + \Delta K_2,$$

а экономия ежегодных расходов

$$\Delta E_1 + \Delta E_2.$$

Нас интересует новый срок окупаемости всего сооружения в целом, т. е. отношение

$$\frac{\Delta K_1 + \Delta K_2}{\Delta E_1 + \Delta E_2} = t'_1.$$

Это выражение может быть представлено в таком виде:

$$t'_1 = t_1 + \frac{\Delta E_2}{\Delta E_1 + \Delta E_2} (t_2 - t_1). \quad (89)$$

Очевидно, что при $t_2 > t_1$ и $\Delta E_2 > 0$, $t'_1 > t_1$. Если же $t_2 < t_1$, т. е. если этот элемент был выбран по меньшему сроку окупаемости, чем все сооружение, и $\Delta E_2 < 0$, т. е. переход от t_1 к t_2 дает увеличение ежегодных расходов, то как показывает уравнение (89), и в этом случае $t'_1 > t_1$.

Таким образом, можно сделать весьма интересный вывод: всякое отклонение в сроке окупаемости при выборе отдельных элементов комплексного сооружения (например электрификации железных дорог) от общего срока окупаемости всего сооружения приводит к увеличению этого общего срока окупаемости.

Если в нашем примере срок окупаемости капиталовложений в электрификацию равнялся трем годам, то выбор некоторого элемента системы энергоснабжения, исходя из другого срока окупаемости (например 8—10 лет), приводит к увеличению срока окупаемости электрификации, а следовательно, может расцениваться как отрицательное явление и допускаться только в том случае, если к этому есть особые основания.

§ 20. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Энергосистема. В объем данного курса не входит выбор параметров устройств энергетической системы. Однако определение ряда показателей тяговой нагрузки, без которых не может производиться расчет элементов энергосистемы, должно быть здесь рассмотрено.

Прежде всего должно определяться значение максимальной нагрузки P_{\max} , без которого невозможно определить необходимую мощность элементов энергосистемы. Эта же величина необходима также и для определения максимальных потерь и отклонений напряжения, которые могут возникнуть на вводах тяговых подстанций. Для этой же цели необходимо знать и величину возможной минимальной нагрузки P_{\min} .

Эти величины могут быть определены либо на основе специальных указаний соответствующих технических условий о расчетных режимах движения, или, если таких указаний нет, на основе анализа режимов работы рассматриваемой линии. После того как заданы или выбраны соответствующие исходные данные, эти величины можно определять по формулам, предложенным в § 18.

Для энергосистемы большое значение имеет величина коэффициента попадания в максимум. К сожалению, приходится считаться с тем, что максимум мощности электрической железной дороги может возникнуть в любой период суток и, следовательно, попасть в часы максимума нагрузки электрической станции и энергосистемы. Однако это попадание может быть редким. По существу здесь следовало бы установить ту вероятность появления максимума, с которой следует считаться тем или иным образом. При этом очень редко возникающий максимум можно было бы обеспечивать за счет потребителей-регуляторов, т. е. потребителей, которые по роду своей работы не несут ущерба при временном перерыве в снабжении их энергией.

При более часто повторяющихся попаданиях максимума тяговой нагрузки в часы максимума энергосистемы, т. е. при достаточно большой вероятности такого совпадения максимумов, следует предусмотреть дополнительную мощность питающих устройств.

Возникает также вопрос определения суммарной нагрузки тяговых и районных потребителей.

Проведенное исследование [18] показало возможность с достаточной степенью точности оценивать сочетание тяговой и районной нагрузок, исходя из того, что и суммарную нагрузку можно рассматривать как случайную величину. На этом основании можно выбирать соответствующее расчетное значение нагрузок.

При расчетах питающих линий одной из необходимых величин является значение T_{\max} . Определяется оно легко, если известна величина P_{\max} или K_{\max} (см. § 17 и 18).

Тяговые подстанции. При проектировании системы энергоснабжения чаще всего, прежде чем определять мощность тяговых подстанций, следует решить вопрос о их размещении на рассматриваемом участке.

Само собой разумеется, что при одной и той же интенсивности движения, для одного и того же участка, т. е. при всех прочих равных условиях, можно осуществить питание его от различного количества тяговых подстанций при различном их расположении. С увеличением числа подстанций, питающих один и тот же участок (т. е. с уменьшением расстояний между ними), сечение проводов контактной сети может быть уменьшено, так как уменьшаются потери энергии. В результате затраты на контактную сеть уменьшаются. С другой стороны, если конструктивное решение подстанций не изменится, т. е. увеличение их числа не позволит, например, резко упростить эти подстанции, то затраты на их сооружение увеличатся. Это объясняется тем, что при увеличении числа подстанций растет суммарная стоимость устройств, не зависящих или почти не зависящих от рабочей мощности подстанций. При этом изменяется и сумма расходов по обслуживанию подстанций. В общем случае с изменением числа и расположения подстанций изменяются и расходы, связанные с питанием их от энергосистем. Эти расходы, как и часть других, изменяются не плавно, а скачками, в зависимости от местных условий. Так, расходы по энергосистеме, по водоснабжению, расходы, связанные с возможностью использования жилых зданий для персонала и т. п., — все это зависит от конкретных условий.

Однако, если отрешиться от ряда специфических местных условий, то можно составить формулы, которые дадут возможность для любого случая определять наиболее выгодное расстояние между подстанциями. Чаще всего такая задача решается построением графика зависимости стоимости сооружения подстанций от расстояния между ними. Такой график имеет обычно U-образный характер, что дает возможность установить наиболее выгодный вариант, соответствующий минимуму капиталовложений или ежегодных расходов. Такие исследования с позиций действующих в то время технических условий на проектирование проводились и публиковались [19, 20]. Несмотря на удобство такого решения, в практике проектирования оно до сих пор применения не нашло. Если бы не было никаких соображений, вынуждающих рассчитывать тяговые подстанции на железнодорожных станциях, и мощность, потребляемая поездами, распределялась вдоль линии равномерно, тогда такие методы выбора оптимального расстояния между подстанциями, безусловно, получили бы применение. Однако до сих пор применяемая в нашей стране централизованная схема питания с мощными многоагрегатными тяговыми подстанциями, имеющими обслуживающий персонал, требующий размещения их на станциях (условия жизни персонала, подъездные пути и пр.). Применяемые в настоящее время агрегаты (на подстанциях постоянного тока) требуют водяного охлаждения, что делает необходимым постройку водопровода. Если еще добавить то обстоятельство, что на станциях имеются различные потребители электрической энергии, которые удобно питать от здесь же расположенных подстанций и воспринимать пусковые и прочие тяговые нагрузки, возникающие на станциях, при этом удобнее и экономичнее, то станет ясно, что выдерживать некоторое «наиболее выгодное» расстояние между подстанциями при указанных условиях не удастся. Можно считать, что такие методы сохраняют

интерес для предварительных расчетов или обобщенных экономических исследований. В проектной практике обычно пользуются другим методом: составляют ряд технически более или менее равноценных вариантов расположения подстанций и для них выполняют расчеты настолько подробно, насколько это необходимо для правильной оценки основных технических и экономических показателей рассматриваемых вариантов. Далее сопоставляют эти показатели отдельных вариантов и выбирают (на основе рекомендаций, данных в § 19) наиболее целесообразный.

Однако развитие техники позволяет утверждать, что в ближайшем будущем будет возможно применение методов, дающих аналитическое выражение наимыгоднейшего расстояния между подстанциями. Это явится следствием освоения и применения для дорог постоянного тока запаянных ртутных выпрямителей с воздушным охлаждением или мощных полупроводниковых, а также внедрением схемы распределенного питания с однотипными автоматическими и телеуправляемыми подстанциями. Для системы переменного тока эти условия еще проще.

Выбор мощности тяговых подстанций, если последние не предполагаются однотипными с заранее установленной мощностью, что имеет место при системе распределенного питания, должен производиться при выбранном их расположении на участке.

Основными элементами тяговых подстанций, мощность которых выбирается при проектировании системы энергоснабжения, являются трансформаторы и преобразователи или только трансформаторы.

Хотя каждый преобразовательный агрегат состоит из двух элементов — трансформатора и преобразователя, работающих в одном и том же режиме, все же следует отдельно рассматривать влияние действия нагрузок и их изменения на трансформаторы и преобразователи, так как природа этого влияния совершенно различна. Нагрузки по характеру их влияния можно разделить на мгновенные и длительные.

При длительной работе трансформатора в его обмотках выделяется некоторое количество тепла. Под влиянием этого тепла происходят необратимые процессы в материале изоляции (понижающие ее качество), которые называют старением изоляции. В настоящее время принято, что при нормальной расчетной нагрузке трансформаторов изоляция их обмоток должна служить 16—20 лет. При нагрузках же, вызывающих превышение температуры сверх допустимой, происходит ускоренное старение изоляции, в результате чего трансформатор может выйти из строя раньше нормального срока службы.

Для потребителей с устойчивым суточным графиком нагрузки представляется возможным выбрать необходимую мощность трансформаторов по условиям старения изоляции, т. е. по заданному сроку его службы [21]. Для трансформаторов тяговых подстанций на дорогах постоянного и переменного тока, т. е. в условиях, когда не существует определенного графика нагрузки, этот метод непосредственно использован быть не может. Поэтому для решения такой задачи необходимо располагать специальным методом расчета срока службы трансформатора. Такой метод в последнее время разрабатывается в научных организациях, но еще не получил применения в проектной практике. Поэтому до некоторого времени расчет мощности преобразовательных агрегатов ведется на основе допускаемых норм нагрузок в зависимости от их длительности.

Менее ясным является вопрос об оценке нагрузочной способности ртутных выпрямителей. Для решения этого вопроса должны еще быть проведены длительные исследования. Поэтому практически в настоящее время нет другой возможности для оценки нагрузочной способности ртутных преобразователей, как непосредственное сопоставление максимальных (длительных) нагрузок с нормами.

Выше уже отмечалось, что нагрузка тяговых подстанций в течение суток изменяется в широких пределах и были приведены графики изменения средне-

получасовых нагрузок (см. рис. 77). Внутри этих получасовых периодов наблюдаются резкие и частые изменения нагрузки (рис. 43).

Кратковременные значительные перегрузки могут в результате динамического воздействия на обмотки трансформаторов привести к их повреждению, в ртутных же преобразователях — к обратным зажиганиям. Поэтому при проектировании системы энергоснабжения необходимо проверять допустимость возможных кратковременных перегрузок при выбранной мощности тяговых подстанций. Такая проверка выполняется также путем сопоставления с нормами допускаемых перегрузок.

Существующие нормы допускаемых длительных и кратковременных нагрузок на агрегаты (составленные из трансформаторов и ртутных преобразователей) после продолжительной их работы с номинальной нагрузкой различны. При этом надо иметь в виду, что если номинальная мощность трансформатора или преобразователя рассчитана без запаса, то после длительной нагрузки, равной номинальной, увеличение нагрузки не может быть допущено. Отсюда следует, что если заводом гарантируются перегрузки различной длительности (здесь речь идет о длительных режимах), то это указывает лишь на то, что агрегат в действительности имеет допускаемую длительную нагрузку выше указанной номинальной, т. е. имеет скрытый резерв мощности. Поэтому, полагаясь на обычно гарантируемые величины перегрузок, нельзя приписывать при сравнении преобразователей особые качества тем из них, которые выдерживают большие перегрузки. Другими словами, всегда имеется возможность установить любые нормы перегрузок (при соответствующем удорожании машины), и поэтому только в совокупности с экономическими, а также с другими техническими показателями данные о перегрузках могут быть оценены правильно.

При существующем характере норм неудобство выбора мощности агрегата по различным допускаемым перегрузкам заключается еще и в том, что в нормах даются только определенные комбинации величины и продолжительности допускаемой нагрузки. Вследствие этого вопрос о допустимости других возможных комбинаций длительности и величины нагрузок остается открытым, а это, как правило, ведет к выбору мощности с излишним запасом.

Значительно точнее можно было бы выбирать необходимую мощность агрегатов, располагая методом, который давал бы возможность устанавливать, на какую величину и в течение какого времени надо работать с нагрузкой ниже номинальной, чтобы можно было допустить перегрузку определенной величины и длительности.

В табл. 11 приведены технические данные для ртутных выпрямителей, применяемых в настоящее время.

В известной мере на основе этих данных можно выбирать и другое сочетание нагрузок, если может быть доказано, что это сочетание не создает более тяжелых условий работы для трансформаторов и преобразователей по сравнению с нагрузкой, соответствующей приведенным нормам.

Так, исходя из технических данных ртутных выпрямителей (табл. 11), при которых разрешается сколько угодно долго работать при режиме чередующихся номинальной I_n (3 ч) и полуторной (2 ч) нагрузок, можно среднюю допустимую нагрузку считать равной

$$I_{\text{дл}} = \frac{2 \cdot 1,5 + 3 \cdot 1}{5} I_n = 1,2 I_n.$$

Иначе говоря, при постоянной нагрузке, равной 1,2 от номинальной, агрегат будет работать в более легких условиях (по нагреву), чем допускается указанными нормами. Очевидно, без какого-либо ухудшения условий работы агрегатов можно допустить ряд комбинаций нагрузок в пределах допустимых по нормам, например, как показано в табл. 12.

В соответствии с приведенными нормами методы расчета системы энергоснабжения должны дать возможность определять длительные нагрузки и возможные кратковременные перегрузки.

Таблица 11

Технические данные ртутных выпрямителей РМНВ завода «Уралэлектроаппарат»

Тип выпрямителя	Номинальные напряжения на стороне постоянного тока в в	Номинальный ток в а	Допустимые перегрузки по току		
			Перегрузка в % от номинальной	Продолжительность перегрузки	Интервал между перегрузками в ч
РМНВ-500	600	500	} 25 50 100	15 мин 2 » 10 сек	2 1 *
РМНВ-1000	600	1 000			
РМНВ-1000×2	600	2 000			
РМНВ-1000×2	825	1 800			
РМНВ-500×6	600	3 000	} 25 50	10 мин 1 »	2 1
РМНВ-500×12	600	6 000			
РМНВ-500×6	825	2 500			
РМНВ-500×12	825	5 000			
РМНВ-750×6М	3 300	1 125**	} 50 200	2 ч 1 мин	3 3***
РМНВ-500×6	1 650	1 000			
РМНВ-500×12	1 650	2 000			
РМНВ-500×6	3 300	500			
РМНВ-750×6	3 300	1 000			

* Интервал между перегрузками должен быть таким, чтобы среднеквадратичное значение выпрямленного тока за 1 мин не превысило номинального.

** Этот тип выпрямителя только намечен к изготовлению.

*** Перегрузку в 200% выпрямитель должен выдерживать как после длительной нагрузки током, равным номинальному току, так и в период 50%-ной перегрузки.

Длительные нагрузки определяют, как среднеквадратичные или эффективные, т. е. равноценные колеблющейся нагрузке по количеству выделяемого ими тепла. Такой способ, конечно, не отражает старения изоляции, так как зависимость износа изоляции от температуры и, следовательно, от тока, значительно более сложна, однако такой способ все же дает меньшую ошибку, нежели расчет по средней нагрузке.

Таким образом, для определения потребной мощности тяговых подстанций необходимо определять эффективные (среднеквадратичные) значения нагрузки, приходящейся на данную

подстанцию, за период такой длительности, при которой недопустима перегрузка. Как следует из изложенного, длительность такого периода может быть принята 5 ч. Определенная таким образом нагрузка не должна превышать длительно допускаемую нагрузку на трансформаторы и преобразователи, определяющие рабочую мощность тяговых подстанций.

Кроме того, должны определяться возможные максимальные кратковременные нагрузки. Эти нагрузки также не должны превосходить величин, допускаемых приведенными нормами.

При применении на рассматриваемой железнодорожной линии рекуперативного торможения приходится при проектировании, кроме расположения тяговых подстанций, их мощности и типа агрегатов, выбирать также устройства для приема избыточной энергии рекуперации.

Выбор типа приемного устройства следует производить исходя из сопоставления дополнительных капиталовложений и размеров экономии ежегодных расходов, т. е. по рекомендациям, данным в § 19.

При этом, если различные приемные устройства в одинаковой мере надежно обеспечивают прием наибольших необходимых токов рекуперирующих локо-

Таблица 12

Длительность допустимой нагрузки в ч	Кратность по отношению к I_n	Необходимая длительность периода работы с нагрузкой, не превышающей номинальной I_n между перегрузками, в ч
2	1,5	3
3	1,33	2
4	1,25	1
5 и больше	1,2	0

мотивов и необходимое количество энергии рекуперации; то основными показателями для сравнения могут быть: стоимость устройства, величина избыточной энергии рекуперации при нем и характер использования этой избыточной энергии. Как показывает практика работы электрифицированных железных дорог (а также расчеты), на грузонапряженных участках постоянного тока, и особенно на двухпутных линиях, наиболее целесообразно применение балластных сопротивлений (реостатов), так как при густом движении избыточная энергия рекуперации получается малой и нет смысла в сложных устройствах для переработки этой энергии на тяговых подстанциях для передачи в первичную сеть.

Определение максимальных нагрузок питающих фидеров. Выше, при описании схем питания контактной сети, отмечалось, что фидеры присоединяются к шинам тяговых подстанций через быстродействующие автоматические выключатели. Для того чтобы эти выключатели не отключали максимальных нагрузок, возникающих при расчетных режимах, необходимо соответствующим образом отрегулировать уставки выключателей. Но для того чтобы это выполнить, необходимо знать максимальные значения нагрузки фидерных выключателей. Поэтому при расчетах системы энергоснабжения, наряду с другими величинами, определяются и максимальные токи фидеров.

Сечение проводов контактной сети. При протекании тока по проводам сети часть энергии рассеивается и для потребителя является потерянной, почему она и получает условное название «потери энергии». Количество этой энергии находится в непосредственной зависимости от поперечного сечения и материала (удельного сопротивления) проводов.

Исходя из этого, задача выбора наивыгоднейшего сечения проводов контактной сети, или, как его называют, экономического, получит совершенно тот же характер, что и выбор экономического сечения для всяких других воздушных линий. Его можно рассматривать как минимум экономического сечения проводов.

С увеличением сечения проводов уменьшаются потери энергии, но зато увеличиваются капитальные затраты на сеть и в связи с этим растут ежегодные амортизационные отчисления. Если обратить еще внимание на то, что с увеличением сечения стоимость сети довольно равномерно растет, а экономия потерь энергии падает, то станет ясно, что в процессе изменения сечения провода при некотором его значении будет достигнут оптимум, при котором условные ежегодные расходы или условные капиталовложения будут наименьшими. Весьма существенным при таком расчете является правильное установление исходных положений для определения расходов.

Изменение сечения проводов, вызывая изменение потерь энергии, вслед за этим вызывает и изменение соответствующих расходов в энергосистеме. При уменьшении сечения проводов контактной сети потребуются от энергосистемы увеличение мощности, необходимой для покрытия возросших потерь энергии, что потребует дополнительных капиталовложений. Правильный расчет, исходящий из интересов народного хозяйства в целом, должен учитывать это обстоятельство. Однако в настоящее время в проектной практике расчет эффективности капиталовложений в электрификацию ведется без учета вложений в энергосистему. В соответствии с этим в расчет вместо действительной стоимости энергии вводится отпускная цена (по тарифу). Такой подход имеет место только вследствие недостаточного развития методов расчета экономической эффективности капиталовложений и должен рассматриваться как первое приближение к решению задачи.

При существующем методе выбора сечения проводов для линий передач принимается к расчету себестоимость потерь энергии с учетом дополнительных капиталовложений в систему, вызванных увеличением потерь энергии. На основе этого метода созданы нормы экономических плотностей тока.

Насколько существенную роль играют затраты на дополнительную мощность в энергосистемах при определении допустимой плотности тока (или допустимых потерь энергии), видно хотя бы из ПУЭ [1]. В пункте 1-3-24 этих

Правил рекомендуется при максимуме токовой нагрузки в ночное время экономическую плотность тока повышать на 40%, иначе говоря, в таких случаях рекомендуется понижать экономическое сечение на 40%.

Если теперь для контактной сети, представляющей следующую ступень линии, передающей энергию, применить иной метод расчета (учитывающий стоимость потерь энергии по отпускной цене и с другим сроком окупаемости), то в результате будут допущены различные потери энергии на единицу сечения. Такое положение явно невыгодно для народного хозяйства в целом, так как если, не изменяя общего расхода цветного металла, перевести часть его из линии с меньшими удельными потерями в линию с большими так, чтобы потери стали одинаковыми, то при том же расходе цветного металла суммарные потери энергии уменьшатся. Наоборот, можно, сохранив те же потери энергии, сэкономить некоторое количество цветного металла.

Все это говорит о целесообразности единой методики выбора сечения проводов линий передачи и контактной сети.

Для выбора сечения проводов контактной сети можно применить методику, по которой выбирают сечение проводов районных сетей и линий передачи, несколько изменив исходные величины. Дело в том, что непосредственно воспользоваться экономическими плотностями тока для выбора сечения провода контактной сети не представляется возможным из-за иных условий работы контактных сетей электрифицированных железных дорог. Это различие определяется тем, что ток в проводах контактной сети неодинаков по ее длине и непрерывно изменяется. В сетях же, для которых предусмотрена норма экономической плотности тока, нагрузки расположены в конце линии одного и того же сечения. Поэтому наиболее удобно перейти от расчета по току в конце линии к расчету по потерям энергии в проводах. При этом принципиальная сторона выбора сечения проводов контактной сети будет сохранена той же, какая имеет место для районных сетей и линий передачи [22]. Так как величинами, характеризующими экономические качества сравниваемых вариантов, являются капиталовложения и ежегодные расходы, то при выборе сечения проводов по величине потерь энергии в них последнюю, очевидно, необходимо определять за год.

Для рассматриваемой фидерной зоны величина годовых потерь энергии в проводах контактной сети может быть представлена следующим выражением:

$$\Delta A_{\Gamma} = B_0 r_{\kappa} l \text{ квт} \cdot \text{ч/год},$$

где B_0 — величина, равная потерям энергии за год в проводах данной фидерной зоны при сопротивлении их, равном 1 ому в квт·ч/ом·год;
 r_{κ} — сопротивление 1 км проводов контактной сети в ом/км;
 l — длина фидерной зоны в км.

Чаще всего величину годовых потерь энергии (как и расходов) относят к длине фидерной зоны, тогда

$$\Delta a_{\Gamma} = \frac{\Delta A_{\Gamma}}{l} = B_0 r_{\kappa} \text{ квт} \cdot \text{ч/год} \cdot \text{км}. \quad (90)$$

Капиталовложения будут определяться стоимостью контактной сети в зависимости от сечения проводов ее и вложениями в энергосистему, необходимыми для создания в ней мощности, обеспечивающей покрытие потерь энергии в контактной сети. Капиталовложения на 1 км контактной сети определяются

$$K_{\kappa} = K_n + K_{yc} \text{ руб/км},$$

где K_n — вложения в контактную сеть при одной цепной подвеске, т. е. без усиливающих проводов, в руб/км;

K_{yc} — вложения, пропорциональные сечению усиливающих проводов, в руб/км.

Стоимость создания необходимой мощности в энергосистеме на 1 км контактной сети

$$K_c = \Delta P_{\max} K_{yc} \text{ руб/км}.$$

Здесь ΔP_{\max} — максимальные потери мощности, могущие совпасть с максимумом энергосистемы, в $\text{квт} \cdot \text{ч/км}$;

K_{yc} — стоимость 1 квт установленной мощности в энергосистеме в руб/квт .

Следовательно, суммарные капиталовложения будут равны

$$K = K_k + K_c,$$

или, подставив сюда значения K_k и K_c , получим

$$K = K_n + K_{yc} + \Delta P_{\max} K_{yc} \text{ руб/км.}$$

Ежегодные расходы составятся из амортизационных отчислений и оплаты потерь энергии. Обозначив через α_k и α_c амортизационные отчисления в долях единицы, соответственно в контактной сети и в энергосистеме, получим составляющие этих расходов ($\text{руб/км} \cdot \text{год}$) по контактной сети — $\alpha_k K_k$ и по энергосистеме — $\alpha_c \Delta P_{\max} K_{yc}$.

Стоимость потерь энергии будет равна

$$r_k B_0 K_{\Sigma} \text{ руб/км} \cdot \text{год},$$

где K_{Σ} — стоимость энергии в $\text{руб/квт} \cdot \text{ч}$.

Тогда ежегодные расходы будут равны

$$E = \alpha_k K_k + \alpha_c \Delta P_{\max} K_{yc} + r_k B_0 K_{\Sigma}. \quad (91)$$

Используя выражение (84), получим условные капиталовложения

$$K_y = K_k + \Delta P_{\max} K_{yc} + (\alpha_k K_k + \alpha_c \Delta P_{\max} K_{yc} + r_k B_0 K_{\Sigma}) T,$$

или

$$K_y = K_k (1 + \alpha_k T) + \Delta P_{\max} K_{yc} (1 + \alpha_c T) + r_k B_0 K_{\Sigma} T. \quad (92)$$

Выразим величины, в которые входит сечение проводов контактной сети (ΔP_{\max} , K_k и r_k) через это сечение.

Обозначим отношение максимальных потерь мощности в сети к средним через c_m , т. е.

$$\frac{\Delta P_{\max}}{\Delta P_{cp}} = c_m.$$

В соответствии с выражением (90)

$$\Delta P_{cp} = \frac{B_0 r_k}{8760} \frac{\text{квт}}{\text{км}}.$$

Имея в виду, что $r_k = \frac{\rho_m}{s_m}$, получим окончательно

$$\Delta P_{\max} = \frac{B_0 \rho_m c_m}{8760 s_m}.$$

Здесь s_m — суммарное сечение проводов контактной сети в медном эквиваленте в мм^2 ;

ρ_m — удельное сопротивление медных проводов в $\text{ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$.

Как показано выше, величина

$$K_k = K_n + K_{yc}.$$

Обычно часть проводов контактной сети — несущий трос и один или два контактных провода — является постоянной частью подвески (иногда называемой «проводами подвески») и выбирается заранее на основе технических соображений (тип электровоза, вес составов и т. д.), оставаясь постоянной при всех вариантах сечения, выполняемого усиливающими проводами. Поэтому от сечения проводов зависит лишь второе слагаемое величины K_k , т. е. K_{yc} .

В качестве усиливающих проводов обычно применяются только алюминиевые. Поэтому здесь будет дан выбор сечения проводов только для усиления алюминием.

Стоимость усиливающих алюминиевых проводов будет равна

$$K_{yc} = \kappa_a (s_m - s_n) 1,65,$$

где κ_a — удельная стоимость алюминиевых проводов в руб/мм²·км;
 s_n — сечение проводов подвески (постоянной части) в медном эквиваленте в мм².

Подставляя в выражение (92) все найденные здесь значения величин, получим

$$K_y = [K_n + \kappa_a (s_m - s_n) 1,65] (1 + \alpha_k T) + \frac{B_0 \rho_m c_m}{8760 s_m} K_{yc} (1 + \alpha_c T) + \kappa_s \frac{\rho_m}{s_m} B_0 T. \quad (93)$$

Если допустить, что сечение проводов может изменяться непрерывно, оптимальная величина его (соответствующая минимуму условных капиталовложений) является корнем уравнения

$$\frac{dK_y}{ds_m} = 0. \quad (94)$$

Взяв производную по s_m от правой части выражения (93) и решив уравнение (94), найдем экономическое сечение проводов контактной сети в медном эквиваленте $s_{мэ}$

$$s_{мэ} = \sqrt{\frac{\rho_m B_0 \left[\frac{K_{yc} c_m}{8760} (1 + \alpha_c T) + \kappa_s T \right]}{1,65 \kappa_a (1 + \alpha_k T)}}. \quad (95)$$

При выбранном заранее типе подвески, т. е. при известном сечении ее постоянной части, сечение усиливающих алюминиевых проводов определится

$$s_{ya} = (s_{мэ} - s_n) 1,65 \text{ мм}^2. \quad (96)$$

На выбор экономического сечения проводов большое влияние оказывает принимаемая в расчет стоимость электрической энергии. При составлении тарифов на энергию в них вводятся отчисления с оборота и доход. Но потери энергии не дают полезной продукции и поэтому при проектировании электроустановок [1; 22] они оцениваются не по тарифу, а по себестоимости. Себестоимость электрической энергии для электростанций различного типа получается различной. В энергетические же системы эти станции входят в самых различных комбинациях по типам и соотношению их мощностей. Однако в расчет принимают одну и ту же себестоимость электрической энергии по следующим соображениям. При строительстве гидроэлектростанций или теплоэлектростанций величина потерь энергии в сети не может оказать влияния на выбранные для них параметры и не может отразиться на режиме их работы. Поэтому считают, что для покрытия потерь энергии в сетях придется создавать новую мощность конденсационных тепловых станций. Стоимость же установленной мощности и себестоимость электрической энергии на таких станциях примерно одинаковы для всех систем. Себестоимость энергии на шинах электростанций при этом можно найти (не учитывая стоимость сетей и потерь в них), пользуясь известной двухчленной формулой

$$\kappa_s = a + b \text{ руб/квт} \cdot \text{ч}.$$

Здесь a — амортизационные отчисления, отнесенные к потерям энергии, в руб/квт·ч;

b — так называемая топливная составляющая в руб/квт·ч.

Но выше мы уже учли амортизационные расходы, поэтому вместо κ_s подставим только топливную составляющую себестоимости энергии. Тогда вместо уравнения (95) получим

$$s_{мэ} = \sqrt{\frac{\rho_m B_0 \left[\frac{K_{yc} c_m}{8760} (1 + \alpha_c T) + b T \right]}{1,65 \kappa_a (1 + \alpha_k T)}}. \quad (95')$$

Формула (95') не учитывает ступенчатого характера изменения сечения провода. Обозначим реальное сечение, ближайшее большему к экономическому (по существующему сортаменту применяемых проводов) через s'_m . Найдем условные капитальные затраты для вариантов сечений при $s_{мэ}$ и s'_m и, приравняв их, получим условие, при котором полученное по расчету экономическое сечение проводов будет равноценно ближайшему большему.

При этом после упрощений получим

$$s_{мэ} \kappa_a (1 + \alpha_c T) 1,65 \left(1 - \frac{s'_m}{s_{мэ}} \right) = \\ = \frac{\rho_m B_0}{s'_m} \left[\frac{c_m K_{yc} (1 + \alpha_c T)}{8760} + bT \left(1 - \frac{s'_m}{s_{мэ}} \right) \right],$$

откуда

$$s_{мэ} = \sqrt{\frac{s'_m}{s'_m} \cdot \frac{\rho_m B_0 \left[\frac{K_{yc} c_m (1 + \alpha_c T)}{8760} + bT \right]}{1,65 \kappa_a (1 + \alpha_c T)}}. \quad (97)$$

Большинство величин, входящих в приведенную формулу, определяется конкретными условиями, следовательно, в общем виде эта задача не может быть решена. Поэтому при установлении экономической плотности тока для сетей и линий передач с целью получения большей определенности задачи идут по пути установления максимально допустимой экономической плотности тока. Этот путь удобен и для контактной сети. Сведя формулу (97) к минимально допустимому по экономическим соображениям сечению проводов, тем самым установим его нижнюю границу. Отметим, что такой подход позволит в ряде случаев получить экономию цветного металла, что является актуальной задачей.

В соответствии с этим выберем значения величин, входящих в формулу (97), так, чтобы получить нижний предел искомого экономического сечения проводов.

Проанализируем полученную формулу. Искомой величиной является экономическое сечение $s_{мэ}$. Ближайшим большим по сортаменту является сечение s'_m . Формула же (97) выведена из условий, что искомое сечение $s_{мэ}$ экономически равноценно ближайшему большему. Поэтому естественно, что чем дальше будет отстоять одно стандартное сечение от следующего, тем больше получится разница между искомым сечением $s_{мэ}$ и s'_m . В пределе отношение $\frac{s_{мэ}}{s'_m}$, входящее в формулу (97), может равняться отношению между

смежными стандартными сечениями проводов в цепной подвеске. Наименьшее значение этого отношения для контактной сети можно принять равным 0,7.

Второй величиной, изменяющейся в значительных пределах, является κ_a . По данным Трансэлектроексперимента [23], можно считать, что при подвеске первого усиливающего провода $\kappa_a = 40 \text{ руб/мм}^2 \cdot \text{км}$, а при подвеске второго $\kappa_a = 26 \text{ руб/мм}^2 \cdot \text{км}$. Так как мы ищем минимальное значение экономического сечения проводов, то примем первое из них тем более, что некоторое уменьшение экономического сечения за пределами подвески первого усиливающего провода не так заметно скажется на потерях энергии.

Так же, как принимают при определении экономической плотности тока, возьмем $K_{yc} = 1200 \text{ руб/квт}$, $b = 0,05 \text{ руб/квт} \cdot \text{ч}$, $\alpha_c = 0,056$ (эти значения также являются наименьшими) и срок окупаемости $T = 5$ лет, близкий к верхнему пределу срока окупаемости электрификации железных дорог. Амортизационные отчисления со стоимости усиливающих проводов контактной сети (по аналогии с воздушными линиями) равны 0,03, а $\rho_m = 18,8 \text{ ом/мм}^2 \cdot \text{км}$.

Используя указанные значения всех величин, получим

$$s_{мэ} = \sqrt{0,7 \frac{18,8 B_0 \left[\frac{c_m 1200 (1 + 0,056 \cdot 5)}{8760} + 0,05 \cdot 5 \right]}{1,65 \cdot 40 (1 + 0,03 \cdot 5)}}$$

откуда

$$s_{мэ} = 0,174 \sqrt{c_m + 1,4} \cdot \sqrt{B_0}. \quad (98)$$

Так как коэффициент c_m определяется отношением максимальных и средних потерь мощности, то прежде чем установить его значение, необходимо принять для расчета длину линии и степень использования пропускной способности (см. § 18). Казалось бы, что надо в расчете принимать длину фидерной зоны, но это было бы не всегда правильно. Дело в том, что отдельные фидерные зоны не являются для энергосистемы различными потребителями с различными режимами работы, так как движение поездов на смежных зонах находится в связи друг с другом. Поэтому для случаев, когда электрическая станция питает участки относительно небольшой длины, а тем более работающие с малым использованием пропускной способности, коэффициент c_m будет иметь максимальное значение. Наоборот, для случаев, когда от данной электрической станции питается участок электрифицированной дороги большой длины, и особенно, если высока степень использования пропускной способности, этот коэффициент получит минимальное значение.

Примем расстояние между электрическими станциями (т. е. зону действия электрической станции) равным 200—300 км, или время хода по этой зоне в среднем равным 5 ч. При такой большой длине можно считать, что потери мощности приблизительно пропорциональны квадрату числа поездов в данной зоне, а значит можно принять $c_m = \kappa_{\max}^2$.

Для определения экономического сечения проводов будем исходить из того, что перерыв в движении произошел по одному пути и при ликвидации сгущения по второму пути организовано двустороннее движение, несколько увеличившее нагрузку.

Примем среднее значение κ_{\max} между теми, которые получаются по формулам (73) и (74)

$$\kappa_{\max} = \frac{1,5 t_a}{2t} + 1.$$

За расчетную величину t_a примем 4 ч (время, соответствующее примерно выделяемому на производство ремонтных работ по пути). Тогда

$$\kappa_{\max} = \frac{1,5 \cdot 4}{2 \cdot 5} + 1 = 1,6.$$

Наименьшее значение κ_{\max} имеет место для дорог с очень высоким использованием пропускной способности. Примем его равным 1,25. Тогда c_m будет изменяться в пределах $1,6^2 \div 1,25^2 \approx 2,6 \div 1,5$.

Подставив полученные значения c_m в формулу (98), получим пределы экономического сечения проводов в медном эквиваленте. Верхний предел

$$s_{мэ} = 0,174 \sqrt{2,6 + 1,4} \cdot \sqrt{B_0} = 0,35 \sqrt{B_0};$$

нижний предел

$$s_{мэ} = 0,174 \sqrt{1,5 + 1,4} \cdot \sqrt{B_0} = 0,30 \sqrt{B_0}.$$

Если сечение постоянной части проводов подвески задано s_n , то экономическое сечение алюминиевых усиливающих проводов для линий с относительно невысоким использованием пропускной способности можно найти из выражения

$$s_{yd} = (0,35 \sqrt{B_0} - s_n) 1,65. \quad (99')$$

Соответственно для линий с высоким использованием пропускной способности

$$s_{ya} = (0,30 \sqrt{B_0} - s_n) 1,65. \quad (99'')$$

Полученные формулы дают минимальное значение экономического сечения проводов. Это сечение может быть увеличено, если по другим соображениям такое увеличение необходимо. Хотя следующее по сортаменту сечение будет окупаться весьма быстро, давая при этом улучшение ряда технических показателей; все же идти на такое усиление можно только при явной необходимости, так как это приведет к дополнительному расходу цветного металла.

Легко перейти к расчету без учета вложений в энергосистему, если в формуле (95') принять $K_{yc} = 0$, а взамен топливной составляющей подставить отпускную стоимость энергии (по тарифу). В этом случае формула (95') принимает вид

$$s_{мэ} = \sqrt{\frac{\rho B_0 \kappa_s T}{1,65 \kappa_a (1 + \alpha_k T)}}. \quad (100)$$

Последним выражением пользуются в настоящее время при проектировании. Часто выбор сечения проводов контактной сети ведут при помощи последовательного сопоставления конкретных вариантов подвесок и выбор из них оптимального по рекомендациям, данным в § 19 [см. формулу (85)].

Определение сечения воздушных питающих и отсасывающих проводов (фидеров) должно производиться так же, как и проводов контактной сети, т. е. по данным выше рекомендациям. Обычно сечение питающих фидеров не выбирается, а принимается равным сечению проводов контактной сети, питаемой данным фидером.

В заключение отметим, что хотя выбор экономического сечения проводов ведется путем учета стоимости проводов и расходов на потери энергии, все же этот расчет в известной мере можно рассматривать как установление непосредственного эквивалента между столь ценными продуктами, как электрическая энергия и цветной металл. Действительно, поскольку в формулы, определяющие экономическое сечение проводов, входит регулирующий фактор T (срок окупаемости), то, изменяя его, можно менять и эквивалент цветного металла и электрической энергии.

Проверка проводов контактной сети на нагревание. Изменение механических свойств проводов при их нагревании объясняется тем, что провода, используемые для воздушных линий и, в частности, в контактной сети, при изготовлении протягиваются в холодном состоянии. Такой способ изготовления создает на внешней поверхности проводов уплотненный и более прочный слой за счет так называемого явления наклепа. При нагревании же проводов они утрачивают это качество в тем большей степени, чем больше температура, до которой они нагреты и чем большее время эта температура поддерживалась. Точный расчет влияния нагревания проводов контактной сети электрическим током на потерю его механических качеств весьма сложен. Это объясняется тем, что при таком расчете необходимо оценить режим температуры проводов, зависящий от режима нагрузки и охлаждения, в свою очередь зависящего от температуры окружающей среды и скорости движения воздуха в условиях колеблющейся тяговой нагрузки. По своему характеру эта задача сходна с задачей расчета трансформаторов по старению изоляции: и здесь и там требуется оценка влияния температуры и времени ее действия на качество материала. Такая методика для проводов еще не существует, эта задача является предметом исследований научных организаций. Поэтому в настоящее время расчет на нагревание ведется по нормам, устанавливаемым в технических условиях.

Техническими условиями (ТУПЭ—57) установлены нормы допустимой нагрузки на голые провода, применяемые в контактных сетях за отрезок времени, равный 20 мин (табл. 13).

Таблица 13

Марки проводов	Медные контактные провода		Медные несущие тросы		Алюминиевые провода	
	ТФ-85	ТФ-100	М-95	М-120	А-150	А-185
Допустимые длительные токовые нагрузки в а	550	600	600	700	500	600

Следует отметить, что при параллельном соединении медных и алюминиевых проводов ток распределяется таким образом, что если медные провода нагружены в пределах норм, то алюминиевые недогружены. При проверке расчетов по допустимому току необходимо исходить из наиболее тяжелых расчетных режимов. По условиям нагревания приходится также проверять провода при всяких вынужденных (аварийных) схемах питания, например при выпадении из работы одной подстанции. Однако сделать заранее какие-либо общие для всех случаев заключения нельзя. Для такой схемы питания для каждой конкретной линии, очевидно, должны быть заданы расчетные режимы движения и при необходимости усилено сечение проводов контактной сети.

Уровень напряжения в контактной сети. Выше подробно было разобрано влияние уровня напряжения в контактной сети на работу электроподвижного состава и показатели работы участка. В соответствии с этим при проектировании должен определяться уровень напряжения в контактной сети для расчетных размеров движения. Как отмечалось, на работу электроподвижного состава оказывают влияние как кратковременные, так и длительные отклонения напряжения; на время же хода влияют только длительные отклонения напряжения, которые и вводятся в расчеты как средние отклонения напряжения за время хода поезда по автоматической характеристике на определенном перегоне. Эта величина определяется для установления действительного среднего напряжения, которое будет иметь место на этом перегоне, что позволит внести поправку во времена хода поездов, полученные из тяговых расчетов, выполненных заранее на некоторое расчетное (условное) напряжение.

Таким образом, наибольший (а пока практически и единственный) интерес представляет определение средней потери напряжения в сети до поезда за время хода его на автоматической характеристике по определенному перегону. При этом особый интерес представляет потеря напряжения на лимитирующем (ограничивающем) перегоне, так как она определяет истинное значение пропускной способности.

Об учете влияния параметров устройств электрической железной дороги на скорость движения поездов. Одним из главнейших факторов работы железных дорог, существенным образом влияющим на ее экономические показатели, является скорость движения поездов. Она определяет пропускную способность, оборот локомотивов и вагонов, время нахождения грузов в пути и т. п. Поэтому вопросам повышения скорости уделяется большое внимание. В соответствии с этим при выборе параметров сооружений железных дорог необходимо оценивать влияние их на скорость.

Как выяснено в главе II, скорость поездов, при прочих равных условиях, определяется режимом напряжения в сети у поезда. Однако при одном и том же уровне напряжения скорость поездов на одном и том же участке может быть различна, что зависит главным образом от мощности локомотива и веса состава.

Идеальным решением вопроса было бы такое, при котором совместный выбор параметров всех устройств электрической железной дороги приводил бы в результате к установлению наивыгоднейшей скорости движения поездов при оптимальных параметрах устройств. Такое решение пока найти не удастся из-за неопределенности ряда факторов и громоздкости задачи.

В настоящее время при проектировании стремятся получить скорости в тех пределах, в каких это допускают остальные устройства железных дорог.

При этом, когда в результате тяговых расчетов такие скорости получаются, это и считается приемлемым решением задачи. Но так как тяговые расчеты выполняются исходя из некоторого постоянного (условного) напряжения, а в действительности напряжение в сети изменяется по длине и в зависимости от числа, типа и расположения поездов, то истинные времена хода обязательно будут расходиться с расчетными, почему и необходимо после тяговых расчетов проводить соответствующую корректировку времени хода.

Если теперь, после того как спроектирована система энергоснабжения, окажется, что режим напряжения при каких-то условиях работы участка приводит к уменьшению на отдельных перегонах скоростей движения, то часто ставится вопрос о том, что необходима компенсация этого снижения скорости за счет элементов системы энергоснабжения и, главным образом, за счет сечения проводов контактной сети. В действительности никакого снижения скорости (так же как и повышения скорости в периоды малых размеров движения) не происходит, так как нельзя считать скорости, полученные из тяговых расчетов, производящихся для условного напряжения, действительными.

Однако независимо от этих соображений может всегда появиться необходимость изыскать средства для повышения скорости против той, которая получена для некоторых условий движения после выбора параметров подвижного состава и системы энергоснабжения. Естественно, что режим напряжения, от которого в большой мере зависит скорость поездов и ко-

торый в свою очередь, при прочих равных условиях, определяется параметрами системы энергоснабжения, т. е. размещением подстанций, их мощностью, сечением проводов контактной сети и линий передачи и т. д., в первую очередь становится объектом поисков возможности повышения скорости. Исходя из этого, следует рассмотреть, в какой мере могут служить этой цели различные элементы системы энергоснабжения, если их параметры выбраны на основе изложенных выше принципов.

Прежде всего с этой точки зрения рассмотрим сечение проводов контактной сети. При прочих равных условиях имеет место зависимость установившейся скорости поезда от сечения проводов контактной сети, характер которой показан на рис. 100.

Можно представить себе такое сечение проводов контактной сети, при котором сопротивление от подстанции до электровоза окажется столь велико, что ток в обмотках двигателей неподвижного электровоза, даже при полностью выведенных реостатах, будет недостаточен для создания вращающего момента, необходимого для трогания. Такое положение соответствует сечению провода, лежащему в пределах от нуля до s_1 (рис. 100). Если сечение проводов сделать большим, то поезд тронется с места и достигнет некоторой установившейся скорости. Из графика рис. 100 видно, что при значениях сечения, незначительно превышающих s_1 , получается заметное увеличение скорости. На этом участке кривой увеличение сечения проводов явилось бы одним из наиболее эффективных способов увеличения скорости. Однако сечение проводов контактной сети выбирается так, что оно не может быть меньше некоторого s_k , взятого по конструктивным соображениям и обеспечивающего надежное токоснимание; оно также не может быть ниже некоторого s_p , выбранного по условиям нагревания

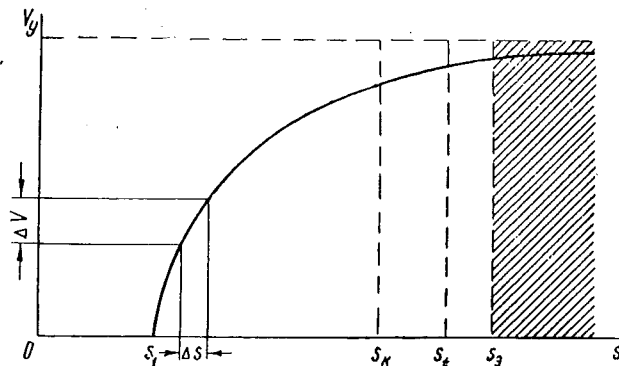


Рис. 100. Зависимость скорости движения поезда от сечения проводов контактной сети

и, наконец, не должно быть ниже выбранного по экономическим соображениям s_3 .

Следовательно, речь может идти только об увеличении сечения проводов за указанные пределы, где это увеличение не может дать сколько-нибудь значительного эффекта, так как, например, экономические сечения проводов лежат в зоне, где кривая $v = f(s)$ приближается к своей асимптоте. Поэтому возможности контактной сети в отношении увеличения скорости обычно исчерпываются величиной в 2—3%.

Надо подчеркнуть, что речь идет о проектировании, при котором параметры контактной сети выбраны правильно. В эксплуатации могут иметь место случаи, когда с течением времени размеры движения выросли и сечение проводов контактной сети далеко от того, какое должно бы иметь место по экономическим соображениям. Тогда, естественно, прежде всего, необходимо довести его величину до экономической, так как работа при сечении ниже экономического говорит прежде всего о недопустимо больших потерях энергии. При этом все приведенные соображения о ничтожной эффективности увеличения сечения проводов контактной сети для увеличения скоростей движения останутся в силе.

Все указанное можно отнести и к сечению проводов линий, питающих электрифицированные участки.

Что касается тяговых подстанций, то в смысле возможностей повышения скоростей (опять-таки через режим напряжений) здесь дело обстоит иначе.

Значительное уменьшение расстояний между подстанциями (увеличение их числа), приводит к заметному уменьшению потерь напряжения в контактной сети и, следовательно, дает некоторый эффект повышения скоростей. Но эта мера чрезвычайно неэкономична, так как потребует большого увеличения расходов, не оправдывающихся выгодностью увеличения скоростей. Практически значительное уменьшение расстояний между подстанциями становится целесообразным только при переходе к системе распределенного питания или при усилении системы энергоснабжения в эксплуатации при значительно возросших перевозках.

Увеличение же мощностей подстанций при том же их количестве только для повышения напряжения дает значительно меньший эффект, так как внешняя характеристика тяговых подстанций, т. е. зависимость напряжения на шинах подстанции от нагрузки, при больших мощностях такова, что добавление агрегата мало поднимает напряжение в контактной сети. Наилучшим решением рассматриваемого вопроса надо считать регулирование напряжения на шинах подстанции. Это мероприятие, которое при помощи применения трансформаторов с автоматическим регулированием напряжения под нагрузкой (или других средств) позволило бы поддерживать достаточно высокое напряжение в контактной сети, дало бы наибольший эффект при небольших затратах. Такие устройства в ближайшем будущем будут применяться на тяговых подстанциях.

Но не только система энергоснабжения дает возможность повышения скоростей движения. Увеличение мощности тяговых двигателей приводит при том же уровне напряжения к повышению скоростей движения, примерно пропорциональному степени повышения мощности. Кстати, если электровоз имеет запас мощности (по условиям нагревания двигателей), то увеличить скорость движения можно также путем более глубокого ослабления поля тяговых двигателей или изменением режима ведения поезда (например уменьшением времени выбега).

Таким образом, повышение скорости движения может быть достигнуто как увеличением напряжения при том же электровозе, так и увеличением мощности электровоза при том же уровне напряжения. Эти соображения еще не дают указаний, каким путем следует идти, но показывают возможность перемещения резерва мощности из системы энергоснабжения в электрические локомотивы.

Подводя итог изложенному выше, следует подчеркнуть, что если повышение скоростей за счет увеличения сечения проводов и мощности тяговых подстанций сверх их экономических значений нельзя признать целесообразным (при условии соответствия их параметров условиям работы участка), то регулирование напряжения на тяговых подстанциях и усиление мощности локомотивов — наилучшие пути для решения этой задачи. При этом, если регулирование напряжения ограничивается некоторыми пределами (в зависимости от напряжения, обеспечиваемого энергосистемой), то увеличение скорости посредством применения более мощных локомотивов по существу ничем не ограничивается и может быть достигнуто любое, какое можно допустить по условиям безопасности движения.

Свободный совместный выбор параметров локомотивов и элементов системы энергоснабжения всегда даст в результате правильное решение задач, стоящих перед проектировщиками.

§ 21. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Основные исходные данные методов расчета. Как видно из изложенного выше, в результате расчетов системы энергоснабжения должны быть выбраны параметры и определены основные технические и экономические показатели ее работы. Для этого необходимо уметь определять различные величины, главными из которых являются нагрузки подстанций, фидеров и проводов контактной сети, потери напряжения и энергии в различных элементах системы. Такие же величины приходится определять и при расчетах промышленных, коммунальных и т. п. сетей со стационарными нагрузками. Общее во всех методах расчета то, что все они основываются на заданной схеме питания сети, числе и расположении нагрузок и их величинах. Нагрузки эти могут быть заданы в виде мощности или тока. Основным принципиальным отличием расчетов тяговой сети от расчетов сетей со стационарными нагрузками является непрерывное изменение расположения и величины тяговых нагрузок (вследствие движения поездов различного веса по пути с изменяющимся характером профиля). Меняется также и число поездов, находящихся одновременно в фидерной или подстанционной зоне.

Такой характер тяговых нагрузок привел к разработке ряда специальных методов расчета системы энергоснабжения электрических железных дорог.

Чтобы создать классификацию методов и правильно определять их ценность и области применения, необходимо установить прежде всего, что является главной особенностью расчетов тягового энергоснабжения.

Если бы установить регистрирующие приборы на электровозах, на фидерах и шинах подстанций действующего участка, то мы получили бы картину изменения значений расчетных величин в различных интересующих нас местах. Приборы фиксировали бы положение для каждого момента времени, что дало бы возможность, обработав эти записи, получить любые интересующие нас мгновенные и средние значения величин. При этом мы шли бы от величин в отдельные моменты времени к средним значениям за некоторое время.

Аналогично строятся и расчеты системы энергоснабжения электрических железных дорог. Каждый из существующих методов такого расчета имеет две фазы. В первой решается задача для какого-либо момента времени, т. е. для постоянных по величине и расположению нагрузок, а во второй имеет место переход к определению необходимых средних значений и выбору из ряда мгновенных значений тех, которые следует учитывать в расчетах.

В некоторых методах расчета такой ход непосредственно сохраняется при проведении расчетов, в других методах это имеет место лишь при выводе расчетных формул. Но такая схема решения задачи — от отдельных моментов к получению средних значений — сохраняется во всех случаях.

Во всех случаях; в первой фазе решения задачи, т. е. при расчете величин для данного момента времени, должно быть известно (задано) число потреби-

телей, их расположение и потребляемые ими токи или мощности. При этом задача получается той же, что и при расчетах сетей со стационарными нагрузками. Исходными данными для всех расчетов энергоснабжения являются графики движения и результаты тяговых расчетов.

Число, расположение поездов и их типы (категории) для каждого момента времени определяются графиком движения поездов, а соответствующие нагрузки — тяговыми расчетами. Наиболее правильной является классификация методов по способу использования исходных данных. Тяговые расчеты для данного типа локомотива, веса поезда и профиля пути при выбранном режиме ведения поезда дают определенные данные для расчетов. Учет же особенностей графиков движения в разных методах проводится совершенно различным путем.

По этим соображениям удобно классифицировать методы расчета системы энергоснабжения по способу оценки организации движения.

Классификация методов расчета системы энергоснабжения. При расчетах системы энергоснабжения могут быть два вида задач. К первому виду могут быть отнесены случаи, когда требуется определять все расчетные величины применительно к определенному графику движения, т. е. для совершенно определенных условий движения поездов. Сюда непосредственно относятся расчеты системы энергоснабжения пригородных участков магистральных дорог на ближайший период, на который уже составлено расписание движения поездов и метрополитенов (так как расчетным графиком последних является периодический параллельный график с постоянным, наперед заданным минимальным интервалом между поездами).

Вторая задача возникает, если расчеты ведутся в условиях, при которых не может быть задан один определенный график движения. Сюда относятся все случаи расчетов и проектирования магистральных дорог с грузовым движением, т. е. в условиях, при которых не может быть задан график движения. Аналогичное положение может быть и в эксплуатации, когда в условиях оперативного планирования диспетчер может переставлять поезда местами, вследствие чего невозможно задолго предвидеть и точно учесть все особенности ежесуточных графиков движения. При таких условиях остается или путь замены всех возможных в будущем графиков движения одним условным или учет всех возможных графиков движения в окончательных результатах расчетов.

В соответствии с изложенным все методы расчета могут быть разбиты на три группы:

- 1) методы расчета по заданному графику движения;
- 2) методы расчета по параллельному графику движения, или, иначе, по средним размерам движения;
- 3) метод расчета с учетом неравномерности движения.

Методы расчета системы энергоснабжения электрических железных дорог ведут свое начало от методов, применявшихся в трамваях. По существу методы начали развиваться в работах различных отечественных и зарубежных авторов с конца прошлого века.

Ход развития методов в основном характеризуется стремлением все более глубокого отображения реальных условий работы системы энергоснабжения, т. е. расположения поездов на линии и характера потребления тока этими поездами. Другими словами, каждая новая ступень в развитии методов имела своей целью отказ от той или иной условности, искажающей действительную картину работ системы энергоснабжения.

Ниже при изложении основных принципов построения различных методов расчета будет отмечена эта сторона вопроса, значительно упрощающая понимание логики развития методов расчета.

Здесь невозможно и нет необходимости рассматривать все когда-либо публиковавшиеся работы, посвященные вопросам развития и совершенствования методов расчета. Учитывая, что новейшие работы в этой области принадлежат

советским авторам, совершенно достаточно рассмотреть развитие методов в основном на этих работах.

К методам расчета, построенным на использовании заданного графика движения, относятся: «Метод равномерного сечения графика движения», «Метод характерных сечений графика движения» проф. К. Г. Марквардта [24]; «Метод моментов инерции» проф. Д. К. Минова [26]; «Метод непрерывного исследования графика движения» проф. К. Г. Марквардта [25] и «Метод расчета нагрузки тяговой подстанции по кривым расхода энергии» инж. Л. М. Перцовского [27]. Во всех этих методах число и расположение поездов и их тип определяются непосредственно по заданному графику движения.

Ко второй группе методов относятся: «Метод равномерно-распределенной нагрузки»; «Метод подвижных нагрузок» проф. В. Л. Шевалина, А. Б. Лебедева [28]; «Применение теории вероятностей к выбору мощности тяговых подстанций» проф. Н. И. Костромитина [29]; «Расчет тяговых сетей на основе заданных размеров движения» проф. В. Е. Розенфельда [30] и «Метод расчета по эпюрам средних нагрузок» проф. Л. Г. Абелишвили [31].

Все эти методы характерны тем, что расчет ведется для среднего числа поездов за рассматриваемый отрезок времени (обычно сутки), т. е. без учета неизбежной в условиях эксплуатации неравномерности движения. В последнем из перечисленных методов, если задан график движения, можно для разных периодов времени брать то значение среднего числа поездов, которое имеет место согласно графику движения.

К последней группе относится метод, разработанный автором данной книги и получивший название метода МЭМИИТа.

Выше было отмечено, что особенность тяговых нагрузок, заключающаяся в изменении на рассматриваемом участке их числа, величины и места, приводит к необходимости замены непрерывного процесса прерывистым, т. е. к рассмотрению отдельных моментов времени, а это в свою очередь сводит задачу к известной схеме с неподвижными нагрузками определенной величины. Такие схемы называются мгновенными. Если же произвести расчет ряда последовательных мгновенных схем, то можно построить зависимости расчетных величин по времени, которые позволят в дальнейшем находить все необходимые средние и кратковременные значения.

Соответствие построенных зависимостей действительным определится искусством отбора мгновенных схем, что является задачей методов, которые будут рассмотрены в следующей главе.

Здесь мы ограничимся изучением способов расчета мгновенных схем (с заданными нагрузками), задачей которого является определение нагрузок тяговых подстанций и их фидеров, а также потерь напряжения и мощности в контактной сети.

§ 22. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ (ИЛИ ИХ ФИДЕРОВ) И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ДОРОГАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Схема одностороннего питания. Под линиями с односторонним или с консольным питанием (рис. 101) понимаются линии, на которых энергия от подстанции поступает к потребителям с одного конца линии. Само собой разумеется, что нагрузка подстанции в этом случае равна сумме всех нагрузок в фидерной зоне.

Для определения потери напряжения в контактной сети до поезда обозначим:

$I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ — токи, потребляемые отдельными поездами, в а;
 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ — расстояния от подстанции до соответствующих поездов в км;
 r — сопротивление 1 км контактной сети, полагая его постоянным по всей длине, в ом/км.

При выводе формулы для определения потери напряжения предполагаем, что величина r включает в себя сопротивление проводов контактной сети и рельсов. Таким образом, потеря напряжения, определяемая ниже, относится ко всей контактной сети. При определении потери напряжения только в проводах контактной сети или в рельсах в формулы следует подставить соответствующие значения сопротивлений.

Рассматривая потерю напряжения в сети до любой нагрузки как сумму потерь напряжения на участках между нагрузками, получим выражение для максимального значения потери напряжения

$$\Delta U_{\max} = (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) r l_1 + (I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_n) r (l_2 - l_1) + \dots + I_n (l_n - l_{n-1}),$$

или, упростив,

$$\Delta U_{\max} = r (I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3 + \dots + I_n l_n) =$$

$$= r \sum_{k=1}^n I_k l_k. \quad (101)$$

Если на участке в рассматриваемый момент времени имеются электровозы, рекупирующие энергию, то расчеты сети не изменяются, а токи рекуперации входят во все приводимые формулы со знаком минус.

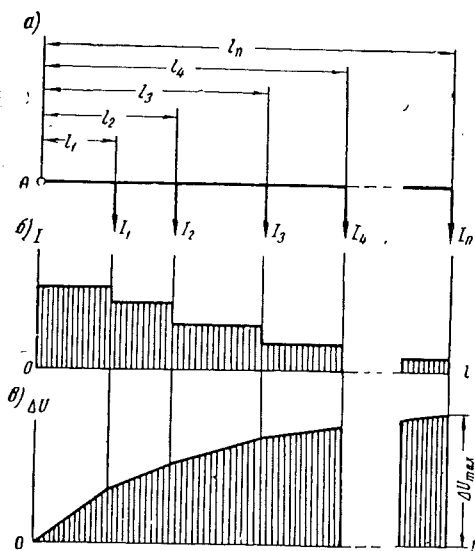


Рис. 101. К расчету схемы одностороннего питания:

а—схема расположения нагрузок; б—график изменения тока по длине линии; в—график изменения потери напряжения

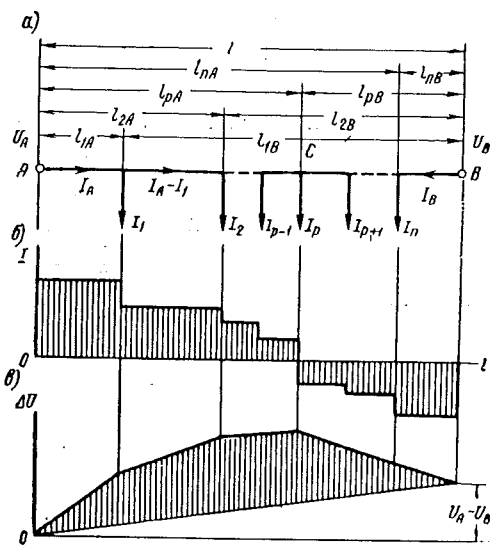


Рис. 102. К расчету схемы двустороннего питания. Обозначение позиций то же, что и на рис. 101

Произведения $I_k l_k$ по аналогии с терминологией, принятой в механике, называют моментами токов.

Если нужно определить потерю напряжения в сети до какой-либо нагрузки, например до I_3 , то следует воспользоваться той же формулой (101), предполагая, что в точке приложения нагрузки I_3 приложены и все остальные нагрузки.

Тогда формула примет вид

$$\Delta U_3 = r [I_1 l_1 + I_2 l_2 + (I_3 + I_4 + \dots + I_n) l_3],$$

или, в общем виде, для нагрузки с номером m (I_m)

$$\Delta U_m = r \left(\sum_{k=1}^m I_k l_k + l_m \sum_{k=m+1}^n I_k \right). \quad (102)$$

На рис. 101 приведены диаграммы распределения тока и потери напряжения вдоль провода; первая имеет характер эпюры перерезывающих сил, а вторая — эпюры изгибающих моментов.

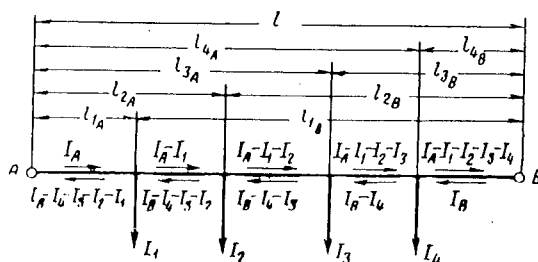


Рис. 103. Схема нагрузок при двустороннем питании

Схема двустороннего питания. Задача расчета линии с двусторонним питанием (рис. 102,а) сводится в первую очередь к нахождению величин токов, идущих от питающих подстанций A и B . Обозначив через I_A ток, идущий от подстанции A , и через I_B — ток, идущий от подстанции B , можно распределение токов представить так, как это показано на рис. 103 (верхние или нижние стрелки).

Полагая для общности, что $U_A \neq U_B$ (рис. 102), можно написать, что суммарная потеря напряжения между пунктами A и B должна быть равна разности напряжений в этих пунктах

$$I_A r (l - l_{1B}) + (I_A - I_1) r (l_{1B} - l_{2B}) + \dots + \\ + [I_A - (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n)] r l_{nB} = U_A - U_B.$$

После преобразований получим

$$I_A r l - (I_1 l_{1B} + I_2 l_{2B} + \dots + I_n l_{nB}) r = U_A - U_B, \quad (103)$$

откуда

$$I_A = \frac{1}{l} \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa B} + \frac{U_A - U_B}{r l}. \quad (104)$$

Аналогично получим

$$I_B = \frac{1}{l} \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa A} - \frac{U_A - U_B}{r l}. \quad (104')$$

Если напряжения в пунктах A и B равны, то

$$I_A = \frac{\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa B}}{l}, \quad (105)$$

$$I_B = \frac{\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa A}}{l}. \quad (105')$$

Следовательно, нагрузки подстанции могут быть представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I'_A + I_y \\ I_B &= I'_B - I_y \end{aligned} \right\} \quad (106)$$

и

где I'_A и I'_B — нагрузки подстанций при равных напряжениях;
 I_y — так называемый уравнивающий ток, вызванный неравенством напряжений.

Для проверки полученных результатов можно воспользоваться соотношением

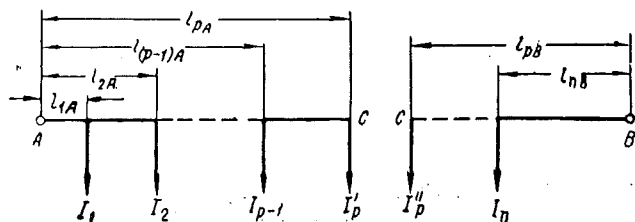


Рис. 104. Замена зоны, питаемой с двух сторон, двумя зонами одностороннего питания.

$$I_A + I_B = \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa}. \quad (107)$$

В рассматриваемой схеме после определения значений токов подстанций легко определить точку токораздела, т. е. то место, к которому ток притекает с двух сторон. Для этого

нужно вычитать последовательно из I_A сначала I_1 , затем из полученной разности I_2 , и т. д. до тех пор, пока разность не станет отрицательной, т. е. точка токораздела находится в том месте, где эпюра токов (рис. 102,б) проходит через нуль.

Наибольшая потеря напряжения в данном случае получится в точке раздела токов C (в месте приложения тока I_p на рис. 102, в).

Для определения величины потери напряжения в сети до интересующей нас нагрузки можно рассматривать линию двустороннего питания как бы разрезанной на две, питающиеся с одной стороны (рис. 104).

В конце каждой такой консоли будет приложена нагрузка, равная по величине той части тока I_p (I'_p и I''_p), которая поступает к этой нагрузке со стороны соответствующих подстанций.

При этом

$$I'_p = I_A - \sum_{\kappa=1}^{p-1} I_{\kappa}; \quad I''_p = I_B - \sum_{\kappa=p+1}^n I_{\kappa}.$$

Максимальная потеря напряжения от подстанции A до точки C будет равна

$$\Delta U_{\max A} = r \left[\sum_{\kappa=1}^{p-1} I_{\kappa} l_{\kappa A} + \left(I_A - \sum_{\kappa=1}^{p-1} I_{\kappa} \right) l_{pA} \right].$$

Та же величина, но от подстанции B

$$\Delta U_{\max B} = r \left[\sum_{\kappa=p+1}^n I_{\kappa} l_{\kappa B} + \left(I_B - \sum_{\kappa=p+1}^n I_{\kappa} \right) l_{pB} \right].$$

Эти величины связаны между собой соотношением

$$\Delta U_{\max A} - \Delta U_{\max B} = U_A - U_B.$$

Определение потери напряжения в сети до любой нагрузки может быть произведено тем же путем, что и для одностороннего питания, после того, как будет найдено место токораздела и определены нагрузки в этой точке для обеих частей схемы, разрезанной в точке токораздела.

Можно написать общую формулу для определения потери напряжения до любой нагрузки

$$\Delta U_m = \frac{r}{l} \left[\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa B} + \sum_{\kappa=1}^{m-1} I_{\kappa} (l_m - l_{\kappa A}) \right]. \quad (108)$$

Замкнутая сеть. Если в конце фидерной зоны с односторонним питанием имеется соединение проводов контактной сети отдельных путей двухпутного участка между собой, то схема питания принимает вид, показанный на рис. 105. Если такую схему разрезать по месту расположения подстанции и развернуть, то она станет схемой двустороннего питания при одинаковых напряжениях на обеих сторонах.

При решении как рассматриваемой, так и последующих задач следует помнить о том, что независимо от схемы соединения проводов контактной сети отдельных путей на всех многопутных участках все нити рельсовых путей, как правило, в ряде точек соединяются между собой. Таким образом, пользование всеми формулами, построенными в предположении, что и рельсы соединяются по тем же схемам, что и провода, вносит в расчеты некоторую погрешность. Однако в практике имея в виду, что сопротивление проводов сети обычно значительно превышает сопротивления рельсовых путей, все расчеты без заметной погрешности производят в предположении, что схема соединения рельсов сходна со схемой соединения проводов контактной сети путей.

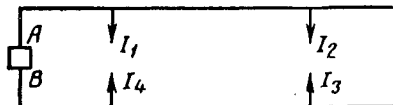


Рис. 105. Схема расположения нагрузок замкнутой сети, питаемой от одной подстанции

Сети многопутных участков с постами секционирования. Прежде чем перейти к рассмотрению методов расчета многопутных участков с несколькими (или одним) постами секционирования, установим для такой схемы закон распределения нагрузки между двумя подстанциями. Будем полагать, что сопротивление 1 км проводов отдельных путей в общем случае различно, но для каждого пути постоянно по его длине.

Задача заключается в доказательстве двух положений:

1) распределение между подстанциями нагрузки, лежащей на участке между ними, не зависит от соотношения сопротивлений проводов отдельных путей, от количества и мест расположения поперечных соединений проводов контактной сети путей (постов секционирования) и рельсовых путей;

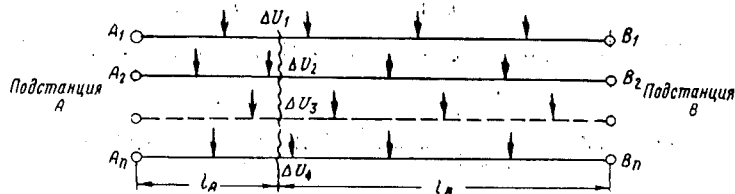


Рис. 106. Схема многопутного участка, питаемого с двух сторон, без поста секционирования

2) распределение нагрузки между фидерами подстанции не зависит от количества и мест расположения поперечных соединений рельсовых путей.

Первое положение позволит расчет токораспределения между подстанциями с любым количеством как угодно расположенных поперечных соединений вести в предположении полного параллельного соединения проводов всех путей; второе положение даст возможность более простым путем определить нагрузки фидеров подстанций.

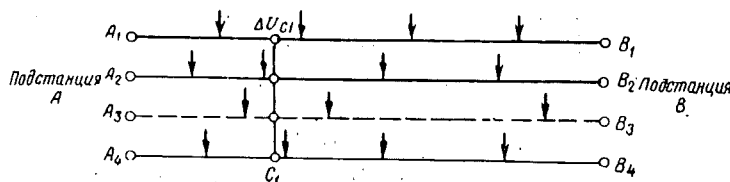


Рис. 107. Схема многопутного участка, питаемого с двух сторон, с постом секционирования

Для доказательства этих положений примем, что на многопутном участке с раздельным питанием путей (рис. 106) в данный момент располагается некоторое количество нагрузок. Пусть эти нагрузки вызывают в проводах отдельных путей от подстанции до точки, лежащей на расстоянии l_A от подстанции А (и l_B от подстанции В), потери напряжения, соответственно равные $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3$ и т. д. Если в этом месте участка соединить между собой провода всех путей, то установится некоторая новая потеря напряжения ΔU_{C1} , одинаковая для всех проводов (рис. 107). Нагрузки питающих фидеров теперь изменятся на величину тока, который вызывает указанное выше изменение потерь напряжения до точки C_1 .

Таким образом, нагрузка фидера A_1 изменится на величину

$$\Delta I_{A_1} = \frac{\Delta U_{C1} - \Delta U_1}{r_1 l_A},$$

а для фидера B_1 — на величину

$$\Delta I_{B_1} = \frac{\Delta U_{C1} - \Delta U_1}{r_1 l_B},$$

где r_1 — сопротивление проводов контактной сети первого пути в ом/км.

Если сопротивление проводов одного и того же пути на всем протяжении остается неизменным, можно прийти к выводу, что дополнительные нагрузки фидеров подстанций, питающих один и тот же путь, после включения поперечного соединения будут иметь один и тот же знак и находиться в отношении, обратно пропорциональном расстояниям от этих подстанций до мест расположения поперечного соединения, т. е.

$$\frac{\Delta I_{A1}}{\Delta I_{B1}} = \frac{l_B}{l_A}.$$

Обозначив отношение $\frac{l_B}{l_A}$ через a , можно написать

$$\Delta I_{A1} = a \Delta I_{B1}.$$

Очевидно, что для фидеров, питающих другие пути,

$$\Delta I_{A2} = a \Delta I_{B2};$$

$$\Delta I_{A3} = a \Delta I_{B3};$$

$$\Delta I_{An} = a \Delta I_{Bn}.$$

Сложив левые и правые части уравнений, получим

$$\sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{A\kappa} = a \sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{B\kappa}.$$

Учитывая, что при неизменной суммарной нагрузке на участке не может измениться и сумма нагрузок обеих подстанций, приходим к выводу, что сумма приращений нагрузок по всем фидерам, появляющихся с введением в схему поперечного соединения, должна равняться нулю, т. е.

$$\sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{A\kappa} + \sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{B\kappa} = 0,$$

Подставив сюда вместо первого члена его значение из предыдущего выражения, получим

$$a \sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{B\kappa} + \sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{B\kappa} = 0,$$

или

$$\sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{B\kappa} (a + 1) = 0,$$

отсюда, так как $a + 1 \neq 0$,

$$\sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{B\kappa} = 0,$$

а следовательно и

$$\sum_{\kappa=1}^n \Delta I_{A\kappa} = 0.$$

Полученные выражения указывают на то, что введение в схему поперечного соединения не сказывается на распределении нагрузки между подстанциями.

Легко показать, что при введении еще одного поперечного соединения C_2 (рис. 108) напряжение у пункта C_1 не изменится. Предположим обратное, т. е. что напряжение у пункта C_1 изменится. Тогда, очевидно, изменится и разность напряжений как от подстанции A до точки C_1 , так и от подстанции B до точки C_1 на одну и ту же величину. Изменение разности напряжений между указан-

ными точками будет определять изменение тока подстанций того же знака, т. е. при увеличении разности (уменьшение напряжения у пункта C_1) должен увеличиться и ток, даваемый обеими подстанциями, или наоборот. При неизменной же нагрузке на фидерной зоне одновременное увеличение тока обеих подстанций невозможно, значит предположение об изменении напряжения у пункта C_1 при введении в схему поперечного соединения C_2 неверно. Если же напряжение у первого поперечного соединения не изменится, то и при введении нового поперечного соединения можно (принимая пункт C_1 за подстанцию) доказать неизменяемость нагрузки подстанции B , а следовательно, и подстанции A .

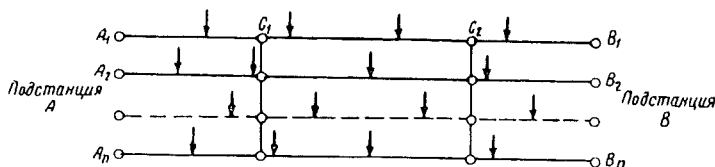


Рис. 108. Схема многопутного участка, питаемого с двух сторон, с несколькими постами секционирования

Таким образом, введение в схему поперечных соединений между проводами отдельных путей не оказывает влияния на распределение нагрузки между подстанциями.

Следовательно, определение нагрузок подстанций можно вести так, как и для схемы раздельного питания.

Следует подчеркнуть, что в наших рассуждениях ни количество, ни расположение поперечных соединений в рельсовой сети не нашли отражения, а следовательно, они и не участвуют в распределении нагрузки между подстанциями.

Докажем, что распределение нагрузки между фидерами не зависит от схемы соединения рельсовых путей.

Если нагрузка подстанции известна, то ее распределение между фидерами можно найти из условия, что потеря напряжения в проводах над каждым путем

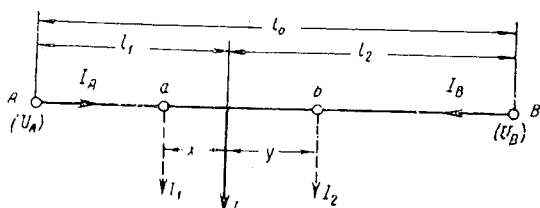


Рис. 109. К способу переноса токов на линии, питаемой с двух сторон

от подстанции до секционного поста одинакова. Таким образом, ни схема соединения рельсов, ни сопротивление рельсов не войдут в расчет распределения нагрузки подстанции между ее фидерами.

Однако нагрузки фидеров будут зависеть от того, имеет ли место поперечное соединение между проводами контактной

сети пути или питание их раздельное. Таким образом, хотя введение поперечных соединений не вызывает изменений в нагрузке подстанции, но оно вызовет перераспределение ее по фидерам.

Определение нагрузки фидеров подстанций при наличии поперечных соединений (постов секционирования) можно вести, используя известное «Правило переноса токов». Если из какой-нибудь сложной сети вырезать часть, не содержащую узлов, на концах которой поддерживается напряжение соответственно U_A и U_B (рис. 109), то токи, текущие от точек A и B , могут быть определены так же, как и распределяется нагрузка между двумя пунктами питания с различными напряжениями.

Токи I_A и I_B состоят каждый из суммы двух токов: одного, составляющего часть нагрузочного тока $\frac{Il_2}{l}$ или $\frac{Il_1}{l}$ (токи, которые давали бы подстанции, расположенные в пунктах A и B при $U_A = U_B$), и другого — уравни-

тельного тока, вызванного разностью напряжений конечных пунктов A и B .

Упомянутое выше правило состоит в том, что токи, текущие через пункты A и B , не изменятся, если ток I разложить на две части I_1 и I_2 , приложенные в точках a и b (см. рис. 109), и если эти части будут обратно пропорциональны расстояниям, на которое отнесены от начального положения. Естественно, что

$$I_1 + I_2 = I.$$

Действительно,

$$I_A = I_1 \frac{l_2 + x}{l} + I_2 \frac{l_2 - y}{l} + \frac{U_A - U_B}{rl}.$$

Заменяв

$$I_1 = I \frac{y}{x + y} \text{ и } I_2 = I \frac{x}{x + y},$$

получим

$$I_A = I \frac{l_2}{l} + \frac{U_A - U_B}{rl}.$$

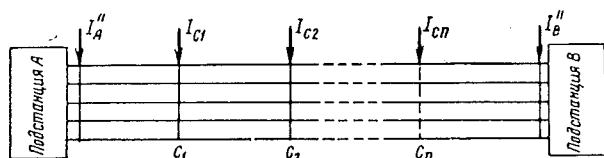


Рис. 110. К расчету многопутного участка с несколькими постами секционирования способом переноса токов

Это положение можно использовать для расчета схемы многопутного участка при одном или нескольких поперечных соединениях.

Разложив каждую из нагрузок, лежащих на отдельных секциях, на две составляющие, расположенные по концам рассма-

триваемой секции, и сложив затем токи в каждом пункте, получим схему рис. 110. Пользуясь этой схемой, расчет токораспределения между подстанциями можно производить таким же образом, как и для однопутного участка. Распределение тока между фидерами следует производить обратно пропорционально сопротивлениям единицы длины проводов питаемых ими путей (деля ток на равные части при одинаковом сопротивлении).

Таким образом, нагрузка фидеров подстанции может быть определена как сумма двух нагрузок: первой, получающейся в результате разнесения нагрузки к подстанции и к посту, и второй, получающейся от нагрузки у постов (появляющейся после разложения токов).

Для наиболее часто встречающегося случая — двухпутного участка с одним постом секционирования — ниже приводится расчет токораспределения. Все нагрузки на отдельных секциях разлагаются по указанному выше способу и задача сводится к схеме рис. 111, где токи I_{A1} , I_{A2} , I_{B1} и I_{B2} есть суммы составляющих токов, перенесенных в точки присоединения фидеров, а ток I_C равен сумме вторых составляющих со всех участков, перенесенных в точку C .

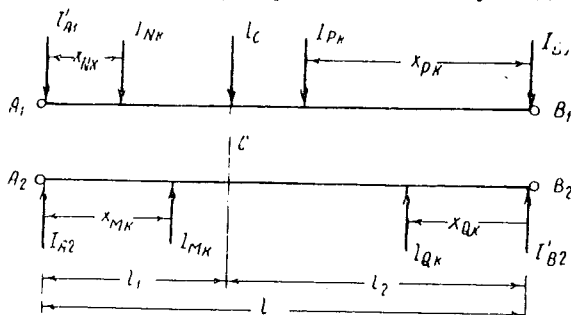


Рис. 111. К расчету двухпутного участка с одним постом секционирования способом переноса токов

Если представить, что до перехода к схеме рис. 111 на участках A_1C , A_2C , B_1C и B_2C находились нагрузки с индексами соответственно N , M , P и Q при числе их n , m , p и q , то указанные токи могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{A1}'' &= \frac{1}{l_1} \sum_{\kappa=1}^n I_{N\kappa} x_{N\kappa}; & I_{A1}' &= \frac{1}{l_1} \sum_{\kappa=1}^n I_{N\kappa} (l_1 - x_{N\kappa}); \\ I_{A2}'' &= \frac{1}{l_1} \sum_{\kappa=1}^m I_{M\kappa} x_{M\kappa}; & I_{A2}' &= \frac{1}{l_1} \sum_{\kappa=1}^m I_{M\kappa} (l_1 - x_{M\kappa}); \\ I_{B1}'' &= \frac{1}{l_2} \sum_{\kappa=1}^p I_{P\kappa} x_{P\kappa}; & I_{B1}' &= \frac{1}{l_2} \sum_{\kappa=1}^p I_{P\kappa} (l_2 - x_{P\kappa}); \\ I_{B2}'' &= \frac{1}{l_2} \sum_{\kappa=1}^q I_{Q\kappa} x_{Q\kappa}; & I_{B2}' &= \frac{1}{l_2} \sum_{\kappa=1}^q I_{Q\kappa} (l_2 - x_{Q\kappa}). \end{aligned}$$

Ток I_C будет определяться выражением

$$I_C = I_{A1}'' + I_{A2}'' + I_{B1}'' + I_{B2}''.$$

Координаты нагрузок x_{κ} берутся от подстанции, к которой примыкает данная часть участка.

Ток узла I_C распределяется между подстанциями на части, определяемые (при неизменном сопротивлении единицы длины проводов вдоль линии) следующими выражениями:

для подстанции A

$$I_{CA} = I_C \frac{l_2}{l};$$

для подстанции B

$$I_{CB} = I_C \frac{l_1}{l}.$$

В частном случае, при расположении поста посередине фидерной зоны

$$l_1 = l_2 = \frac{1}{2} l, \quad I_{CA} = I_{CB} = \frac{1}{2} I_C.$$

Если для большей общности результатов принять, что сопротивление проводов второго пути (A_2B_2) в ψ раз больше сопротивления проводов первого пути (A_1B_1), то части тока узла I_{CA} и I_{CB} распределяются по фидерам обратно пропорционально сопротивлениям проводов, т. е.

для фидера A_1

$$I_{CA1} = I_{CA} \frac{\psi}{1 + \psi} = I_C \frac{\psi l_2}{(1 + \psi) l};$$

для фидера A_2

$$I_{CA2} = I_{CA} \frac{1}{1 + \psi} = I_C \frac{l_2}{(1 + \psi) l};$$

для фидера B_1

$$I_{CB1} = I_{CB} \frac{\psi}{1 + \psi} = I_C \frac{\psi l_1}{(1 + \psi) l};$$

для фидера B_2

$$I_{CB2} = I_{CB} \frac{1}{1 + \psi} = I_C \frac{l_1}{(1 + \psi) l}.$$

Полные токи фидеров состоят из двух слагаемых:

$$\left. \begin{aligned} I_{A1} &= I'_{A1} + I_{CA1}; \\ I_{A2} &= I'_{A2} + I_{CA2}; \\ I_{B1} &= I'_{B1} + I_{CB1}; \\ I_{B2} &= I'_{B2} + I_{CB2}. \end{aligned} \right\} \quad (109)$$

При равных сопротивлениях проводов обоих путей, т. е. при $\psi = 1$,

$$I_{CA1} = I_{CA2} = I_C \frac{l_2}{2l_0}; \quad I_{CB1} = I_{CB2} = I_C \frac{l_1}{2l_0}.$$

Если, к тому же, пост расположен посередине фидерной зоны, т. е. $l_1 = l_2 = \frac{1}{2} l$, то слагающая тока фидера от тока узла (для всех фидеров) будет равна $\frac{1}{4} I_C$.

Получив распределение нагрузки между фидерами подстанций, нетрудно определить токораспределение на линии и найти потерю напряжения в сети до любой нагрузки.

Как было указано выше, токораспределение в контактной сети не зависит от числа и расположения поперечных соединений в рельсовой сети. Это дает право при расчетах токораспределения и потерь напряжения в проводах контактной сети использовать описанные способы, принимая в расчет лишь сопротивление проводов контактной сети. Для большей же точности расчета потерю напряжения в рельсовой сети можно определять так же, как для однопутного участка (так как обычно все рельсы соединены между собой). Получив потерю напряжения до каждой нагрузки в контактной сети и в рельсах, можно простым суммированием этих величин найти общее значение потери напряжения до каждой нагрузки.

Для сети с несколькими узловыми пунктами (практически при трех или более точках соединения проводов между двумя подстанциями) определение потери напряжения можно без большой погрешности производить в предположении полного параллельного соединения проводов отдельных путей.

Тяговая подстанция, как правило, питает несколько фидерных зон. Обычно при расчете мгновенных схем определяются отдельно нагрузки каждого фидера. Нагрузка же подстанции для данного момента времени будет являться простой суммой нагрузок ее фидеров

$$I_c = \sum_{k=1}^n I_{fk},$$

где I_{fk} — ток k -го фидера в a ;
 n — число фидеров данной подстанции;
 I_c — ток подстанции в a .

§ 23. РАСЧЕТ НАГРУЗОК ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ИХ ШИНАХ¹

В рассмотренных выше способах определения нагрузок тяговых подстанций при расчете мгновенных схем предполагалось, что напряжения на шинах всех подстанций всегда равны, или во всяком случае остаются неизменными вне зависимости от изменения их нагрузок. И лишь формально было показано, как определяется ток подстанции (или ее фидера), если напряжения

¹ § 23 написан Г. Г. Марквардтом.

подстанций не равны между собой. Однако определение уравнительного тока сопряжено со значительными трудностями, тем более, если параллельно работают более двух подстанций (последнее практически имеет место в подавляющем числе случаев).

В действительности напряжения различных подстанций могут отличаться друг от друга как из-за неравенства напряжения их холостого хода, так и вследствие изменения напряжения на шинах подстанций при изменении нагрузок, которое определяется видом их внешней характеристики.

Иногда расчет нагрузок подстанций без учета этого обстоятельства может привести к существенным ошибкам. В особенности это относится к схеме с распределенным преобразованием энергии и к метрополитену, так как

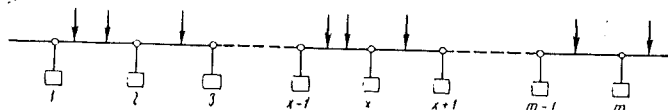


Рис. 112. Общая схема расположения нагрузок на электрифицированном участке с m подстанциями

в этих случаях сопротивление контактной сети и рельсов невелико, вследствие чего уравнительные токи между подстанциями, вызванные неравенством напряжений, могут достигать значительной величины.

При равных напряжениях холостого хода подстанций ошибка будет тем выше, чем больше наклон внешней характеристики подстанции и чем меньше сопротивление контактной сети и фидеров, связывающих соседние подстанции.

При схеме распределенного преобразования энергии расстояние между подстанциями, а следовательно, и сопротивления связывающих их проводов малы, мощность каждой подстанции также относительно мала и внешние характеристики их имеют значительный наклон.

Поэтому при такой системе учет действительного режима напряжения на шинах тяговых подстанций имеет существенное значение. В этом случае ряд соседних подстанций питает нагрузку совместно, разгружая подстанции, между которыми эта нагрузка расположена. Это ведет к тому, что подстанции работают не как отдельные питающие пункты, а как единая система. При учете этого важно отметить большое влияние характеристик тяговых подстанций на величины пиковых значений нагрузок подстанций и токов короткого замыкания в контактной сети. В этом случае падающие характеристики сказываются благоприятно на работе системы энергоснабжения и условиях ее защиты.

Действительно, за счет наклона характеристик значения нагрузок подстанций и фидеров снижаются, в то время как токи короткого замыкания увеличиваются за счет подпитки от соседних подстанций через быстродействующий выключатель поврежденного фидера.

Ниже рассматривается расчет нагрузок тяговых подстанций с учетом изменения напряжения на их шинах применительно к системе энергоснабжения постоянного тока, поскольку при переменном токе этот учет не имеет существенного практического значения.

Для количественной оценки влияния режима напряжения на шинах тяговых подстанций при определении их нагрузок рассмотрим участок железной дороги с m подстанциями (рис. 112), питающими ряд нагрузок. Все нагрузки, расположенные на контактной сети, по правилу переноса токов (см. § 22) могут быть заменены нагрузками, приложенными непосредственно к подстанциям. На рис. 113 показаны нагрузки I_{0x-1} , I_{0x} и I_{0x+1} , приложенные к подстанциям с номерами $x-1$, x и $x+1$. Эти эквивалентные

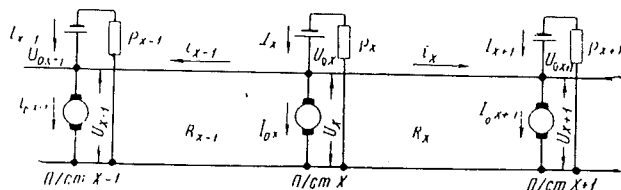


Рис. 113. Эквивалентная схема для расчета нагрузок тяговых подстанций

нагрузки равны нагрузкам подстанций, определенным без учета неравенства напряжений на их шинах и будут отличаться от действительных нагрузок I_{x-1} , I_x и I_{x+1} . Обозначим напряжение на шинах этих подстанций через U_{x-1} , U_x и U_{x+1} . Напряжения холостого хода тех же подстанций в общем случае могут быть не равны. Пусть эти напряжения будут: U_{0x-1} , U_{0x} и U_{0x+1} . На рис. 113 они показаны, как э. д. с. источников тока, внутренние сопротивления которых равны ρ_{x-1} , ρ_x и ρ_{x+1} . При помощи этих эквивалентных сопротивлений учитывается изменение напряжения на шинах тяговых подстанций при изменении их нагрузок. В общем случае при нелинейной внешней характеристике подстанции эквивалентное сопротивление ее также будет нелинейным.

Влияние неравенства напряжений на шинах различных тяговых подстанций может быть учтено при помощи уравнильных токов i_{x-1} и i_x .

Эти уравнильные токи могут быть найдены из очевидных выражений:

$$i_{x-1} = \frac{U_x - U_{x-1}}{R_{x-1}}$$

и

$$i_x = \frac{U_x - U_{x+1}}{R_x},$$

где R_{x-1} — сопротивление контактной и рельсовой сети фидерной зоны слева от подстанции x ;

R_x — то же справа от нее.

Кроме того, для подстанции x имеем

$$I_x = I_{0x} + i_{x-1} + i_x,$$

или, подставляя сюда значения i_{x-1} и i_x из предыдущих выражений, получим

$$I_x = I_{0x} + \frac{U_x - U_{x-1}}{R_{x-1}} + \frac{U_x - U_{x+1}}{R_x}. \quad (110)$$

Напряжения U_x , U_{x-1} и U_{x+1} зависят от вида внешней характеристики подстанции и от действительных нагрузок подстанций I_x , I_{x-1} и I_{x+1} . При изменении этих нагрузок напряжение меняется по соответствующей характеристике.

Таким образом, непосредственное использование уравнения (110) для определения действительных нагрузок подстанций затруднено тем, что входящие в него напряжения сами являются функциями искомых величин. Если зависимость напряжения на шинах подстанции от ее нагрузки нелинейна, или, что то же, подстанции имеют нелинейные характеристики, то задача точного определения нагрузок подстанции становится особенно сложной. В этом случае действительные нагрузки подстанции находят методом последовательного приближения.

В первом приближении нагрузку, например, подстанции x можно найти из уравнения (110), определяя напряжения U_{x-1} , U_x и U_{x+1} по характеристикам соответствующих подстанций для токов I_{0x-1} , I_{0x} и I_{0x+1} , которые находятся обычным способом при равных напряжениях подстанций. Во многих случаях это первое приближение даст удовлетворительные результаты.

При желании большей точности можно прибегнуть ко второму приближению. Для этого вначале находятся величины нагрузок всех подстанций в первом приближении, как это указано для подстанции x , и для полученных нагрузок по характеристикам подстанций вновь определяются уточненные напряжения на шинах подстанций. При подстановке этих значений напряжений в уравнение (110) находится второе, более точное значение нагрузки подстанции x , так же как и любой другой подстанции.

Задача значительно упрощается при линейных характеристиках тяговых подстанций, с которыми приходится встречаться в большинстве случаев.

При линейных характеристиках подстанций напряжения на их шинах можно представить в виде

$$\begin{aligned}U_x &= U_{0x} - \rho_x I_x, \\U_{x-1} &= U_{0x-1} - \rho_{x-1} I_{x-1}, \\U_{x+1} &= U_{0x+1} - \rho_{x+1} I_{x+1},\end{aligned}$$

где ρ_x , ρ_{x-1} и ρ_{x+1} — постоянные величины, каждую из которых можно назвать эквивалентным внутренним сопротивлением подстанции. В эту величину удобно включать сопротивление отсасывающего провода.

При подстановке отсюда значений напряжений в уравнение (110) найдем

$$\begin{aligned}I_x &= I_{0x} + \frac{U_{0x} - U_{0x-1}}{R_{x-1}} + \frac{U_{0x} - U_{0x+1}}{R_x} + \\&+ \frac{\rho_{x-1} I_{x-1} - \rho_x I_x}{R_{x-1}} + \frac{\rho_{x+1} I_{x+1} - \rho_x I_x}{R_x}.\end{aligned}$$

Решая это уравнение относительно I_x , получим

$$I_x = \frac{1}{1 + \frac{\rho_x}{R_{x-1}} + \frac{\rho_x}{R_x}} \left(I'_{0x} + \frac{\rho_{x-1}}{R_{x-1}} I_{x-1} + \frac{\rho_{x+1}}{R_x} I_{x+1} \right). \quad (111)$$

Здесь

$$I'_{0x} = I_{0x} + \frac{U_{0x} - U_{0x-1}}{R_{x-1}} + \frac{U_{0x} - U_{0x+1}}{R_x}. \quad (112)$$

Эта величина определяется обычным способом в предположении, что напряжения на шинах подстанций равны напряжениям холостого хода. При равных напряжениях холостого хода всех подстанций $I'_{0x} = I_{0x}$. Уравнения вида (111) могут быть написаны, очевидно, для всех подстанций.

При этом для крайних подстанций при $x = 1$ и $x = m$ получим

$$I_1 = \frac{1}{1 + \frac{\rho_1}{R_1}} \left(I'_{01} + \frac{\rho_2}{R_1} I_2 \right) \quad (111')$$

и

$$I_m = \frac{1}{1 + \frac{\rho_m}{R_{m-1}}} \left(I'_{0m} + \frac{\rho_{m-1}}{R_{m-1}} I_{m-1} \right). \quad (111'')$$

Таким образом, может быть составлена система из m уравнений с m неизвестными нагрузками подстанций. Решение этой системы дает точное значение нагрузок подстанций.

Однако при большом числе подстанций такие расчеты связаны со значительной затратой времени, вследствие чего желательно иметь более простые (приближенные) способы расчета нагрузок тяговых подстанций с учетом действительного напряжения на их шинах.

Первое, в большинстве случаев достаточное приближение можно получить, если в уравнении (111) токи I_{x-1} и I_{x+1} заменить их значениями, полученными обычным расчетом без учета наклона характеристик тяговых подстанций (но с учетом неравенства напряжений холостого хода), т. е. принять, что

$$I_{x-1} = I'_{0x-1} \text{ и } I_{x+1} = I'_{0x+1}.$$

При этом получим следующую формулу для определения тока подстанции

$$I_x = \frac{1}{1 + \frac{\rho_x}{R_{x-1}} + \frac{\rho_x}{R_x}} \left(I'_{0x} + \frac{\rho_{x-1}}{R_{x-1}} I'_{0x-1} + \frac{\rho_{x+1}}{R_x} I'_{0x+1} \right). \quad (113)$$

Эта формула в подавляющем большинстве случаев дает достаточно точное решение задачи. Можно этим способом, применяя и далее метод последовательного приближения, определить токи подстанций с любой точностью.

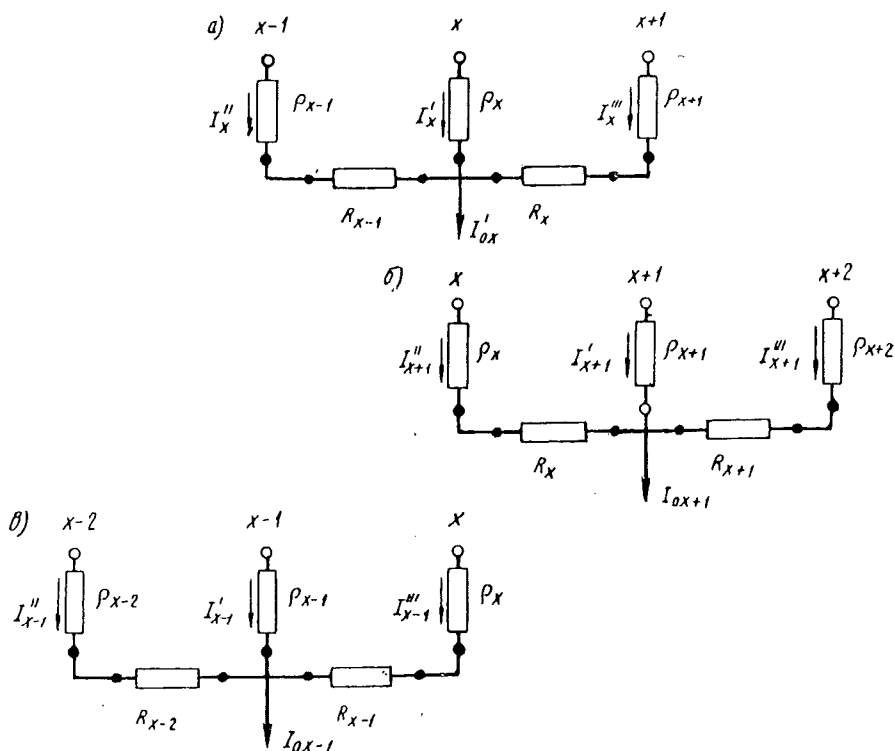


Рис. 114. К расчету нагрузки подстанции методом наложения

Метод последовательного приближения, однако, требует существенной затраты времени, поэтому в тех случаях, когда требуется получить точность решения более высокую, чем по уравнению (113), можно использовать излагаемый ниже метод.

Так как мы рассматриваем случай линейных характеристик тяговых подстанций, то для определения нагрузки подстанции x можно применить метод наложения, рассмотрев отдельно ток этой подстанции от нагрузки I'_{0x} , расположенной непосредственно у рассматриваемой подстанции, и токи той же подстанции от нагрузок, расположенных у других подстанций. При этом, не допуская существенной погрешности, можно учитывать нагрузки только у подстанций, соседних с рассматриваемой.

Составляющая тока подстанции x — I'_x от нагрузки I'_{0x} (рис. 114, а) может быть найдена в предположении, что эта нагрузка распределяется только между тремя подстанциями: x , $x-1$ и $x+1$. Влиянием остальных подстанций можно пренебречь.

В этом случае, полагая $I_{x-1} = I'_x$ и $I_{x+1} = I''_x$ (рис. 114) и воспользовавшись формулой (111), найдем

$$I'_x = \frac{1}{1 + \frac{\rho_x}{R_{x-1}} + \frac{\rho_x}{R_x}} \left(I'_{0x} + \frac{\rho_{x-1}}{R_{x-1}} I'_x + \frac{\rho_{x+1}}{R_x} I''_x \right). \quad (a)$$

Кроме того, имеем

$$I''_x (R_{x-1} + \rho_{x-1}) = I'''_x (R_x + \rho_{x+1}) = I'_x \rho_x,$$

и, следовательно,

$$и \quad \left. \begin{aligned} I''_x &= \frac{\rho_x}{R_{x-1} + \rho_{x-1}} I'_x \\ I'''_x &= \frac{\rho_x}{R_x + \rho_{x+1}} I'_x \end{aligned} \right\} \quad (б)$$

Подставляя эти значения токов I''_x и I'''_x в выражение (а), получим

$$I'_x = \frac{1}{1 + \frac{\rho_x}{R_{x-1}} + \frac{\rho_x}{R_x}} \left(I'_{0x} + \frac{\rho_x}{R_{x-1}} \frac{\rho_x}{R_{x-1} + \rho_{x-1}} I'_x + \frac{\rho_{x+1}}{R_x} \frac{\rho_x}{R_x + \rho_{x+1}} I'_x \right).$$

Решая это уравнение относительно I'_x , найдем

$$I'_x = \frac{I'_{0x}}{1 + \frac{\rho_x}{R_{x-1} + \rho_{x-1}} + \frac{\rho_x}{R_x + \rho_{x+1}}}. \quad (114)$$

Введя обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= \frac{\rho_x}{R_{x-1} + \rho_{x-1}}, \\ \gamma_x &= \frac{\rho_x}{R_x + \rho_{x+1}}, \end{aligned} \right\} \quad (115)$$

получим окончательно

$$I'_x = \frac{I'_{0x}}{1 + \varphi_x + \gamma_x}. \quad (116)$$

Кроме того, при этих обозначениях вместо уравнения (б) получим

$$и \quad \left. \begin{aligned} I''_x &= \varphi_x I'_x = \frac{\varphi_x}{1 + \varphi_x + \gamma_x} I'_{0x} \\ I'''_x &= \gamma_x I'_x = \frac{\gamma_x}{1 + \varphi_x + \gamma_x} I'_{0x} \end{aligned} \right\} \quad (в)$$

Ток I''_{x+1} , приходящийся на рассматриваемую подстанцию x от нагрузки I'_{0x} , расположенной у подстанции $x+1$, можно найти, разложив эту нагрузку между подстанциями x , $x+1$ и $x+2$ (рис. 114, б). Величина этого тока может быть найдена из первого уравнения (в) при увеличении всех индексов на единицу

$$I''_{x+1} = \frac{\varphi_{x+1}}{1 + \varphi_{x+1} + \gamma_{x+1}} I'_{0x+1}. \quad (117)$$

Таким же путем из второго уравнения (в) найдем ток I'''_{x-1} , который приходится на подстанцию x от нагрузки, расположенной у подстанции $x-1$ (рис. 114, в),

$$I_{x-1}''' = \frac{\gamma_{x-1}}{1 + \varphi_{x-1} + \gamma_{x-1}} I_{0x-1}' \quad (118)$$

Общий ток подстанции с учетом нагрузок I_{0x}' , I_{0x-1}' , I_{0x+1}' найдем как сумму

$$I_x = I_x' + I_{x-1}''' + I_{x+1}''$$

или

$$I_x = \frac{I_{0x}'}{1 + \varphi_x + \gamma_x} + \frac{\gamma_{x-1}}{1 + \varphi_{x-1} + \gamma_{x-1}} I_{0x-1}' + \frac{\varphi_{x+1}}{1 + \varphi_{x+1} + \gamma_{x+1}} I_{0x+1}' \quad (119)$$

Как эта формула, так и формула (113) могут быть записаны в таком виде

$$I_x = B_x I_{0x}' + C_x I_{0x-1}' + D_x I_{0x+1}' \quad (120)$$

Коэффициенты B_x , C_x и D_x имеют различные значения при решении задачи по формулам (113) или (119).

При пользовании формулой (113) значение этих коэффициентов для всех подстанций, кроме первой и последней, ясны из самого уравнения. Для первой же подстанции ($x = 1$), полагая $I_{0x-1}' = 0$ и $R_{x-1} = \infty$, получим

$$B_1 = \frac{1}{1 + \frac{\rho_1}{R_1}}; \quad C_1 = 0 \quad \text{и} \quad D_1 = \frac{\rho_2}{R_1 + \rho_1}.$$

Для последней подстанции ($x = m$), положив

$$I_{0x+1}' = 0 \quad \text{и} \quad R_x = \infty,$$

получим

$$B_m = \frac{1}{1 + \frac{\rho_m}{R_{m-1}}}; \quad C_m = \frac{\rho_{m-1}}{R_{m-1} + \rho_m} \quad \text{и} \quad D_m = 0.$$

При использовании для расчетов формулы (119) для двух первых и двух последних подстанций часть коэффициентов будет отличаться от полученных из общего вида уравнения (119). Приводим их здесь без вывода.

Для первой подстанции

$$B_1 = \frac{1}{1 + \gamma_1} \quad \text{и} \quad C_1 = 0$$

и для последней

$$B_m = \frac{1}{1 + \varphi_m} \quad \text{и} \quad D_m = 0.$$

Для второй подстанции изменится коэффициент C_2 ; он будет равен

$$C_2 = \frac{\frac{\rho_1}{\rho_2} \varphi_2}{1 + \varphi_2 + \gamma_2}.$$

Соответственно для предпоследней подстанции коэффициент D_{m-1} будет

$$D_{m-1} = \frac{\frac{\rho_m}{\rho_{m-1}} \gamma_{m-1}}{1 + \varphi_{m-1} + \gamma_{m-1}}.$$

Формула (119) позволяет определять нагрузки подстанций с вполне достаточной степенью точности при линейных характеристиках подстанции. Достаточную точность во многих случаях дает также и более простая формула (113).

§ 24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Потери мощности в контактной сети можно найти как разность между мощностью, даваемой подстанциями, и суммарной мощностью потребителей т. е.

$$\Delta P = P_c - P_n,$$

где ΔP — потеря мощности в *квт*;

P_c — мощность, даваемая подстанциями, в *квт*;

P_n — мощность, получаемая потребителями, в *квт*.

При одностороннем питании мощность, отдаваемая подстанцией,

$$P_c = U \sum_{k=1}^n I_k \cdot 10^{-3},$$

где n — число потребителей;

U — напряжение на шинах подстанции в *в*;

I_k — ток k -го потребителя в *а*.

Мощность, получаемая потребителями,

$$P_n = \sum_{k=1}^n P_k = \sum_{k=1}^n U_k I_k \cdot 10^{-3},$$

где U_k — напряжение у k -го потребителя в *в*.

Очевидно,

$$\Delta P = \sum_{k=1}^n (U - U_k) I_k \cdot 10^{-3},$$

где $(U - U_k)$ — потеря напряжения в сети до k -го потребителя.

Обозначив ее через ΔU_k , получим

$$\Delta P = \sum_{k=1}^n \Delta U_k I_k \cdot 10^{-3}, \quad (121)$$

т. е. потеря мощности в сети может определяться как сумма произведений токов, потребляемых поездами на потери напряжения до этих поездов (называемых составляющими потерь мощности).

При двустороннем питании в общем случае (при наличии поперечных соединений на многопутном участке) имеет место схема, приведенная на рис. 108.

Напряжения подстанций будем считать не зависящими от нагрузки и не равными между собой ($U_A > U_B$).

Мощности, отдаваемые подстанциями A и B , равны

$$P_A = U_A I_A \cdot 10^{-3}$$

и

$$P_B = U_B I_B \cdot 10^{-3}.$$

Подставив сюда значения I_A и I_B из уравнения (106), получим суммарную мощность, отдаваемую подстанциями в сеть,

$$P_c = P_A + P_B = [U_A (I'_A + I_y) + U_B (I'_B - I_y)] \cdot 10^{-3},$$

или

$$P_c = [U_A I'_A + U_B I'_B + I_y (U_A - U_B)] \cdot 10^{-3}.$$

Обозначив $U_A - U_B = \Delta U_{AB}$, подставим $U_A = U_B + \Delta U_{AB}$, а также заменив

$$I'_A + I'_B = \sum_{k=1}^n I_k,$$

где n — число нагрузок на всех путях,

получим

$$P_c = \left[U_B \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} + \Delta U_{AB} \sum_{\kappa=1}^n I_{A\kappa} + \Delta U_{AB} I_y \right] \cdot 10^{-3}.$$

Мощность, получаемая потребителями, будет равна

$$P_n = \sum_{\kappa=1}^n U_{\kappa} I_{\kappa} \cdot 10^{-3}.$$

Здесь U_{κ} — действительное напряжение у κ -й нагрузки, которое равно

$$U_{\kappa} = U_{B\kappa} + \Delta U_{AB\kappa} \text{ (рис. 115),}$$

где $U_{B\kappa}$ — напряжение у нагрузки I_{κ} в предположении равенства напряжений на подстанциях A и B;

$\Delta U_{AB\kappa}$ — повышение напряжения у нагрузки I_{κ} за счет того, что $U_A > U_B$.

Тогда

$$P_n = \sum_{\kappa=1}^n (U_{B\kappa} + \Delta U_{AB\kappa}) I_{\kappa} \cdot 10^{-3}.$$

Но (рис. 115)

$$\Delta U_{AB\kappa} = \Delta U_{AB} \frac{l_{B\kappa}}{l} = \Delta U_{AB} \frac{l_{A\kappa}}{I_{\kappa}},$$

где $I_{A\kappa}$ — доля тока I_{κ} , поступающая от подстанции A при условии, что $U_A = U_B$.

Тогда

$$P_n = \left[\sum_{\kappa=1}^n U_{B\kappa} I_{\kappa} + \Delta U_{AB} \sum_{\kappa=1}^n I_{A\kappa} \right] \times \\ \times 10^{-3} \text{ квт.}$$

Так как

$$\Delta P = P_c - P_n,$$

то, подставляя сюда полученные выше значения составляющих, получим

$$\Delta P = \left[\sum_{\kappa=1}^n (U_B - U_{B\kappa}) I_{\kappa} + \Delta U_{AB} I_y \right] \times 10^{-3}.$$

Из рис. 115 видно, что

$$U_B - U_{B\kappa} = \Delta U_{\kappa}.$$

Поэтому

$$\Delta P = \left[\sum_{\kappa=1}^n \Delta U_{\kappa} I_{\kappa} + \Delta U_{AB} I_y \right] \cdot 10^{-3}. \quad (122)$$

Произведение $\Delta U_{AB} I_y$ можно назвать составляющей потери мощности от уравнивающего тока и обозначить ΔP_y . Очевидно, что при $U_A = U_B$

$$\Delta P_y = 0.$$

При этом формула (122) превращается в формулу (121).

Таким образом, потеря мощности в сети при разных напряжениях на подстанциях может определяться как сумма двух составляющих: потери мощности при условии равного напряжения на подстанциях и потери мощности, вызванной протеканием уравнивающего тока.

§ 25. ПОНЯТИЕ О ГРАФИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ МГНОВЕННЫХ СХЕМ

При расчете мгновенных схем можно пользоваться графическим способом (метод веревочных многоугольников), построенным на аналогии расчета этих схем с расчетом балки, заделанной одним концом, или свободно лежащей на

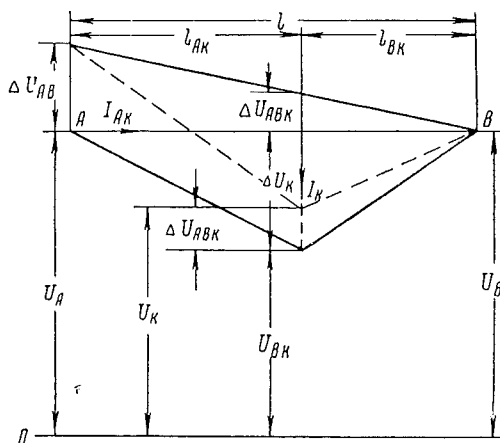
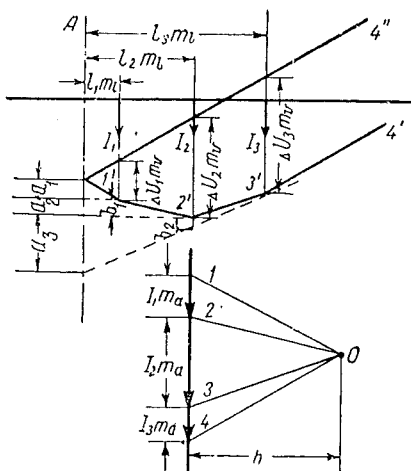


Рис. 115. График изменения напряжения в линии при одной нагрузке I_{κ} и неравных напряжениях подстанций ($U_A > U_B$)

Схема одностороннего питания. При графическом расчете в первую очередь в выбранном масштабе длин m_l откладываются участки от подстанции до места расположения нагрузок (рис. 116). Выбрав масштаб для тока m_i , в стороне в последовательном порядке по вертикали откладываются величины токов. Далее произвольно выбирается некоторая точка, так называемый полюс,



и соединяется лучами 1, 2, 3 и 4 с началами и концами отрезков, определяющих отдельные токи. Если провести (как обычно при построении веревочного многоугольника) на произвольном расстоянии по вертикали от линии, на которой расположены нагрузки, линию, параллельную лучу 1, затем через точку пересечения линии 1' с направлением первой нагрузки I_1 провести линию 2', параллельную лучу 2, через точку пересечения этой линии со второй нагрузкой I_2 — следующую линию 3', параллельную лучу 3, и т. д., затем из точки пересечения линии 1' с $A-A$ проведем линию 4'', параллельную 4', то получим веревочный многоугольник.

$$\frac{I_1 m_I}{h} = \frac{a_1}{l_1 m_l}, \quad \frac{I_2 m_I}{h} = \frac{a_2}{l_2 m_l}, \quad \frac{I_3 m_I}{h} = \frac{a_3}{l_3 m_l},$$

$$\frac{I_1 m_I}{h} = \frac{a_1}{l_1 m_l}, \quad \frac{I_2 m_I}{h} = \frac{a_2}{l_2 m_l}, \quad \frac{I_3 m_I}{h} = \frac{a_3}{l_3 m_l},$$

$$a_1 + a_2 + a_3 = \frac{1}{h} \frac{m_I m_l}{m_I + m_l} (I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3).$$
$$\frac{rh}{m_1 m_j} (a_1 + a_2 + a_3) = r (I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3).$$
$$\frac{r\hbar}{m_1 m_2} (a_1 + a_2 + a_3) = \Delta U_3.$$

Приняв, что величина

$$\frac{rh}{m_1 m_2} = \frac{1}{m_{12}},$$

$$\Delta U_3 = \frac{(a_1 + a_2 + a_3)}{m_U}.$$

Таким образом, можно отрезком $a_1 + a_2 + a_3$ измерять величину ΔU_3 .

Далее из того же рис. 116 следует, что

$$\frac{I_3 m_l}{h} = \frac{b_2}{(l_3 - l_2) m_l},$$

откуда

$$I_3 (l_3 - l_2) = \frac{h b_2}{m_l m_l}.$$

Умножив обе части последнего выражения на r , получим

$$I_3 r (l_3 - l_2) = \frac{r h b_2}{m_l m_l}.$$

Левая, а следовательно, и правая части этого выражения представляют потерю напряжения на участке между второй и третьей нагрузками:

$$\Delta U_3 - \Delta U_2 = \frac{r h b_2}{m_l m_l},$$

или иначе,

$$\Delta U_3 - \Delta U_2 = \frac{b_2}{m_U}.$$

Подставив сюда значение ΔU_3 из найденного выше, определим величину ΔU_2 :

$$\Delta U_2 = \frac{(a_1 + a_2 + a_3)}{m_U} - \frac{b_2}{m_U} = \frac{[(a_1 + a_2 + a_3) - b_2]}{m_U}.$$

Так же может быть установлена и величина потери напряжения в сети до первой нагрузки.

Из изложенного видно, что отрезки вертикалей, заключенных между линиями веревочного многоугольника и замыкающей (4"), в определенном масштабе дают величины потерь напряжения в соответствующих точках.

Удобнее всего, задавшись масштабами длин, токов и напряжений, определять величину h . Последняя может получиться неудобной. Тогда, изменяя принятые масштабы, можно подобрать удобное значение h .

Можно рекомендовать для расчетов магистральных участков следующие масштабы:

$$m_l = 0,01 \frac{\text{сМ}}{\text{а}} \text{ (в 1 сМ — 100 а);}$$

$$m_l = 0,5 \frac{\text{сМ}}{\text{кМ}} \text{ (в 1 сМ — 2 кМ);}$$

$$m_U = 0,01 \frac{\text{сМ}}{\text{в}} \text{ (в 1 сМ — 100 в).}$$

Если при этом, например, величина

$$r = 0,04 \frac{\text{ОМ}}{\text{кМ}},$$

то

$$h = \frac{0,01 \cdot 0,5}{0,01 \cdot 0,04} = 12,5 \text{ сМ.}$$

Однако величина r известна только при поверочных расчетах или для уже действующих линий. При проектировании же или при расчетах усиления и т. д. сечение проводов только предстоит определить из расчетов. Тогда можно решить эту задачу в общем виде, выразив потерю напряжения через неизвестную величину r . При этом следует задаться значением масштаба напряжений, выраженного через r .

Пусть, например, для графического расчета мгновенных схем выбраны масштабы:

$$m_I = 0,02 \frac{\text{сМ}}{\text{а}}, \quad m_U := 1 \frac{\text{сМ}}{\text{кМ}}$$

и

$$rm_U = 0,02 \frac{\text{сМ}}{\text{в} \cdot \frac{\text{кМ}}{\text{ОМ}}} \left(\text{в } 1 \text{ сМ} = 500 \text{ в} \cdot \frac{\text{кМ}}{\text{ОМ}} \right).$$

Тогда

$$h = \frac{m_I m_U}{rm_U} = \frac{0,02 \cdot 1}{0,002} = 10 \text{ см.}$$

Схема двустороннего питания. В этом случае многоугольник токов и веревочный многоугольник принимают вид, показанный на рис. 117.

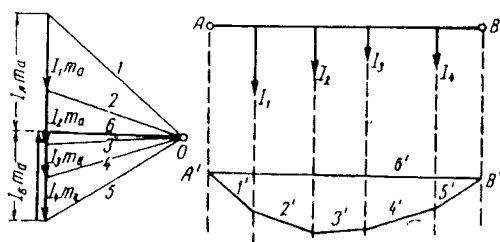


Рис. 117. К расчету линии, питаемой с двух сторон, с рядом сосредоточенных нагрузок графическим методом

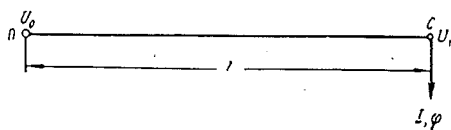
Кроме величины потери напряжения, у каждой нагрузки в этом случае веревочный многоугольник дает возможность определить токораспределение между подстанциями.

Действительно, если предположить, что ток подстанции B уже известен и равен I_B , то его можно рассматривать как нагрузку, расположенную в точке B , имеющую знак, противоположный знаком остальных нагрузок. Так как эта нагрузка питается от пункта A , то и ток I_B должен быть включен в многоугольник токов, но откладываться он будет уже вверх от нижней точки тока I_4 ; луч, проведенный к концу вектора I_B , обозначен цифрой 6.

Так же как и для одностороннего питания, построив веревочный многоугольник до пересечения с вертикалью BB' , следовало бы дальше провести линию, параллельную лучу 6, через точку B' (точка пересечения линии 5' с вертикалью B) и замыкающую ей параллельную, через точку A' . Если напряжения пунктов питания A и B равны, потеря напряжения в точке B (от A до B) равна нулю и отрезок вертикали, заключенный между замыкающей и веревочным многоугольником, также должен быть равен нулю; следовательно, замыкающая, проводимая из точки A' параллельно лучу 6, должна пройти через точку B' . Придя к такому выводу, нетрудно предложить способ для определения токов тяговых подстанций. Для этой цели достаточно после построения веревочного многоугольника (1', 2', 3', 4' и 5') провести через точки A' и B' замыкающую и параллельно ей на силовом многоугольнике через точку O провести луч 6. Последний отсечет от нижней точки на вертикали многоугольника токов отрезок, представляющий в выбранном масштабе ток подстанции B . Следовательно, сверху останется отрезок, соответствующий току подстанции A .

§ 26. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПОДСТАНЦИЙ И ПОТЕРЬ НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ДОРОГАХ ОДНОФАЗНОГО ТОКА ¹

При рассматриваемой схеме питания, очевидно, ток подстанции (или ее фидера) равен геометрической сумме токов, потребляемых в данный момент времени на фидерной зоне.

$$\dot{I}_\phi = \sum_{K=1}^n \dot{I}_K. \quad (123)$$
$$\dot{I}_K = I_{aK} - jI_{rK},$$
$$\dot{I}_{\phi} = \sum_{\kappa=1}^n I_{a\kappa} - j \sum_{\kappa=1}^n I_{r\kappa}, \quad (123')$$


Так как полный ток подстанции (или ее фидера) также может быть выражен через активную и реактивную составляющие, т. е.

$$\dot{I}_\phi = I_{a\phi} - jI_{r\phi},$$

TO

$$I_{a\phi} = \sum_{\kappa=1}^n I_{a\kappa} \quad (123'')$$

И

$$I_{r\phi} = \sum_{\kappa=1}^n I_{r\kappa}. \quad (123''')$$

[illegible]

Рис. 119. Векторная диаграмма для схемы рис. 118:
 U_1 — вектор напряжения у локомотива; I — ток, потребляемый им;
 U_0 — вектор напряжения на шинах тяговой подстанции

Для расчетов существенно важным являет-

ся не падение напряжения (вектор AB , рис. 119), а потеря его, определяющая величину напряжения у потребителя. Потеря напряжения, равная арифметической разности между напряжениями у подстанции и у локомотива, представлена отрезком AC (BC — засечка радиусом OB из центра O). Как видно из рис. 119, величина AC составляется из двух частей — AD и DC ($BD \perp AC$).

При расчетах обычно пренебрегают величиной DC , заменяя величину AC проекцией AB на вектор OA , т. е. отрезком AD . Такое допущение обычно

¹ § 26 написан совместно с М. Е. Крестьяновым

вносит незначительную ошибку (несколько преуменьшая потерю напряжения), но сильно упрощает расчетные формулы.

Потерю напряжения (вернее, ее приближенное значение) ΔU легко определить, спроектировав векторы AE и EB на прямую OC :

$$\Delta U = IR \cos \varphi + IX \sin \varphi = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi). \quad (124)$$

Здесь выражение $R \cos \varphi + X \sin \varphi$ имеет размерность сопротивления в ом.

При реактивном сопротивлении $-X$, значительно превышающем активное $-R$, и при достаточно высоком значении $\cos \varphi$ формула (124) может дать ощутимую ошибку. Так, при однофазном токе промышленной частоты и при $\cos \varphi = 0,9$ ошибка достигает 20%.

Более точный результат можно получить по формуле, вывод которой дается в курсах электротехники и работах, посвященных расчетам сетей:

$$\Delta U = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi) + \frac{I^2(R \cos \varphi - X \sin \varphi)^2}{2U}, \quad (124')$$

где U — напряжение в сети у электровоза в в.

Формула (124) может быть представлена в ином виде, если заменить $I \cos \varphi$ через I_a и $I \sin \varphi$ через I_r , т. е. через активную и реактивную составляющие тока, тогда

$$\Delta U = I_a R + I_r X. \quad (124'')$$

Как видно, потеря напряжения равна алгебраической сумме потерь напряжения от активной составляющей тока в активной части сопротивления и от реактивной составляющей в реактивной части сопротивления.

Наконец, можно выразить активную и реактивную составляющие тока через соответствующие составляющие мощности P и Q .

При этом, очевидно,

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U}. \quad (124''')$$

Здесь U — расчетное напряжение у электровоза, при котором определены активная и реактивная мощности.

Если сопротивления сети r_a и x , отнесенные к 1 км, как это было принято выше (см. главу III) считать постоянными по длине, то можно заменить $R = r_a l$ и $X = x l$ в формулах для определения потери напряжения в сети. Тогда

$$\Delta U = Il(r_a \cos \varphi + x \sin \varphi), \quad (125)$$

или

$$\Delta U = (I_a r_a + I_r x) l \quad (125')$$

и

$$\Delta U = \frac{Pr_a + Qx}{U} l. \quad (125'')$$

При расположении на фидерной зоне ряда нагрузок с различными $\cos \varphi$ (рис. 120) векторная диаграмма имеет вид, показанный на рис. 121, а (для упрощения рассмотрен только случай с двумя нагрузками). При построении

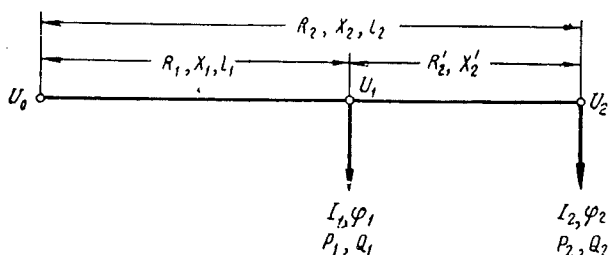


Рис. 120. Схема линии однофазного тока с двумя нагрузками

векторной диаграммы сначала откладывается вектор U_2 (напряжение в конце линии у нагрузки I_2), и под углом φ_2 к нему вектор I_2 . Для получения напряжения U_1 у нагрузки I_1 к U_2 геометрически добавляются активная и реактивная составляющие падения напряжения в сети на расстоянии между первой и второй нагрузками (сопротивления R'_2 и X'_2). Имея вектор U_1 , можно теперь отложить вектор I_1 под углом φ_1 к U_1 . Сложив затем (геометрически) I_1 и I_2 , получим ток I на участке l_1 . Геометрическая сумма U_1 , IR_1 и IX_1 дает напряжение на шинах подстанции — U_0 .

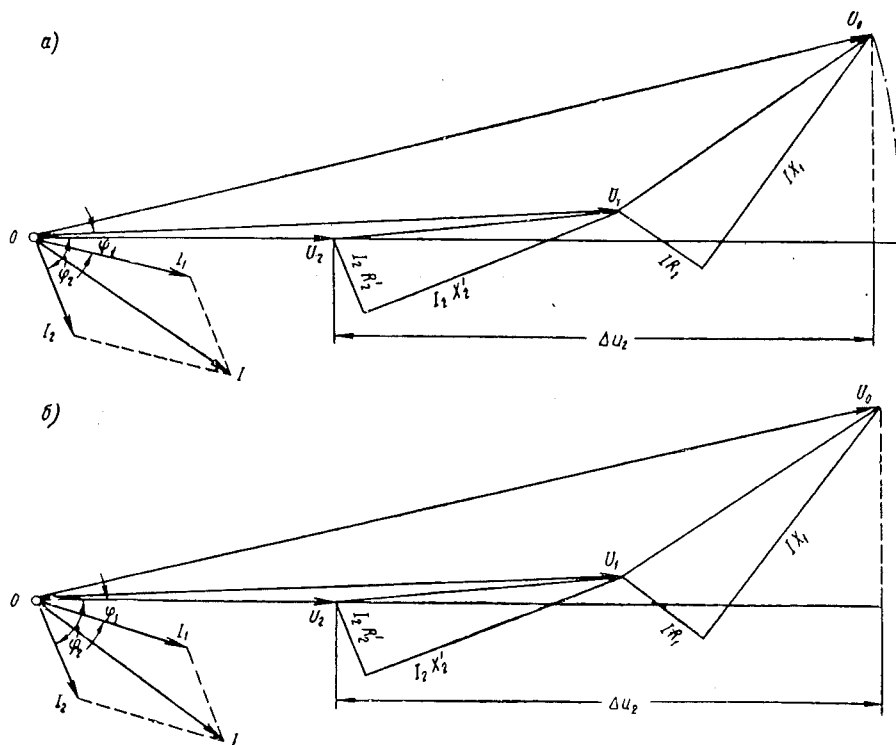


Рис. 121. Векторные диаграммы линии однофазного тока с двумя нагрузками:
а — точная; б — приближенная

При расчетах обычно пренебрегают углом δ между U_1 и U_2 из-за его малости и откладывают углы φ_1 , φ_2 от вектора U_2 (рис. 121, б). В этом случае можно для нескольких нагрузок написать следующее выражение максимальной потери напряжения:

$$\Delta u_{\max} = \sum_{k=1}^n I_k R_k \cos \varphi_k + \sum_{k=1}^n I_k X_k \sin \varphi_k, \quad (126)$$

или, через активные и реактивные токи

$$\Delta u_{\max} = \sum_{k=1}^n I_{ak} R_k + \sum_{k=1}^n I_{rk} X_k, \quad (126')$$

или, наконец, через составляющие мощности

$$\Delta u_{\max} = \frac{\sum_{k=1}^n P_k R_k + \sum_{k=1}^n Q_k X_k}{U}. \quad (126'')$$

В соответствии с предположением, что сопротивления сети r_a и x постоянны по всей длине участка, получим

$$\Delta u_{\max} = r_a \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa} \cos \varphi_{\kappa} + x \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa} \sin \varphi_{\kappa}, \quad (127)$$

или

$$\Delta u_{\max} = r_a \sum_{\kappa=1}^n I_{a\kappa} l_{\kappa} + x \sum_{\kappa=1}^n I_{r\kappa} l_{\kappa} \quad (127')$$

и

$$\Delta u_{\max} = \frac{r_a}{U} \sum_{\kappa=1}^n P_{\kappa} l_{\kappa} + \frac{x}{U} \sum_{\kappa=1}^n Q_{\kappa} l_{\kappa}. \quad (127'')$$

В частном случае, если $\cos \varphi$ для всех нагрузок одинаков, то для сети с постоянными по всей длине сопротивлениями r_a и x максимальная потеря напряжения будет равна

$$\Delta u_{\max} = (r_a \cos \varphi + x \sin \varphi) \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa},$$

т. е. задача решается, как и для постоянного тока, с заменой лишь омического сопротивления сети выражением

$$r_a \cos \varphi + x \sin \varphi.$$

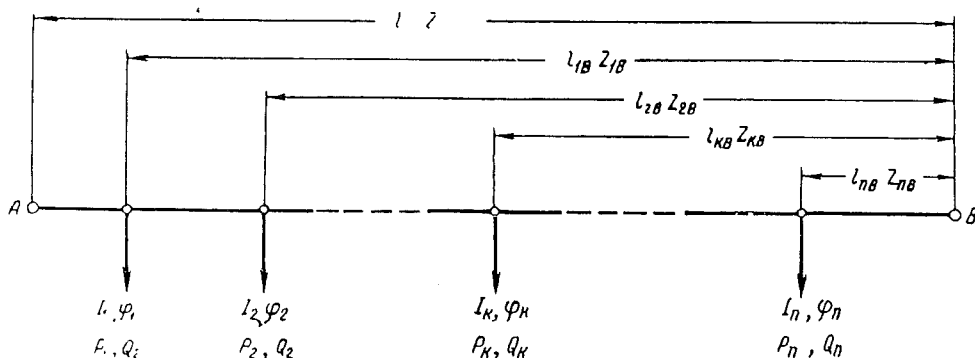


Рис. 122. Схема линии однофазного тока, питаемой с двух сторон с несколькими нагрузками

Если для всех нагрузок $\cos \varphi = 1$, то расчет сводится к расчету сети по формулам, выведенным для постоянного тока,

$$\Delta u_{\max} = \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} R_{\kappa},$$

или, при неизменном значении сопротивления сети на 1 км длины,

$$\Delta u_{\max} = r_a \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa}.$$

Потеря напряжения до некоторой нагрузки с номером m , по аналогии с таким же случаем при постоянном токе, определится формулой

$$\begin{aligned} \Delta u_m = r_a \left(\sum_{\kappa=1}^{m-1} I_{a\kappa} l_{\kappa} + l_m \sum_{\kappa=m}^n I_{a\kappa} \right) + \\ + x \left(\sum_{\kappa=1}^n I_{r\kappa} l_{\kappa} + l_m \sum_{\kappa=m}^n I_{r\kappa} \right), \end{aligned} \quad (128)$$

или, при равных $\cos \varphi$,

$$\Delta u_m = (r_a \cos \varphi + x \sin \varphi) \left(\sum_{\kappa=1}^{m-1} I_{\kappa} l_{\kappa} + l_m \sum_{\kappa=m}^n I_{\kappa} \right). \quad (128')$$

При $\cos \varphi = 1$ формула (128') превращается в формулу (102) для постоянного тока с заменой омического сопротивления контактной сети активным.

Схема двустороннего питания. Определение нагрузок подстанций (или их фидеров) ведется так же, как и для постоянного тока, исходя из условия, что сумма падений напряжения по всей фидерной зоне (от одной подстанции до другой) равна нулю (при равных напряжениях на подстанциях).

Тогда нагрузка фидера подстанции A (рис. 122), питающего рассматриваемую зону (или нагрузка подстанции A , если она питает только одну зону), представится в комплексной форме следующим выражением:

$$I_{\phi A} = \sum_{\kappa=1}^n \frac{I_{\kappa} Z_{\kappa B}}{Z}. \quad (129)$$

Если, как и выше, принять, что полное сопротивление 1 км контактной сети и его составляющие постоянны по длине, а нагрузки выразить через активные и реактивные составляющие, то формула (129) примет вид

$$I_{\phi A} = \frac{\sum_{\kappa=1}^n I_{a\kappa} l_{\kappa B}}{l} - j \frac{\sum_{\kappa=1}^n I_{r\kappa} l_{\kappa B}}{l}. \quad (130)$$

Выразив ток фидера подстанции A через его составляющие, т. е.

$$I_{\phi A} = I_{a\phi A} - j I_{r\phi A},$$

получим

$$I_{a\phi A} = \frac{1}{l} \sum_{\kappa=1}^n I_{a\kappa} l_{\kappa B} \quad (130')$$

и

$$I_{r\phi A} = \frac{1}{l} \sum_{\kappa=1}^n I_{r\kappa} l_{\kappa B}. \quad (130'')$$

Аналогично могут быть найдены полный ток и его составляющие для фидера подстанции B . Если для всех нагрузок $\cos \varphi$ одинаков, то

$$I_{\phi A} = \frac{\cos \varphi \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa B}}{l} - j \frac{\sin \varphi \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa B}}{l},$$

или

$$I_{\phi A} = \frac{\sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} l_{\kappa B}}{l} (\cos \varphi - j \sin \varphi). \quad (131)$$

Определение потери напряжения в сети ведется так же, как и для постоянного тока, т. е. расчет схемы двустороннего питания сводят к расчету схемы одностороннего питания. Длина участка одностороннего питания равна расстоянию от подстанции до точки токораздела, причем предполагается, что в конце участка приложена нагрузка, равная той ее части, которая поступает с рассматриваемой стороны.

Следует отметить, что может иметь место случай, при котором точки раздела активных и реактивных составляющих токов не будут совпадать, что внесет некоторую неопределенность в вопрос определения максимальной

величины потери напряжения. Проще всего в этом случае найти потерю напря. жения для обеих точек раздела токов и, таким образом, определить наибольшую ее величину. Обычно же максимальная потеря напряжения получается в точке раздела активных составляющих тока. Эпюры активных и реактивных составляющих падений напряжений будут иметь тот же вид, что и на рис. 102.

По аналогии с формулой (108), определяющей потерю напряжения в сети до m -й нагрузки при постоянном токе, можно написать общую формулу и для однофазного переменного тока

$$\Delta u_m = \frac{1}{l} \left\{ r_a \left[\sum_{k=1}^n I_{ak} l_{kB} + \sum_{k=1}^{m-1} I_{ak} (l_m - l_{kA}) \right] + \right. \\ \left. + x \left[\sum_{k=1}^n I_{rk} l_{kB} + \sum_{k=1}^{m-1} I_{rk} (l_m - l_{kA}) \right] \right\}. \quad (132)$$

Если напряжения подстанций различны (по величине и фазе), то, как и для сетей постоянного тока, следует к величинам $\dot{I}_{\phi A}$ добавить (геометрически) уравнильный ток \dot{I}_y и вычесть его из величины $\dot{I}_{\phi B}$ (также, конечно, геометрически).

Величина уравнильного тока будет равна

$$I_y = \frac{U_A - U_B}{Z}.$$

Как видно из рассмотренного, при тех допущениях, которые здесь приняты, формулы для определения нагрузок фидеров и потерь напряжения в сети до

нагрузок строятся совершенно так же, как и при расчете мгновенных схем для системы постоянного тока. Только при переменном токе всегда имеются две составляющие: активная и реактивная, выражение каждой из которых строится подобно тому, как это имеет место при постоянном токе.

Нагрузка однофазной трансформаторной тяговой подстанции, если она питает не одну фидерную зону (имеет несколько фидеров), определяется сложением нагрузок отдельных фидеров.

Эта нагрузка в комплексной форме будет

$$I_c = \sum_{k=1}^n \dot{I}_{\phi k}. \quad (133)$$

Особый случай представляет собой питание прилегающих к подстанции

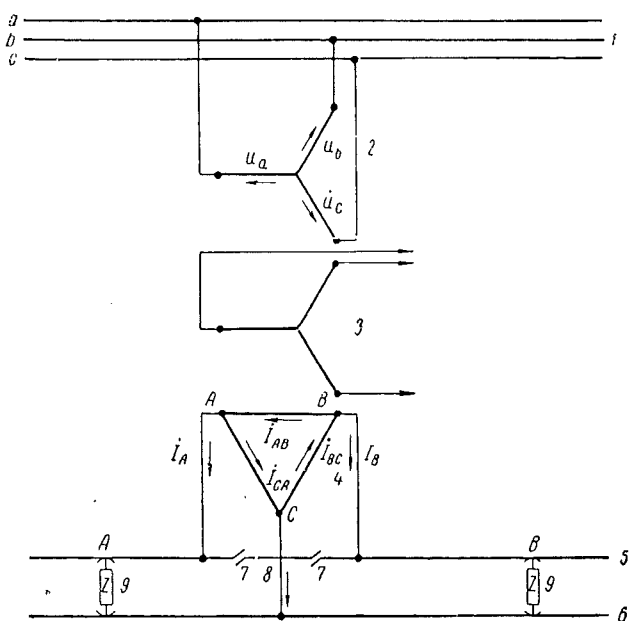


Рис. 123. Схема питания районных и тяговых нагрузок на участке однофазного тока при соединении обмоток трансформатора в схему Δ/Δ

1—питающая линия трехфазного тока (110 кВ и выше); 2—первичная обмотка трансформатора; 3—обмотка для питания районных нагрузок; 4—обмотка для питания контактной сети (тяговых нагрузок); 5—контактный провод; 6—рельсы; 7—секционные разъединения; 8—нейтральная вставка; 9—электровоз

фидерных зон от различных фаз трехфазной сети. В этом случае распределение нагрузки как между фазами трансформатора, так и между фазами питающей трехфазной линии зависит от схемы соединения обмоток трансформатора.

Ниже в качестве примера рассмотрим случай питания контактной сети через трехфазный трансформатор со схемой Δ/Δ , где вторая обмотка предназначена для питания районных нагрузок, а третья — для питания контактной сети (рис. 123).

За положительное направление токов в треугольнике принято направление против часовой стрелки (рис. 123), а в контактной сети направление от подстанции к потребителю. Для упрощения векторной диаграммы условно примем коэффициенты трансформации равными единице. Для любого же реального случая вместо величин напряжений и токов во вторичных обмотках придется брать их значения, приведенные к первичной обмотке. Обозначим фидерные зоны, примыкающие к данной подстанции слева и справа, через A и B .

Определим нагрузку каждой фазы тяговой обмотки трансформатора.

На рис. 123 одна из вершин треугольника — C присоединена к рельсам, а две другие — A и B — к контактной сети фидерных зон, лежащих соответственно слева и справа от подстанции.

Модули векторов тока, так же как и действующие значения их при тяговой нагрузке, все время изменяются. Здесь имеются в виду значения их в данный момент, т. е. для мгновенной схемы.

Пусть в рассматриваемый момент времени слева от подстанции приложена нагрузка I_A , а справа — I_B . Тогда для схемы рис. 123 имеют место следующие уравнения:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{AB} - I_{CA}, \\ I_B &= I_{BC} - I_{AB}, \\ I_C &= I_{CA} - I_{BC}. \end{aligned} \right\} \quad (134)$$

Кроме этих уравнений, в данном случае, исходя из второго закона Кирхгофа, при отсутствии токов нулевой последовательности имеет место еще соотношение

$$I_{AB} + I_{BC} + I_{CA} = 0. \quad (135)$$

Совместное решение уравнений (134) и (135) дает:

$$\left. \begin{aligned} I_{AB} &= \frac{1}{3} (I_A - I_B), \\ I_{BC} &= \frac{1}{3} (I_B - I_C), \\ I_{CA} &= \frac{1}{3} (I_C - I_A). \end{aligned} \right\} \quad (136)$$

Заменяя в последних выражениях $I_C = -(I_A + I_B)$, получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{AB} &= \frac{1}{3} (I_A - I_B), \\ I_{BC} &= \frac{1}{3} (I_A + 2I_B), \\ I_{CA} &= -\frac{1}{3} (2I_A + I_B). \end{aligned} \right\} \quad (137)$$

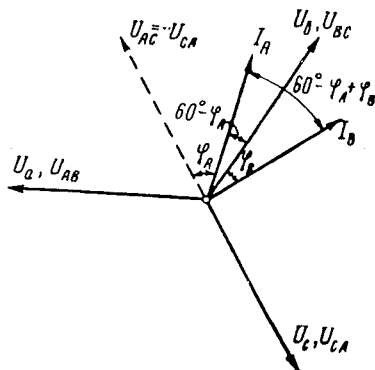


Рис. 124. К расчету распределения нагрузки между фазами трехфазного трансформатора

Прежде чем перейти к определению полных токов фаз трансформатора, рассмотрим векторную диаграмму, представленную на рис. 124. На этой диаграмме \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} и \dot{U}_{CA} — векторы фазовых напряжений.

Вектор тока \dot{I}_A сдвинут на угол φ_A относительно вектора напряжения \dot{U}_{AC} (т. е. вектора $-\dot{U}_{CA}$), а вектор тока \dot{I}_B — на угол φ_B относительно вектора напряжения \dot{U}_{BC} . При этом угол между векторами линейных токов \dot{I}_A и \dot{I}_B будет равен $60^\circ - \varphi_A + \varphi_B$.

Зная этот угол, легко по выражениям (137) определить модули векторов, т. е. токи I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} . Векторные диаграммы для определения этих токов приведены на рис. 125, а, б и в, на основании которых можно написать следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} I_{AB}^2 &= \frac{1}{9} [I_A^2 + I_B^2 - 2I_A I_B \cos(60^\circ - \varphi_A + \varphi_B)]; \\ I_{BC}^2 &= \frac{1}{9} [I_A^2 + 4I_B^2 - 4I_A I_B \cos(120^\circ + \varphi_A - \varphi_B)]; \\ I_{CA}^2 &= \frac{1}{9} [4I_A^2 + I_B^2 - 4I_A I_B \cos(120^\circ + \varphi_A - \varphi_B)]. \end{aligned} \right\} \quad (138)$$

Можно упростить задачу, положив, что углы φ_A и φ_B постоянны и равны между собой. Полученные в результате такого допущения формулы будут приближенными, но, как показывают расчеты, дают достаточную для практики точность.

Следовательно, приняв $\varphi_A = \varphi_B$ и учитывая, что $\cos 60^\circ = \frac{1}{2}$ и $\cos 120^\circ = -\frac{1}{2}$, получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{AB}^2 &= \frac{1}{9} (I_A^2 + I_B^2 - I_A I_B); \\ I_{BC}^2 &= \frac{1}{9} (I_A^2 + 4I_B^2 + 2I_A I_B); \\ I_{CA}^2 &= \frac{1}{9} (4I_A^2 + I_B^2 + 2I_A I_B). \end{aligned} \right\} \quad (139)$$

Величины нагрузок I_A и I_B могут быть получены для данной мгновенной схемы по способу, описанному выше [формулы (123), (123'), (129), (130)].

В случае если от данного трансформатора получают питание и трехфазные потребители, то в первичной обмотке получим соответствующую сумму токов

$$\left. \begin{aligned} I_{a_1} &= I_a + I_{pa}; \\ I_{b_1} &= I_b + I_{pb}; \\ I_{c_1} &= I_c + I_{pc}. \end{aligned} \right\} \quad (139')$$

Рис. 125. Векторная диаграмма несимметрично загруженного трансформатора

На рис. 126, а и б приведены векторные диаграммы без трехфазной нагрузки и с трехфазной нагрузкой.

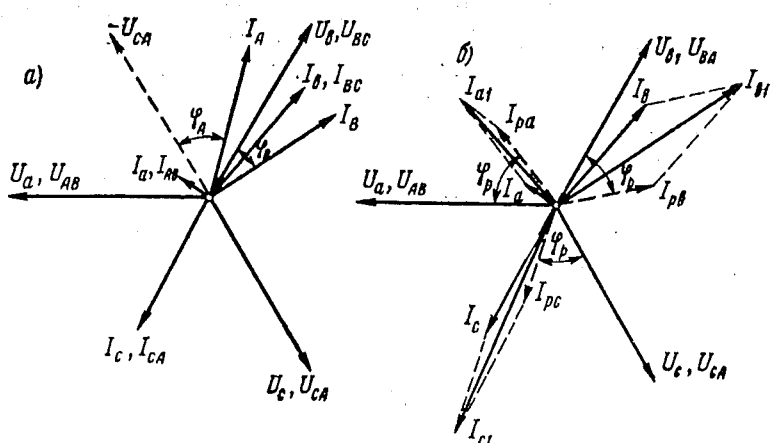


Рис. 126. Векторные диаграммы несимметрично загруженного трансформатора:
а—при одной тяговой нагрузке; б—при тяговой и районной (трехфазной) нагрузках

§ 27. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ТОКЕ

Схема одностороннего питания. В простейшем случае, когда в фидерной зоне находится одна нагрузка (рис. 127), активная потеря мощности может быть представлена выражением

$$\Delta P = I^2 R_a \cdot 10^{-3} \text{ квт}, \quad (140)$$

где I — полный ток поезда в a ;

R — активное сопротивление контактной сети от подстанции до поезда в Ω .

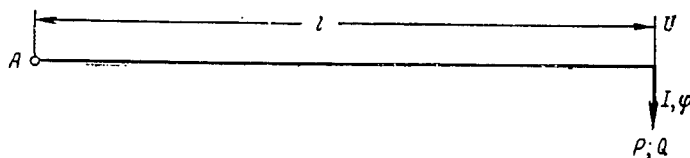


Рис. 127. Схема участка однофазного тока с одной нагрузкой в конце его

Если, как и выше, принять, что сопротивление 1 км контактной сети (активное и реактивное) остается постоянным по длине, то

$$\Delta P = I_a^2 r_a l \cdot 10^{-3}, \quad (140')$$

или

$$\Delta P = (I_a^2 + I_r^2) r_a l \cdot 10^{-3} \text{ квт}. \quad (140'')$$

Выразив I_a и I_r через активную и реактивную составляющие мощности потребителя, получим

$$\Delta P = \frac{r_a l}{U^2} (P^2 + Q^2) \cdot 10^{-3} \text{ квт}, \quad (140''')$$

где U — напряжение у потребителя (при котором определены составляющие мощности).

Заменив в этом выражении r_a на x , получим выражение потерь реактивной мощности:

$$\Delta Q = \frac{x l}{U^2} (P^2 + Q^2) \cdot 10^{-3} \text{ квар}. \quad (141)$$

Для схемы с расположением на линии нескольких сосредоточенных нагрузок (рис. 128) допустим, как это делалось при определении потерь напряжения, что все углы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ отсчитываются от одного и того же вектора напряжения. Это позволит нам на участках между нагрузками находить активную и реактивную мощности в линии, как арифметическую сумму мощностей соответствующих нагрузок.

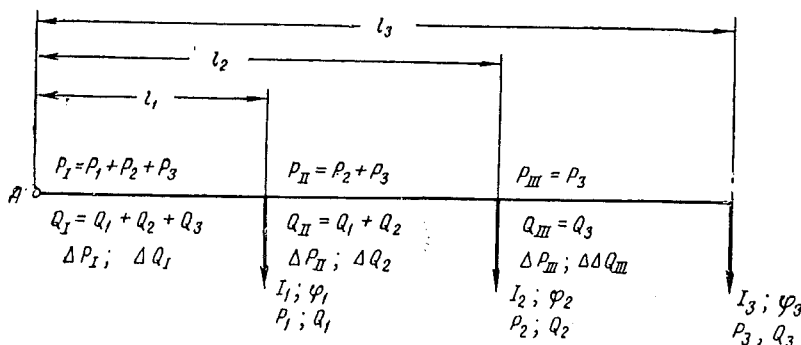


Рис. 128. Схема участка однофазного тока, питаемого с одной стороны, с тремя нагрузками

При этом можно будет найти активную и реактивную потери мощности во всей фидерной зоне, как сумму соответствующих потерь на отдельных участках, т. е.

$$\Delta P = \Delta P_I + \Delta P_{II} + \Delta P_{III}.$$

или в общем виде (рис. 129)

$$\Delta P = \sum_{k=1}^n \Delta P_k. \quad (142)$$

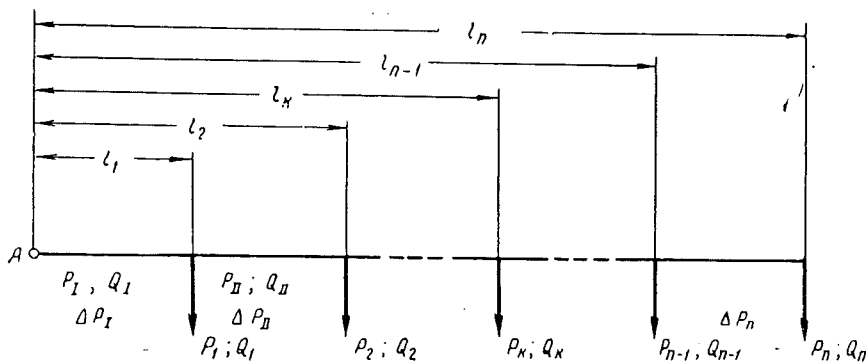


Рис. 129. Схема участка однофазного тока, питаемого с одной стороны, с рядом нагрузок

Если в выражении (142) величину ΔP_k представить в соответствии с формулой (140''), т. е.

$$\Delta P_k = \frac{r_a \cdot 10^{-3}}{U^2} \left[\left(\sum_{i=k}^n P_i \right)^2 + \left(\sum_{i=k}^n Q_i \right)^2 \right] (l_k - l_{k-1}),$$

то

$$\Delta P = \frac{r_a \cdot 10^{-3}}{U^2} \sum_{k=1}^n \left[\left(\sum_{i=k}^n P_i \right)^2 + \left(\sum_{i=k}^n Q_i \right)^2 \right] (l_k - l_{k-1}) \text{ квт.} \quad (143)$$

Заменяв в этом выражении r_a на x , получим выражение для потерь реактивной мощности в контактной сети фидерной зоны

$$\Delta Q = \frac{x \cdot 10^{-3}}{U^2} \sum_{\kappa=1}^n \left[\left(\sum_{i=\kappa}^n P_i \right)^2 + \left(\sum_{i=\kappa}^n Q_i \right)^2 \right] (l_{\kappa} - l_{\kappa-1}) \text{ квар.} \quad (144)$$

Схема двустороннего питания. В общем случае в фидерной зоне расположено несколько (n) нагрузок (рис. 130).

Как и выше при определении потерь напряжения, можно все активные и реактивные нагрузки распределить между подстанциями A и B и

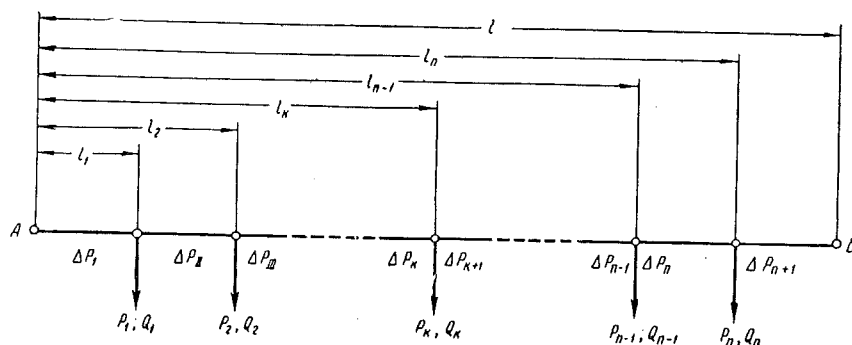


Рис. 130. Схема участка однофазного тока, питаемого с двух сторон, с рядом нагрузок

найти точки токораздела для активных и реактивных составляющих нагрузок. Затем в каждом участке фидерной зоны между смежными нагрузками может быть (как и для схемы одностороннего питания) найдена активная мощность (как простая сумма активных мощностей потребителей) и реактивная мощность (как сумма реактивных мощностей потребителей). Несовпадение точек токораздела активных и реактивных нагрузок (если оно и будет иметь место) не играет при этом роли.

После этого общие потери активной и реактивной мощностей могут быть найдены для каждой части фидерной зоны (разделенной по точкам токораздела) отдельно и затем суммированы.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПО ЗАДАННОМУ ГРАФИКУ ДВИЖЕНИЯ

В главе V были рассмотрены способы расчета различных мгновенных схем, т. е. схем расположения нагрузок, соответствующих определенному моменту времени. Произведя такие расчеты для ряда моментов времени, легко построить зависимости необходимых величин от времени. Располагая такими зависимостями, можно приступить к выбору параметров системы энергоснабжения и определению необходимых показателей.

Если бы было возможно рассмотреть все без исключения моменты времени, то мы получили бы точную картину изменения всех интересующих нас величин. Однако практически это невозможно и приходится ограничиваться рассмотрением отдельных моментов времени.

Задача методов расчета по заданному графику движения поэтому в основном и сводится к выбору отдельных мгновенных схем, на основе которых будут получены данные для построения графиков зависимостей от времени всех интересующих нас величин.

При этом, естественно, наиболее точным будет метод, позволяющий получить зависимости изменения расчетных величин по времени, достаточно близкие к тем, которые были бы получены при рассмотрении бесконечно большого количества отдельных мгновенных схем.

В следующих параграфах мы рассмотрим методы:

- 1) равномерного сечения графика движения;
- 2) характерных сечений графика движения;
- 3) непрерывного исследования графика движения;
- 4) графоаналитический метод;
- 5) метод расчета нагрузки подстанции по графику расхода энергии.

§ 28. МЕТОД РАВНОМЕРНОГО СЕЧЕНИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ

По этому методу, появившемуся ранее других, мгновенные схемы расположения поездов берутся из графика движения через равные интервалы времени.

При выполнении таких расчетов для выбранного расчетного периода наносят на график движения ряд вертикальных прямых (параллельных оси расстояния), равноотстоящих друг от друга. Пересечение каждой такой прямой с нитками графика позволяет определить положение поездов в данный момент времени. Отсюда и исследование отдельных моментов графика получило наименование «сечение графика». Таким образом, каждое сечение графика движения соответствует определенному моменту времени.

Практически расчет при пользовании методом сечения графика ведется следующим образом.

По графику движения определяется положение поездов для рассматриваемого момента времени, а по кривым потребления тока — величины нагрузок, соответствующие этому моменту. Построив кривые потребления тока рядом с графиком движения, как указано на рис. 131, наносят ряд вертикальных сечений графика (пунктирные линии), произвольно выбрав интервал между ними и расположение первого сечения. Затем, поочередно для каждого сечения (например t_1 — t_1), находят положение поездов на фидерной зоне между под-

станциями A и B (точки a, b, c, d и e). Снеся полученные точки на графики потребления тока (прямые $a-a_1, b-b_1, c-c_1$ и т. д.), можно найти соответствующие величины токов. Взяв прямую A_1-B_1 (справа от графика движения) и снеся на нее найденные нагрузки, получим расчетную мгновенную схему.

На рис. 131 графики токов по пути и пути по времени для поездов, следующих в направлении от подстанции A к подстанции B , показаны сплошной линией и токи — сплошными стрелками; для поездов, следующих в обратном направлении, — пунктирными линиями и стрелками. Здесь в качестве примера рассмотрен случай двустороннего питания сети.

Прodelав расчеты всех мгновенных схем, получим ряд значений нагрузок фидеров тяговых подстанций, потерь напряжения в сети до различных поездов и потерь мощности в контактной сети фидерной зоны.

На основании этих расчетов могут быть построены графики изменения токов фидеров подстанций, потерь напряжения в сети до поезда, потерь мощности и энергии по времени. Нагрузки подстанций могут быть получены суммированием графиков токов фидеров. На рис. 131 отрицательные значения нагрузки подстанции соответствуют режиму рекуперации энергии.

Точность результатов находится в зависимости от количества взятых сечений на одном и том же отрезке времени. Отсутствие возможности взять бесконечно большое число сечений заставляет думать о том, как выбрать минимально необходимое число сечений, могущих обеспечить достаточную точность расчета. При рассматриваемом методе расчета дать необходимые указания для выбора интервала между сечениями и момента, с которого следует начинать сечения графика, чтобы получить необходимую точность расчета (или при заданном числе сечений наибольшую точность), практически невозможно.

Разбираемый метод наиболее прост, но ему присущ ряд существенных недостатков, объясняющихся в большинстве случаев неопределенностью величины необходимого интервала. Известны примеры, когда два проектировщика, пользуясь одними и теми же графиками движения и кривыми тока, получали значительно расходящиеся результаты; более того, в одном случае при сравнении двух расчетов для параллельного графика (при одном и том же интервале между сечениями, но при сдвиге во втором расчете начального мо-

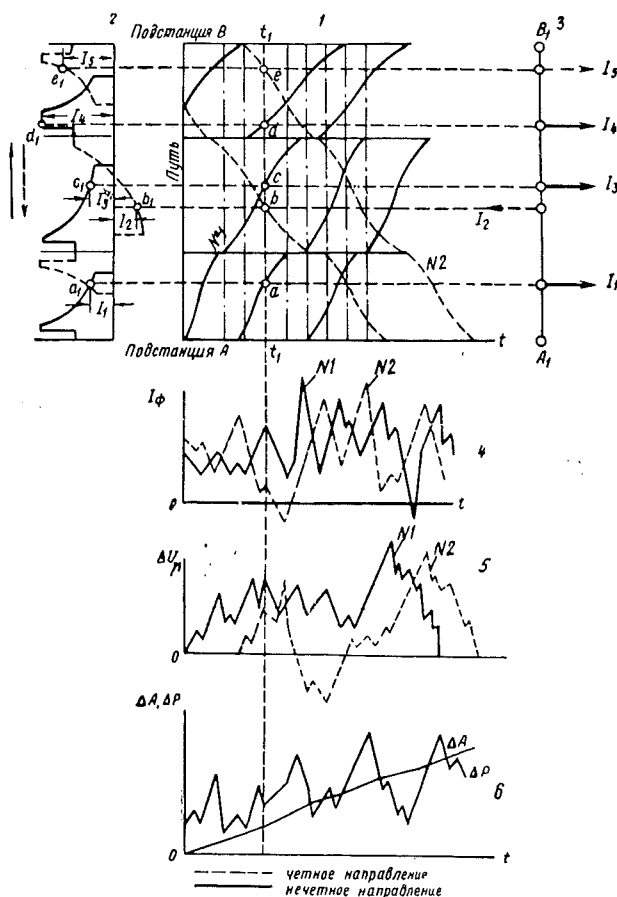


Рис. 131. К расчету системы энергоснабжения методом равномерного сечения графика движения:

1 — график движения; 2 — графики поездных токов; 3 — расположение нагрузок на фидерной зоне в момент времени t_1 (мгновенная схема); 4 — графики нагрузки фидеров подстанций; 5 — графики изменения потерь напряжения в сети до поезда № 1; 6 — графики потерь мощности и потерь энергии в контактной сети фидерной зоны

мента на половину интервала относительно первого расчета) результаты расчета разошлись в 1,5 раза.

Мы уже упоминали о том, что увеличение числа сечений в одном и том же отрезке времени, т. е. уменьшение интервала между смежными сечениями, как правило, ведет к большей точности. Так как практически невозможно взять бесконечно большое число сечений, то у проектировщика всегда остается неуверенность в полученных результатах. Ошибки в расчетах возникают за счет того, что ряд моментов, характерных резкими изменениями нагрузок, может выпасть из внимания проектировщика. Так, например, между двумя смежными сечениями может иметь место быстрое увеличение или уменьшение тока (включение или выключение двигателей). Выпадение ряда характерных моментов может сильно исказить получаемые результаты, особенно при больших интервалах между смежными сечениями графика.

Таким образом, рассмотренный метод по своему существу не может дать хорошей точности. А если речь пойдет об определении кратковременных максимальных значений расчетных величин, то метод равномерного сечения графика движения даже приблизительного решения этой задачи дать не может.

§ 29. МЕТОД ХАРАКТЕРНЫХ СЕЧЕНИЙ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ

Недостатки метода равномерного сечения графика движения легко устраняются при применении метода характерных сечений графика движения [24].

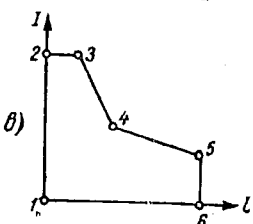
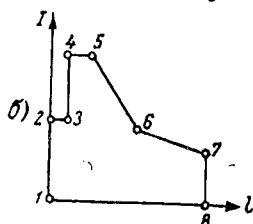
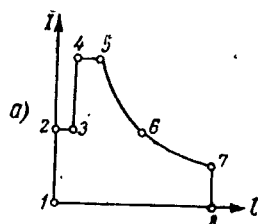


Рис. 132. Характерные точки на графике поездного тока:

а — действительная кривая; б — кривая, построенная по характерным точкам; в — то же упрощенного вида

По этому методу расчетные моменты времени на графике движения выбираются не произвольно, а так, чтобы в рассмотрение попали все значительные изменения поездных токов. Для этого на графиках тока поездов намечаются так называемые «характерные точки», отмечающие основные места изменения тока (рис. 132, а), и действительная кривая тока заменяется спрямленной (рис. 132, б). В тех случаях, когда время движения при последовательном соединенных двигателях (отрезок 2—3 и 3—4, продолжив отрезок 4—5 до оси ординат (рис. 132, в).

Число характерных точек может изменяться по усмотрению проектировщика в зависимости от степени точности, с которой желательно воспроизвести характер графика поездного тока. Для определения расчетных сечений графика движения через характерные точки проводятся горизонтальные прямые (для примера на рис. 133 взята точка б на графике потребления тока поездом № 1) до пересечения с нитями соответствующих поездов на графике движения (точки a_1, a_2, a_3, \dots). Через эти точки проводятся вертикальные прямые ($t_1-t_1, t_2-t_2, t_3-t_3, \dots$), определяющие расчетные сечения времени, которые, кроме нитки данного поезда, пересекут и другие нитки графика, занятые поездами (например линия t_1-t_1 пересечет нитки, занятые поездами № 9, № 8, № 1, № 6 и № 3 в точках б, в, a_1, d и г). Полученные точки пересечения определяют места расположения всех поездов в рассматриваемый момент времени. Так, например, для момента времени t_1 точкам б, в, a_1, d и г соответствуют расстояния от подстанции А — l_9, l_8, l_1, l_6 и l_3 .

Из этих точек проводятся влево горизонтальные линии до пересечения с графиками тока соответствующих поездов. Полученные точки пересечения определяют величины токов, потребляемых соответствующими поездами в данный момент времени. В момент t_1 поезда № 9 и № 6 тока не потребляют, поезда же № 1, № 8 и № 3 потребляют соответственно токи I_1, I_8 и I_3 .

Таким образом, определяются мгновенные схемы расположения нагрузок (рис. 133, справа), что позволяет рассчитать для каждого момента времени все необходимые величины. По значениям величин, полученным для отдельных моментов времени, легко могут быть построены графики изменения этих величин по времени, как это показано при описании первого из рассматриваемых методов (см. § 28).

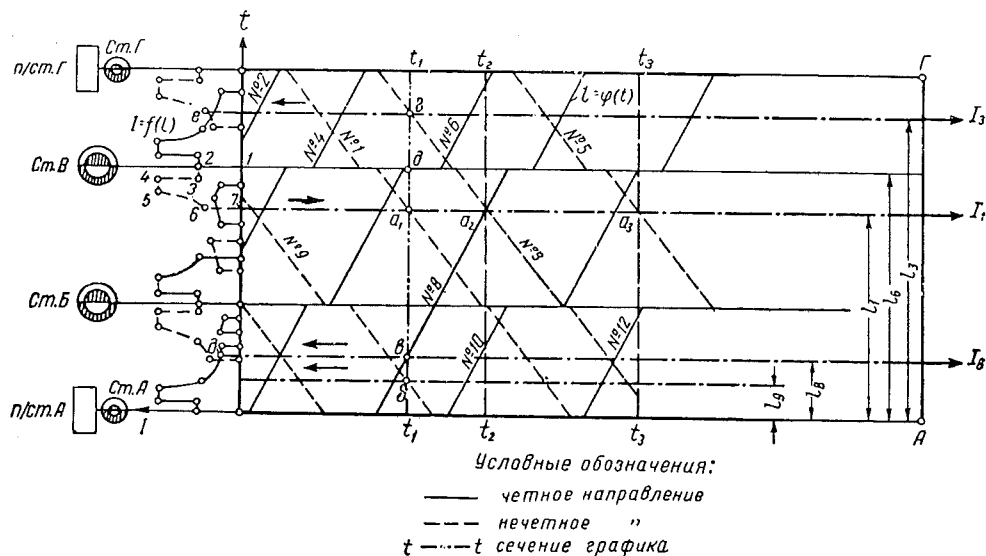


Рис. 133. Сечение графика движения по характерным точкам графиков поездного тока

При нанесении расчетных сечений на график движения некоторые из них или совпадают или располагаются в непосредственной близости друг к другу. В этом случае следует несколько таких сечений объединить в одну полосу. Ширина этой полосы определяется пределами возможного (предусматриваемого без нарушения графика) взаимного смещения поездов. Такое совмещение сечений, не влияя на средние значения расчетных величин, выявляет их возможные резкие изменения.

Такие объединенные сечения (полосы) определяются, следовательно, несколькими характерными точками, часть из которых или все могут относиться к таким моментам времени, когда происходит мгновенное нарастание или уменьшение тока поездов (чаще всего точки 1—2, 3—4, 7—8 на рис. 132). При этом могут быть любые комбинации совпадения значений токов и, в частности, совпадение всех максимальных или всех минимальных значений. При построении графика изменения рассчитываемой величины, например суммы токов, потребляемых поездами (рис. 134), надлежит характеризовать этот момент времени на строящемся графике четырьмя точками (точки б, в, г и д). Точка а соответствует моменту времени, рассмотренному перед данным, а точка е — последующему. Точка б на рис. 134 соответствует величинам поездных токов, предшествующих их резкому изменению (точка 3 — для нарастающего тока и точка 7 — для спадающего тока). Точка г соответствует случаю совпадения максимальных поездных токов в этот момент времени (точки 4 и 7 на графиках тока), а точка д — минимальных значений поездных токов (точки 3 и 8

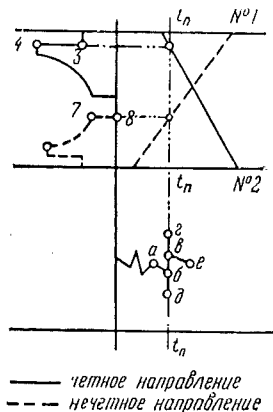


Рис. 134. Построение элемента графика суммарной нагрузки сети при совпадении по времени нескольких характерных точек

на графиках тока). В промежутке между этими точками (д и е) укладываются все возможные значения расчетной величины.

При расчете следует принимать, что определяемая величина изменяется по графику от некоторой точки а (соответствующей предыдущему сечению) в последовательности а—б—д—в—е или же а—б—г—в—е.

§ 30. МЕТОД НЕПРЕРЫВНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ

Описанный выше метод характерных сечений графика движения сводится к замене схемы с переменными по величине и месту нагрузками рядом

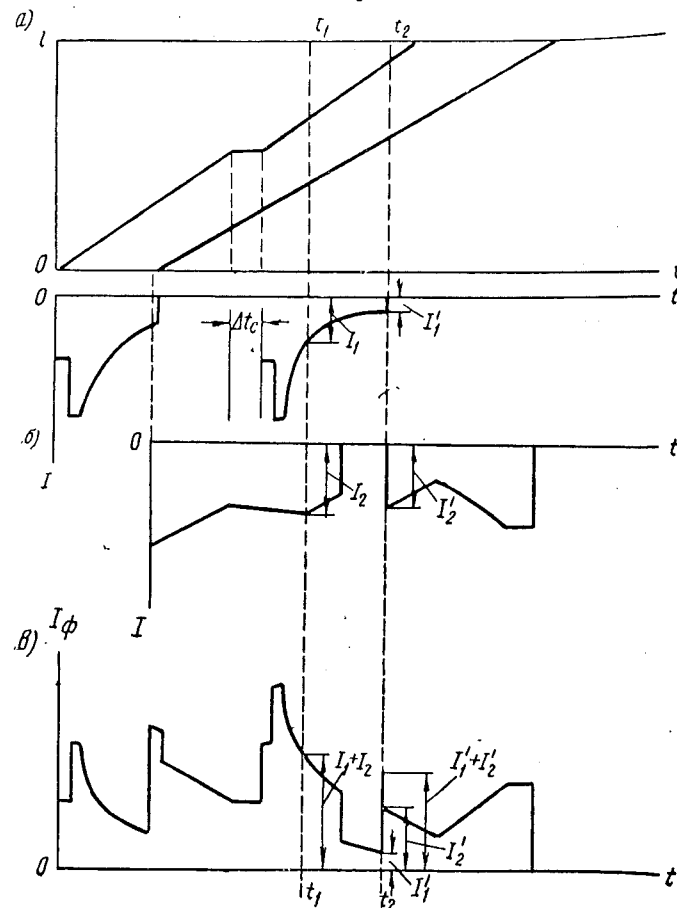


Рис. 135. Построение нагрузки фидера подстанции для схемы одностороннего питания методом непрерывного исследования графика движения:

а — график движения; б — графики тока поездов; в — график нагрузки фидера подстанции

схем с постоянными нагрузками. Излагаемый ниже метод непрерывного исследования дает возможность вести расчет по заданным графику движения и графикам потребления тока, избегая указанной замены [25]. При этом методе, пользуясь готовыми графиками зависимости тока и пути от времени, строят в последовательном порядке графики изменения по времени величин, необходимых при расчете системы энергоснабжения. Рассмотрим построение графиков нагрузки фидеров тяговых подстанций и самих подстанций.

Одностороннее питание однопутного участка. При одностороннем питании однопутного участка нагрузка фидера может быть определена как сумма нагрузок, потребляемых отдельными поездами. Практически такую сумму легко получить, имея графики зависимости тока поездов от времени.

Если эти графики даны

в зависимости от пути, то следует их перестроить по времени. В случае если в графике движения зависимости пути от времени изображаются прямыми линиями (т. е. скорость во все время движения между двумя остановочными пунктами принимается постоянной), то графики тока по пути в другом масштабе являются графиками тока по времени.

Для построения графиков нагрузки фидеров удобно построить на отдельных листах (лучше всего на миллиметровой бумаге) в выбранном масштабе $I_k = f(t)$ для каждого поезда за время хода его по фидерной зоне и заготовить в соответствующем масштабе график движения. Подкладывая затем

снизу кривые $I_k = f(t)$ так, чтобы начало кривой совпадало с началом движения данного поезда, можно суммировать ординаты этих кривых.

Подобное построение показано на рис. 135. Каждая ордината графика тока фидера $I_\phi = \varphi(t)$ равна сумме ординат кривых первого поезда $I_1 = f_1(t)$, второго — $I_2 = f_2(t)$ и т. д., взятых для того же момента времени. Суммарный график тока фидера подстанции показан на рис. 135, в. В отдельные моменты могут совпадать резкие уменьшения тока одного поезда с резким возрастанием другого, как, например, для момента t_2 (рис. 135). Полезно для подобных моментов отметить возможный пик, равный сумме $I'_1 + I'_2$. Такое совпадение может быть, если один из локомотивов отключится на несколько мгновений позже, а другой включится раньше.

Следует отметить, что строить график движения особой необходимости нет, достаточно на оси абсцисс диаграммы зависимости фидерного тока от времени отметить лишь моменты отправления поездов.

Количество заготовленных кривых для поездов одного и того же типа должно быть равно максимальному количеству поездов этого типа, могущих одновременно находиться на фидерной зоне.

Двустороннее питание однопутного участка. Для двустороннего питания можно определять нагрузки фидеров способом, сходным с указанным выше, так как и здесь ток каждого фидера может быть определен как сумма токов, потребляемых от него отдельными поездами. Но так как каждый поезд получает энергию от двух подстанций, то предварительно необходимо разложить график поездного тока на два, каждый из которых покажет,

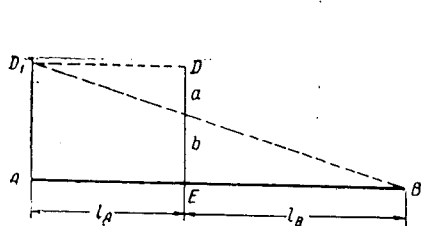


Рис. 136. Распределение нагрузки между двумя подстанциями

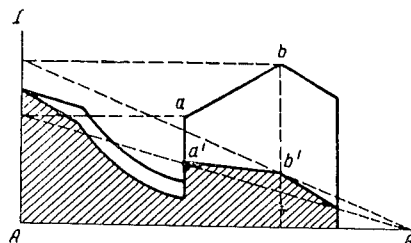


Рис. 137. Распределение тока поезда между двумя подстанциями

какую часть поездного тока дает соответствующая подстанция. Для этой цели может быть использован известный графический способ пропорционального деления отрезка (рис. 136). Чтобы разделить отрезок DE на две части, пропорциональные отрезкам l_A и l_B , следует провести из точки D линию, параллельную AB , до пересечения в точке D_1 с перпендикуляром к отрезку AB в точке A . Проведя затем прямую D_1B , мы рассечем DE на части a и b , пропорциональные l_A и l_B :

$$\frac{a}{b} = \frac{l_A}{l_B}.$$

Если же отрезок DE в соответствующем масштабе представляет величину тока I , а отрезки l_A и l_B — расстояния до подстанций, то отрезки a и b представят соответственно токи подстанций B и A .

Используя этот метод, можно график тока поезда $I_k = f(l)$ (рис. 137) разбить на два: $I_{kA} = f_1(l)$ и $I_{kB} = f_2(l)$. Необходимо отметить, что такое разделение токов справедливо только при условии постоянства сечения проводов контактной сети по длине фидерной зоны и равенства напряжений тяговых подстанций, питающих эту зону.

На рис. 137 для примера показан способ деления ординат для двух точек: a и b . Здесь часть ординаты, лежащая внутри заштрихованной площади, показывает ток, потребляемый поездом от подстанции A , а остальная часть — ток от подстанции B . Полученные графики могут быть перестроены по времени

и использованы так же, как и для схемы одностороннего питания. Нуль времени каждого графика поездного тока при сложении их должен совпадать с моментом появления соответствующего поезда на фидерной зоне АВ. Суммировать следует ординаты заштрихованных графиков при определении фидерного тока подстанции А и незаштрихованных — фидерного тока подстанции В (рис. 138).

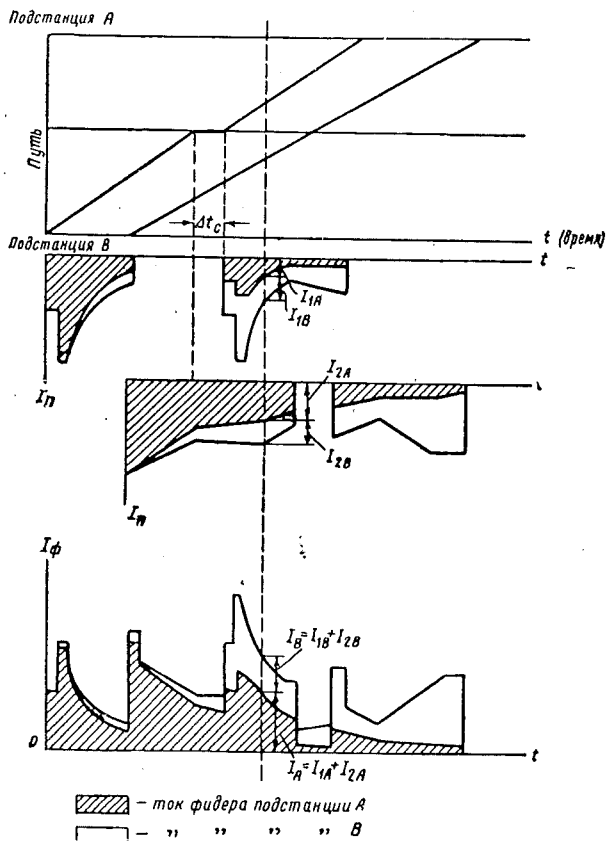


Рис. 138. Построение нагрузки фидеров подстанций для участка двустороннего питания методом непрерывного исследования графика движения

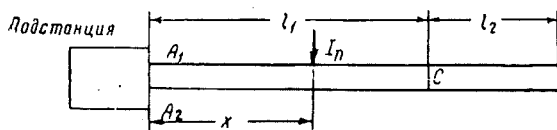


Рис. 139. Схема двухпутного участка с постом секционирования, питаемого с одной стороны

Двустороннее питание двухпутного участка. При раздельном питании контактной сети путей, т. е. при отсутствии поперечных соединений, построение графиков нагрузки фидеров следует вести так же, как и для однопутных участков.

Если в фидерной зоне в одной точке осуществляется соединение проводов обоих путей (обычно в poste секционирования), то в этом случае каждый поезд будет питаться не от двух фидеров, а от четырех, в соответствии с чем и каждый график поездного тока следует делить на четыре части, устанавливая графики поездного тока для каждого фидера. Разложение это можно выполнить излагаемым ниже способом.

Сначала кривая тока поезда распределяется между питающими фидерную зону подстанциями способом, описанным выше (рис. 137), так как распре-

Одностороннее питание двухпутного участка. Если на двухпутном участке контактные провода обоих путей не имеют соединения, то определение фидерных токов должно вестись так, как для двух однопутных участков. Если двухпутный участок имеет соединение в конце его и питается от одного фидера, то определение тока этого фидера должно вестись, как и для однопутного участка. Если же контактные провода отдельных путей двухпутного участка имеют соединение в какой-либо точке С (рис. 139) и питаются от двух фидеров, то задача сводится к рассмотрению однопутного участка с двусторонним питанием с нагрузкой в точке С, равной сумме нагрузок на участке l_2 . При равных сечениях проводов обоих путей эта нагрузка будет делиться поровну между обоими фидерами А₁ и А₂ или в отношении ϕ , если эти сечения различны. Здесь ϕ — отношение сопротивления единицы длины проводов второго пути к первому.

деление тока между подстанциями не зависит от числа и мест расположения поперечных соединений проводов контактной сети (см. § 22). На рис. 140 нижняя часть графика показывает нагрузку подстанции А, а верхняя — подстанции В. Далее каждую из полученных частей следует распределить между фидерами подстанций.

Когда поезд находится на участке A_1C , фидеры B_1 и B_2 (при одинаковых сечениях проводов контактной сети путей) дают одинаковый ток, поэтому ординаты этой части кривой следует разбить на две равные части. Точно так же можно поступить и с частью кривой I_{KA} на длине участка B_1C ; в этом случае диаграмма примет вид, представленный на рис. 141. Далее необходимо разбить оставшиеся части графика (не заштрихованные) между соответствующими фидерами подстанций. Если соединение C расположено близко к середине, а нагрузка лежит на участке A_1C , то фидер A_2 будет давать тот же ток, что и фидеры B_1 и B_2 (влиянием сопротивления рельсов на токораспределение между фидерами обычно пренебрегают). Отняв от ординат незаштрихованной части площади половину ординаты заштрихованной, получим четыре кривые тока, относящиеся к соответствующим фидерам (рис. 142). При расположении секционного поста не в середине участка следует разбить незаштрихованную площадь на две части несколько иным способом.

Наиболее простым является способ, основанный на использовании соотношения частей ординат кривой поездного тока, соответствующих фидерам A_2

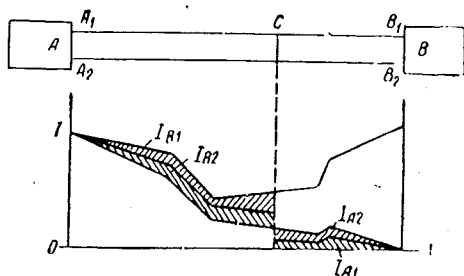


Рис. 141. Распределение тока поезда между фидерами подстанций на двухпутном участке с постом секционирования

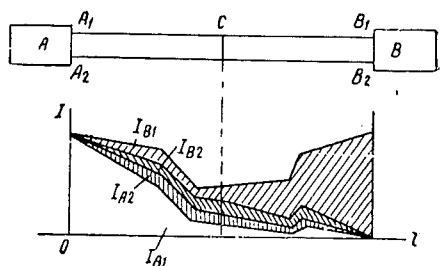


Рис. 142. Распределение тока поезда между фидерами подстанций на двухпутном участке при расположении поста секционирования в середине фидерной зоны

и B_2 при смещении точки C от середины. Учитывая, что потери напряжения на участках A_2C и B_2C должны быть равны, и принимая, что напряжения на шинах постоянного тока подстанций A и B одинаковы и сечение проводов данного пути на всем протяжении неизменно, можно написать

$$\frac{I_{A2}}{I_{B2}} = \frac{l_B}{l_A}, \quad \text{т. е.} \quad I_{A2} = I_{B2} \frac{l_B}{l_A}.$$

Так как ток I_{B2} определяется очень просто, то, умножая все его ординаты на указанное соотношение, легко построить кривую тока I_{A2} ; тем самым определится, как разность, и величина I_{A1} .

Графики нагрузки тяговых подстанций за расчетный период времени легко получаются суммированием графиков нагрузок всех фидеров данной подстанции.

Имея графики нагрузок фидеров, можно графическими построениями получить графики потерь напряжения в сети до любого поезда, а также графики потерь мощности в сети фидерной зоны [25, 13].

§ 31. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ГРАФИКЕ ДВИЖЕНИЯ И ОДИНАКОВЫХ ТИПАХ ПОЕЗДОВ

В отдельных случаях расчет системы энергоснабжения приходится вести по графикам движения с однотипными поездами и при постоянном интервале между ними. Это имеет место прежде всего при расчетах системы энергоснабжения метрополитенов, которые ведутся для периода наибольшей частоты движения поездов (однотипных) при постоянном интервале между ними.

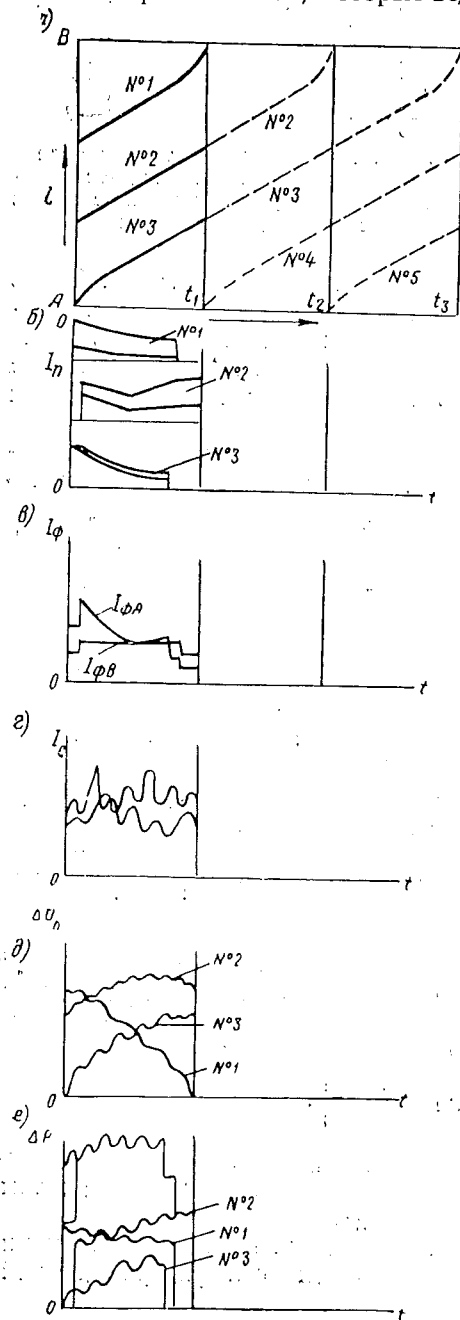
При расчетах энергоснабжения магистральных и пригородных участков железных дорог для исследования особых режимов работы (использование полной поперегонной пропускной способности и др.) также приходится исходить из таких графиков движения.

Особенности расчета при этом определяются периодической повторяемостью характера изменений всех определяемых величин. Период изменений при этом равен интервалу времени между поездами. Это позволяет при параллельном графике движения ограничиться только исследованием его на протяжении времени, равном интервалу между поездами.

Действительно, если посмотреть на график движения (рис. 143), то станет ясным, что при интервалах от нуля до t_1 , от t_1 до t_2 и от t_2 до t_3 графики нагрузок фидеров подстанций А и В должны быть одинаковыми, так как положение поездов на участке повторяется. Так, в интервале от t_1 до t_2 поезда № 4, № 3 и № 2 заменяют поезда № 3, № 2 и № 1 в интервале от нуля до t_1 . Так как поезда однотипные, то и токи, потребляемые поездами № 3, № 2 и № 1 в интервале от нуля до t_1 соответственно равны токам поездов № 4, № 3 и № 2 в интервале от t_1 до t_2 . Отсюда ясно, что нагрузки фидеров и подстанций будут повторяться; равным образом будут повторяться графики потерь напряжения и мощности.

Рис. 143. К расчету системы энергоснабжения методом непрерывного исследования графика движения при параллельном графике:

а — график движения; б — графики токов поездов, отнесенных к подстанциям А и В; в — графики нагрузок фидеров за время t_1 — интервал между поездами; г — графики нагрузки подстанций; д — графики потерь напряжения в сети до поездов; е — графики потерь мощности в фидерной зоне и их составляющие $U_K I_K$ (см. формулу 121)



Таким образом, вместо исследования графика на протяжении времени от нуля до t_3 достаточно исследовать график на протяжении от нуля до t_1 и построение графиков нагрузок фидеров и подстанций, а также потерь напряжения мощности производить для этого периода.

Все изложенное остается верным для любой схемы питания.

§ 32. ПРИБЛИЖЕННЫЕ СПОСОБЫ РАСЧЕТА ПО ЗАДАННОМУ ГРАФИКУ ДВИЖЕНИЯ

Можно значительно упростить расчеты, заменяя переменное значение поездного тока постоянным, равным его среднему значению. Графики поездного тока в этом случае будут представлять собой прямые линии, параллельные оси абсцисс. При этом результаты определения средних и эффективных значений величин будут иметь достаточную для практики точность. Расчет можно производить методом характерных сечений или методом непрерывного исследования графика движения. В зависимости от того, каким образом заменяются действительные графики поездного тока, приближенный расчет в свою очередь может давать различные степени точности.

Если спрямляются графики поездного тока за время потребления энергии (рис. 144, б), такой расчет из приближенных дает наиболее точные результаты. В этом случае сечения производятся по двум характерным для каждого графика точкам, соответствующим моментам включения и отключения тока. Более грубые результаты получаются при замене изменяющегося тока средним его значением за время хода по отдельным перегонам (рис. 144, в). Характерными точками являются здесь моменты прохода поездом начала и конца данного перегона. Наиболее грубым из приближенных методов является расчет по средним токам поездов за время прохода фидерных зон, при котором сечения графика соответствуют моментам прохода поездом начала и конца фидерной зоны (рис. 144, г).

При пользовании методом непрерывного исследования графика движения приближенный способ дает возможность значительного упрощения ввиду того, что разлагаются между подстанциями и суммируются только простейшие (прямолинейные) графики тока.

При расчете по средним токам за время потребления энергии ошибка в расчетах эффективных токов подстанций магистральных дорог с грузовым движением не превосходит 3—5%.

§ 33. ПРИНЦИП ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ

К числу методов, основанных на заданном графике движения, относится и графоаналитический метод проф. Д. К. Минова [26]. Положительной особенностью этого метода является то, что он исключает возможность грубых

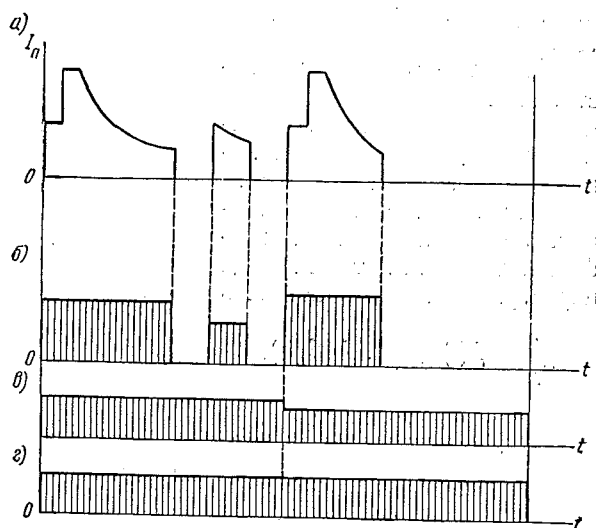


Рис. 144. Действительный и приближенные графики поездного тока:

а — действительный график; б — график среднего тока за время потребления энергии; в — график среднего тока за время хода по перегону; г — график среднего тока за время хода по фидерной зоне

ошибок при определении ряда средних по времени величин, возможных при методе равномерного сечения графика движения.

Сущность метода, разработанного проф. Д. К. Миновым, сводится к использованию графических приемов для определения:

а) средних потерь напряжения в сети до токоприемника того или иного поезда;

б) потерь энергии в контактной сети за расчетный период;

в) средних и эффективных нагрузок подстанций за расчетный период.

Принцип расчета основан на графическом интегрировании кривых поездных токов и графическом определении ряда расчетных коэффициентов.

Понятие о принципе построения этого метода можно получить из следующего примера определения потери напряжения в контактной сети до поезда. Для вывода основных положений метода график потребления тока поездом перестраивается в зависимость

$$\frac{I_t}{v_t} = f(l) \quad (\text{рис. 145, а}),$$

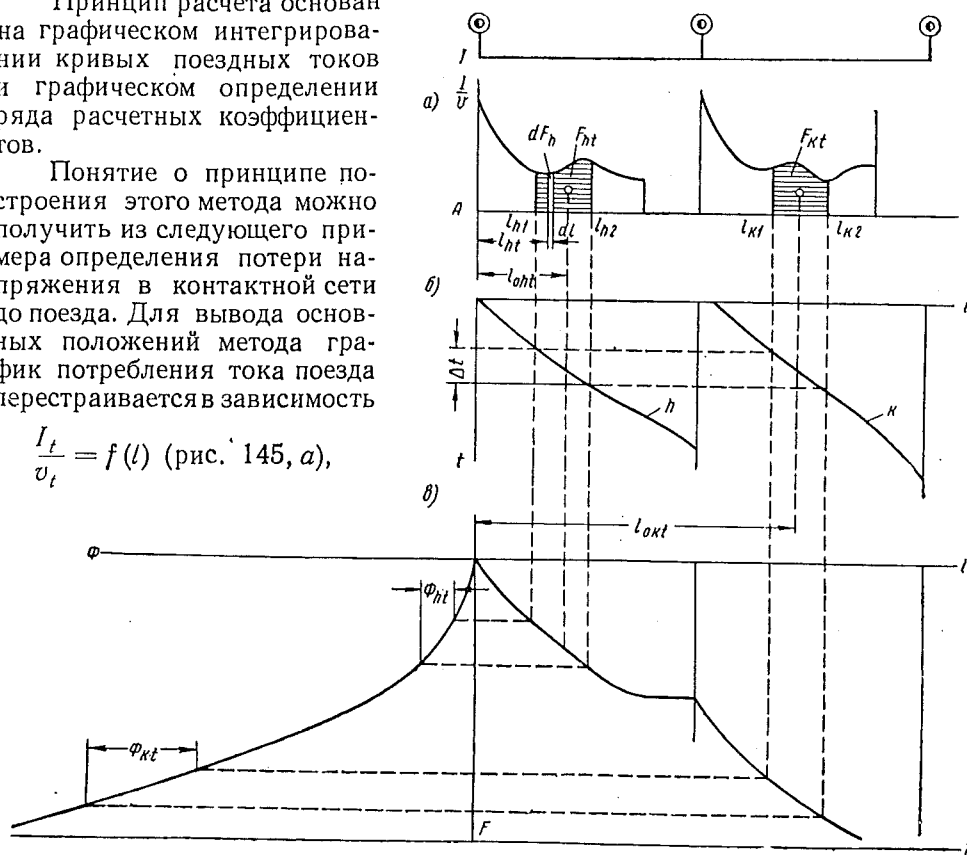


Рис. 145. К расчету графоаналитическим методом

где I_t — ток поезда в момент времени t ;

v_t — скорость поезда в тот же момент;

l — координата поезда, соответствующая этому моменту времени.

На рис. 145, б показана часть графика движения (в данном примере для однотипных поездов).

Элемент площади, ограниченной кривой $\frac{I_t}{v_t} = f(l)$ (заштрихованный на чертеже), равен величине $\frac{I_{ht}}{v_h} dl$. Но $\frac{dl}{v_h} = dt$, следовательно, эта площадь равна $I_{ht} dt$, т. е. представляет собой «расход тока» поездом h за время dt . В нижней части рис. 145, в дан график изменения этой площади от нуля до текущего значения l , т. е.

$$F = \int_0^l I_{ht} dt.$$

Эта кривая дает возможность взять значение площади для любого отрезка пути, в частности для интервала от l_{h1} до l_{h2} , как приращение ординаты величины F .

Для каждого такого приращения ординаты может быть найдена координата центра тяжести этой площади l_{0ht} , что дает возможность построить кривую рис. 145, в

$$\Phi = \int_0^l l_{0ht} dF.$$

Но величина Φ , как нетрудно увидеть из приведенных соображений, пропорциональна моменту тока, или, иначе, потере напряжения в сети от этого тока.

Аналогичным путем, учитывая взаимное расположение поездов, оценивается и влияние тока второго поезда k на поезд h (или наоборот). В результате подобного построения определяются все средние значения величин.

Как уже отмечалось, этот метод не предназначен для определения все возможных кратковременных значений (максимальных и минимальных).

§ 34. РАСЧЕТ НАГРУЗКИ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ ПО КРИВЫМ РАСХОДА ЭНЕРГИИ ПОЕЗДОВ

Рассматриваемый метод [27] дает возможность определить нагрузку подстанций за различные периоды времени, пользуясь заданным графиком движения и графиком потребления энергии, не прибегая к сечению графика движения.

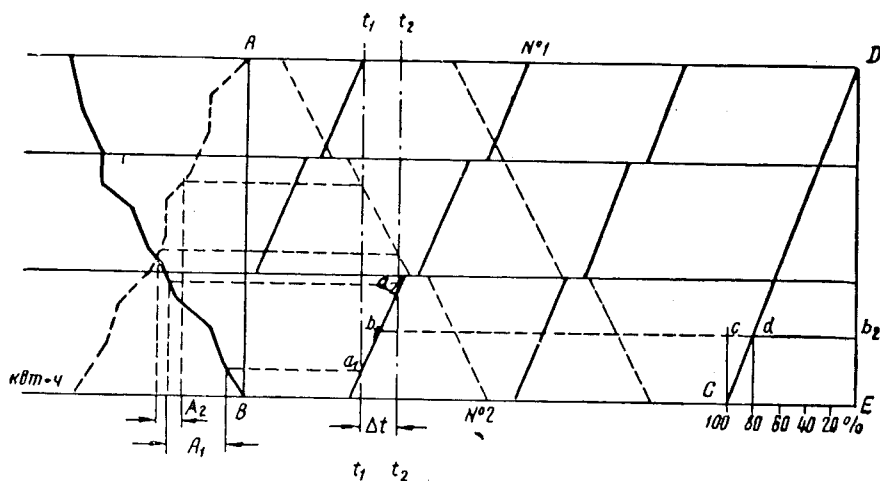


Рис. 146. К расчету нагрузок тяговых подстанций по графикам расхода энергии

При пользовании этим методом рядом с графиком движения располагают графики расхода энергии для различных типов поездов (рис. 146). Выбирая отдельные интервалы времени Δt между моментами t_1 и t_2 , можно определить расход энергии за намеренный промежуток времени и, следовательно, средний ток, потребляемый поездом за это время.

В рассматриваемый отрезок времени Δt попали два поезда: № 1 и № 2; соответствующие расходы энергии для них равны A_1 и A_2 . При одностороннем питании участка сумма этих расходов энергии определит расход энергии на подстанции, необходимый для питания рассматриваемого участка за отрезок времени Δt .

Зная расход энергии и время, нетрудно найти и среднее значение тока, отдаваемого подстанцией.

При двустороннем питании необходимо разделить полученный расход энергии между двумя подстанциями, питающими участок.

Принимая, что в течение намеченного периода времени Δt токи, потребляемые поездами, не изменяются и что этот отрезок времени по сравнению с временем хода поезда от одной подстанции до другой невелик, предлагается получаемый расход энергии A_1 и A_2 распределять между подстанциями обратно пропорционально расстояниям от них до «центра тяжести» этих нагрузок. Распределение между подстанциями может быть произведено способом «процентного деления» (рис. 146). При таком способе из середины отрезка a_1-a_2 проводится линия b_1-b_2 , параллельная оси времени; тогда отрезок $c-d$ даст количество энергии в процентах, даваемое подстанцией B , а отрезок $d-b_2$ подстанцией A . Линия CD может быть проведена под произвольным углом к оси времени.

При пользовании данным методом могут быть установлены только средние нагрузки подстанции. Для выбора же числа агрегатов необходимо располагать значением эффективного тока; для получения эффективного тока следует средний ток умножить на коэффициент эффективности (отношение эффективного тока к среднему). Коэффициент эффективности может быть определен или по формулам метода; построенного на использовании принципов теории вероятностей, или на основе существующего опыта.

При определении нагрузок расход энергии делят на напряжение, принятое для тяговых расчетов, а не на шины подстанции, так как потери энергии в самой сети в подсчитанное количество энергии не вошли. Максимальные пики нагрузок фидеров и подстанций, а также потери напряжения и мощности следует определять каким-либо другим методом, так как рассматриваемым методом можно определять только нагрузку подстанций, среднюю за период заданной длительности.

§ 35. ПОСТРОЕНИЕ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ

Выше уже отмечалось, что на пригородных участках магистральных дорог графики нагрузки имеют резко неравномерный характер (рис. 77).

Расчеты обычно ведут не по всему суточному графику, а ограничиваются лишь рассмотрением некоторого периода, определяющего наиболее тяжелые условия работы системы энергоснабжения. Если в графике движения встречаются периоды, в отношении которых трудно сделать заключение, какой из них даст большую нагрузку, то необходимо исследовать все эти периоды. Длительность расчетного периода может быть установлена лишь в зависимости от характера определяемых величин.

Для различных фидерных зон одной и той же линии и даже смежных между собой, а следовательно, и для различных фидеров подстанций, расчетные периоды весьма часто не совпадают, т. е. в одном и том же графике движения для различных фидерных зон часто приходится исследовать различные часы суток.

Длительность исследуемого периода для подстанции находится в непосредственной зависимости от типа преобразователя подстанций и их перегрузочной способности. Например, если для ртутных выпрямителей дается указание, что они могут нести перегрузки 50% в течение 2 ч с интервалом между этими перегрузками не менее 3 ч при нагрузке, не превышающей номинальной, то расчетный период подстанций в соответствии с нормами получается не меньшим 8 (т. е. 3 + 2 + 3). Если же периоды максимальной нагрузки встречаются в графике нагрузки два раза в сутки, то возникает необходимость в исследовании графика движения на протяжении 16 ч. Полностью же судить о нагрузке подстанций можно лишь имея суточный график нагрузки.

Для расчета фидерных зон, где обращаются однотипные поезда, можно с достаточной степенью точности выбирать расчетный период, руководствуясь

числом поездов, одновременно находящихся в фидерной зоне. При различных типах поездов, потребляющих различные токи, число их не может полностью характеризовать расчетный период. Расчетный период может быть установлен по графику изменения средней нагрузки фидерных зон или подстанций.

Наиболее удобным является построение графика нагрузки фидерной зоны упрощенным методом непрерывного исследования графика движения.

Оси координат для графика нагрузки фидерной зоны удобно располагать под или над графиком движения, оставив тот же масштаб времени, что и в суточном графике движения.

Рассмотрим пример. На рис. 147 нагрузка на участке между двумя подстанциями А и В в течение времени от нуля до t_1 равна нулю, так как в это время на фидерной зоне нет поездов.

В течение времени $t_1 - t_2$, когда в сечение графика движения попадает всего один поезд, потребляющий средний ток I_1 , нагрузка фидерной зоны равна этому току, в период же $t_2 - t_3$, когда в сечение графика движения попадают уже два поезда, она равна сумме средних токов этих поездов $I_1 + I_2$. Далее, в период $t_3 - t_4$ нагрузка увеличивается до величины $I_1 + I_2 + I_3$ и, наконец, в период $t_4 - t_5$ — до величины $I_1 + I_2 + I_3 + I_4$. В течение периода $t_5 - t_6$ нагрузка уменьшается, так как поезд с током I_1 покинул рассматриваемую фидерную зону. Продолжая такое построение далее, можно получить график средней нагрузки фидерной зоны в течение суток.

Если где-то на протяжении фидерной зоны профиль резко изменяется, например в пункте С (линия С—С на рис. 148), то следует отдельно учитывать средние токи по каждому из этих участков (I'_1 и I''_1). Здесь принято, что $I'_1 > I''_1$. В этом случае моментами изменения нагрузки в фидерной зоне окажутся не только моменты прибытия и отправления с участка АВ, но и моменты прохода линии С—С (т. е. точки t_1 , t_2 , t_3 и т. д.).

Располагая теперь графиком средней нагрузки фидерной зоны, можно довольно точно наметить период наибольшей ее загрузки. Наибольшая потеря

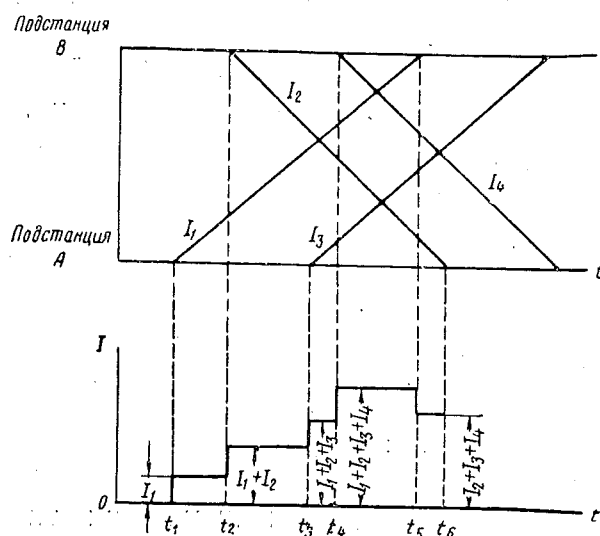


Рис. 147. Построение графика нагрузки фидерной зоны по средним токам поездов

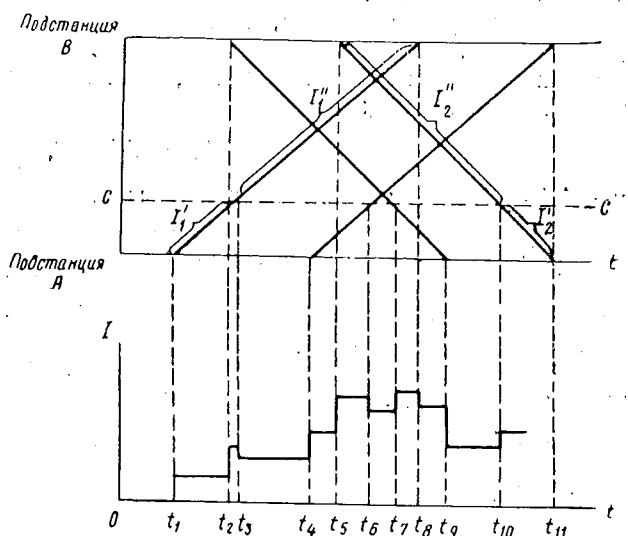


Рис. 148. Построение графика нагрузки фидерной зоны по средним токам поездов на отдельных участках

напряжения в сети до поездов одного и того же типа будет иметь место также на протяжении таких периодов.

Для построения суточной нагрузки питающего фидера можно исходить из предположения равномерного распределения нагрузки участка между фидерами, питающими его. Если по условиям профиля средние токи поездов на участках AC и CB сильно разнятся (рис. 148), то можно построить отдельные графики нагрузки участков AC и CB , а затем разбить ординаты графика участка AC в отношении $\frac{AC}{2}$ к $AB - \frac{AC}{2}$, а ординаты графика участка CB — в отношении $\frac{CB}{2}$ к $AB - \frac{CB}{2}$ и сложить соответствующие части.

При одностороннем же питании нагрузка участка является одновременно и нагрузкой фидера. Имея суточные графики нагрузки фидеров, можно путем сложения их ординат получить и графики нагрузки подстанций.

Максимальные кратковременные значения нагрузки для фидеров и подстанций при пользовании указанным способом непосредственно получены быть не могут и должны для выбранных расчетных периодов определяться только детальным расчетом по графику движения.

Получив суточные графики нагрузки подстанций, можно на основании их выбрать расчетный период.

§ 36. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Расчетной величиной при выборе сечения проводов контактной сети, а также при расчетах, связанных с определением экономических показателей устройств энергоснабжения, являются потери энергии в контактной сети фидерной зоны.

Эта величина легко находится, если известно значение потерь мощности за расчетный период:

$$\Delta A = \Delta P_{cp} T,$$

где ΔA — потери энергии за расчетный период в $квт \cdot ч$;

ΔP_{cp} — среднее значение потерь мощности за тот же период в $квт$;

T — расчетный период в $ч$.

Если из расчета одним из рассмотренных методов известна зависимость $\Delta P = f(t)$ и построен график этой зависимости, то площадь фигуры, ограниченной кривой $\Delta P = f(t)$ и осью абсцисс в пределах от t_1 до t_2 , где $t_2 - t_1 = T$, представляет собой величину, пропорциональную значению потерь энергии ΔA . Коэффициентом пропорциональности является величина, обратная произведению масштабов потерь мощности и времени $\left(\frac{1}{m_{\Delta P} \cdot m_t} \right)$.

В подавляющем большинстве случаев необходимо находить потери энергии за год. При пользовании методами расчета по заданному графику движения пришлось бы определять потери мощности для полных суток. При этом, если в году (как в действительных условиях) график движения меняется, надо было бы подвергнуть анализу столько суток, сколько различных графиков в году должно иметь место. Потери энергии за год пришлось бы определять по формуле

$$\Delta A_{год} = 24 \sum_{k=1}^n \Delta P_{срк} i_k,$$

где $\Delta P_{срк}$ — среднесуточные потери мощности для данного суточного графика движения в $квт$;

i_k — число суток, в которые работа участка организуется по данному графику движения;

n — число различных суточных графиков в году.

Как видно, при пользовании рассмотренными методами определение годовых потерь энергии связано с чрезвычайно громоздкими и трудоемкими расчетами.

Экономические же расчеты не требуют высокой точности в определении исходных величин. Поэтому пользоваться описанными методами для определения годовых потерь энергии как исходной величины для таких расчетов нет нужды. Как увидим ниже, гораздо проще и с достаточной для практических расчетов точностью эта величина определяется другими методами.

Определение же потерь энергии методами, рассмотренными здесь, следует лишь производить в специальных случаях, когда требуется изучение особых условий работы участка.

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПО СРЕДНИМ РАЗМЕРАМ ДВИЖЕНИЯ

§ 37. МЕТОД РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ

Сущность метода равномерно распределенной нагрузки заключается в том, что переменная по величине и месту расположения нагрузка заменяется равномерно распределенной.

Величина равномерно распределенной нагрузки, приходящейся на единицу длины (так называемая удельная нагрузка), выбирается так, чтобы общая нагрузка на линии оставалась равной действительной величине.

Удельная нагрузка может быть определена по средним токам поездов и их среднему числу или по расходу энергии в данной фидерной зоне:

$$i = \frac{A}{UTl} \frac{a}{\text{км}},$$

где A — расход энергии на данной фидерной зоне за расчетный период в $\text{м} \cdot \text{ч}$;

T — расчетный период в ч;

l — длина фидерной зоны в км;

U — напряжение в контактной сети в в.

Линия с равномерно распределенной нагрузкой, питаемая с одной стороны, представлена на рис. 149.

Для этой схемы нагрузка фидера подстанции (очевидно, средняя за расчетный период) подсчитывается по формуле

$$I_{\phi} = il_1.$$

Для схемы двустороннего питания (рис. 150)

$$I_{\phi A} = I_{\phi B} = i \frac{l_2}{2}.$$

Потеря напряжения для первой схемы на расстоянии x от подстанции будет равна

$$\Delta U_x = r \left[i(l-x)x + \int_0^x idx \right] = ri \left(l_1 x - \frac{x^2}{2} \right). \quad (a)$$

Максимальная потеря напряжения будет при $x = l_1$

$$\Delta U_{\max} = ir \frac{l_1^2}{2}.$$

Для случая двустороннего питания, используя симметрию схемы, можно заменить величину l_1 через $\frac{l_2}{2}$, и тогда максимальная потеря напряжения будет

$$\Delta U_{\max} = ir \frac{l_2^2}{8}.$$

Потеря мощности при равномерно распределенной нагрузке может быть определена в соответствии с формулой (121)

$$\Delta P = \int_0^l \Delta U_x idx.$$

Для схемы одностороннего питания, подставив сюда значения $l = l_1$ и ΔU_x из (а), получим

$$\Delta P = i^2 r \int_0^{l_1} \left(l_1 x - \frac{x^2}{2} \right) dx,$$

или

$$\Delta P = ir \frac{l_1^3}{3}.$$

При двустороннем питании, заменив в этом выражении l_1 на $\frac{l_2}{2}$ и удвоив результат, так как во всей фидерной зоне потеря мощности складывается из двух одинаковых величин, подсчитанных по выражению (б), получим

$$\Delta P = ir \frac{l_2^3}{12}.$$

В этом методе не учитываются колебания числа поездов, а сосредоточенные нагрузки заменяются распределенными. Поэтому он не дает возможности определять кратковременные максимальные и минимальные значения расчетных величин.

Результаты расчетов по формулам метода равномерно распределенной нагрузки будут всегда заниженными. А при небольшом числе поездов на линии (и особенно, если поезда различного типа) при частых остановках получаемые средние значения будут также сильно отличаться от действительных величин. Поэтому выведенные формулы для расчета системы энергоснабжения электрифицированных железных дорог не применяются, а сам метод используется при решении отдельных задач, не требующих большой точности.

§ 38. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ПОДВИЖНЫХ НАГРУЗОК

Как это отмечалось уже в § 21, развитие методов шло по пути все более глубокого отображения действительной картины потребления энергии движущимися поездами.

В этом отношении с появлением метода подвижных нагрузок был сделан большой шаг в области усовершенствования метода по сравнению с методом равномерно распределенной нагрузки.

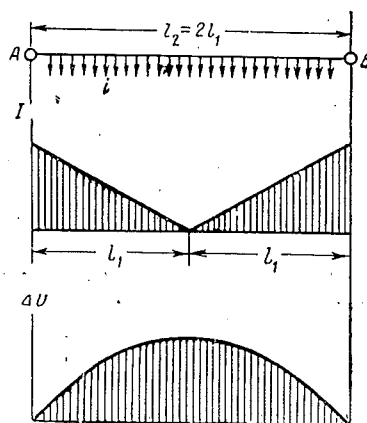


Рис. 150. К расчету участка двустороннего питания методом равномерно распределенной нагрузки

(б)

Основным достижением этого метода было то, что вместо распределенной неподвижной нагрузки были приняты сосредоточенные перемещающиеся нагрузки, т. е. была учтена одна из основных особенностей работы системы энергоснабжения электрических железных дорог.

Однако на этом этапе развития авторы метода принуждены были принять ряд допущений, позволивших им вывести соответствующие расчетные формулы.

В этом методе были приняты следующие основные исходные положения:

1) поезда, находящиеся на рассматриваемом участке, движутся с одинаковыми скоростями на равных расстояниях друг от друга (т. е. график движения параллельный и число поездов постоянное);

2) во все время движения поезда потребляют токи, равные средней величине за рассматриваемый период;

3) все поезда каждого направления однотипные.

Первая схема движения, которая рассматривается в методе, соответствует случаю, когда между двумя подстанциями движется в обе стороны одинаковое количество поездов, причем интервалы между поездами в каждом направлении не изменяются.

Несмотря на явно прогрессивную роль, которую в то время сыграл в развитии науки этот метод, все же в нем не удалось учесть ряда факторов, существенным образом влияющих на результаты расчетов. Основным является то, что этот метод также не учитывает колебания числа поездов и поэтому не может быть использован для определения максимальных и минимальных значений расчетных величин. Но и для средних значений он может дать заметные отклонения от истинных результатов.

Практически, особенно на участках с малым расстоянием между остановочными пунктами, время потребления поездом энергии меньше времени нахождения поезда на перегоне. Кроме того, в течение времени потребления энергии ток изменяется в довольно широких пределах. Поэтому значения средних потерь напряжения и потерь мощности, полученные по этим формулам, будут меньше действительных. Проф. А. Б. Лебедевым это было учтено и дана таблица поправок в зависимости от числа поездов и доли времени потребления энергии, на которые следует умножить результаты, полученные по этому методу, для учета влияния неучтенных факторов.

Необходимость вводить к методу поправки, достигающие значений $2 \div 3$, показывает, что в большинстве случаев точность полученных результатов в большей мере зависит от степени точности установленной поправки. Сыграв положительную роль в развитии методов расчета системы энергоснабжения, по изложенным причинам этот метод теперь не применяется.

§ 39. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА РАСЧЕТА ПО ЗАДАНЫМ РАЗМЕРАМ ДВИЖЕНИЯ (БЕЗ УЧЕТА КОЛЕБАНИЯ ЧИСЛА ПОЕЗДОВ)

Как уже выше было отмечено, переход от метода равномерно распределенной нагрузки к методу подвижных (сосредоточенных) нагрузок несколько приблизил картину потребления тока поездами к действительной. Однако ряд факторов остался неучтенным; что заставило ввести в метод численные поправки.

Стремление еще в большей мере отразить в методе расчета действительную картину работы системы энергоснабжения привело проф. Н. Н. Костромитина к разработке метода, учитывающего изменение тока поезда при его движении в рассматриваемой зоне, и к изменению расстояния между этими поездами. Число же поездов, по-прежнему, как при методе равномерно распределенной нагрузки или методе подвижных нагрузок, принималось постоянным.

Основными исходными положениями метода [29] являются:

1) число поездов в фидерной зоне постоянно и равно среднему, которое определяется по заданному числу поездов N за расчетный период T при известном времени хода поезда по фидерной зоне t выражением

$$n_{cp} = \frac{Nt}{T};$$

2) взаимное расположение поездов на линии не ограничивается никакими соображениями (подобно тому, как это имеет место на трамваях и троллейбусах);

3) токи поездов принимаются изменяющимися во времени (по пути) и оцениваются средними и эффективными (среднеквадратичными) значениями их за время хода поездов по фидерной зоне независимо от расположения элементов профиля по отдельным перегонам.

Таким образом, используя перечисленные выше исходные данные, удалось продвинуться дальше по пути отражения действительных условий работы. В основном это относится к учету колебания тока поездов. Что касается изменения взаиморасположения между поездами, то здесь допущена была противоположная крайность, так как допускалось в расчете любое взаимное положение поездов. Однако этот фактор при определении средних величин не оказывает существенного влияния на конечные результаты, поэтому принятое допущение не внесло заметной погрешности.

В дальнейшем, используя исходные положения, выдвинутые проф. Н. Н. Костромитиным, проф. В. Е. Розенфельд дал расчетные формулы для других схем питания (не рассмотренных проф. Н. Н. Костромитиным), а также расчетные формулы для определения потерь напряжения и потерь энергии [30].

Следует отметить, что полностью заменить поправки, предложенные проф. А. Б. Лебедевым, введенные в данный метод усовершенствования, не смогли.

Дело в том, что поправки проф. А. Б. Лебедев получил путем сопоставления результатов, полученных по своим расчетным формулам, с результатами расчета по методу анализа графика движения. Таким образом, поправки автоматически учитывали и колебание числа поездов, чего не было в описываемом методе, почему он и давал заниженные значения для величин, зависящих от числа поездов в квадрате.

На основе принятых предпосылок были сделаны попытки определить при помощи теории вероятностей вероятность различных значений нагрузок и, в частности, максимальных значений определяемых величин. Но, так как метод не учитывает колебания числа поездов, то он не может быть использован для определения максимальных и минимальных величин.

В случае резких изменений профиля в фидерной или подстанционной зоне метод может дать заметную ошибку. Сопоставляя этот метод с методом подвижных нагрузок, следует отметить, что в данном методе принимаются исходные положения (пп. 1 и 2), противоречащие друг другу. В самом деле, постоянное число поездов (п. 1) может быть выдержано только при параллельном графике движения, т. е. только при движении поездов с равными интервалами между ними (как и в предыдущем методе). Любое же расположение числа поездов (п. 2) может быть достигнуто только при изменении интервала между поездами.

Формулы этого метода могут быть легко получены из формул метода, учитывающего возможные расположения поездов в графике движения, для чего достаточно в последних принять число поездов постоянным, а токи их одинаковыми на всех перегонах, т. е. исключить влияние неравномерности движения.

Иными словами, формулы рассматриваемого метода являются частным случаем более общих, к рассмотрению которых мы перейдем в главе VIII.

§ 40. ПОНЯТИЕ О МЕТОДЕ ЭПЮР СРЕДНИХ НАГРУЗОК

Метод [31] основан на использовании эпюры средних падений напряжения, при помощи которой определяются средние значения ряда величин, участвующих в расчетах системы энергоснабжения электрических железных дорог.

Здесь приводится вывод основного уравнения, характеризующего эпюру средних падений напряжения в наиболее сжатом и доступном, но в то же время и в общем виде. Если в точке x некоторой линии в момент времени t протекает ток $I_{\lambda x t}$ и направление его совпадает с положительным направлением оси x , то приращение потери напряжения в линии $d\Delta U_{xt}$ на длине dx будет равно

$$d\Delta U_{xt} = I_{\lambda x t} r dx,$$

или в среднем за некоторое время T

$$d\Delta U_x = I_{\lambda x} r dx,$$

где $I_{\lambda x}$ — среднее значение тока в линии в точке x за время T . Отсюда

$$\frac{d\Delta U_x}{dx} = I_{\lambda x} r,$$

вторая производная получит вид

$$\frac{d^2 \Delta U_x}{dx^2} = r \frac{dI_{\lambda x}}{dx}. \quad (a)$$

Но $dI_{\lambda x}$ есть среднее значение приращения тока на длине dx за время T . Очевидно, оно равно среднему значению тока, потребляемого на этом участке, т. е.

$$dI_{\lambda x} = - \sum_{\kappa=1}^N \frac{I_{\kappa x} dt_{\kappa x}}{T}, \quad (б)$$

где N — число поездов, прошедших отрезок dx за время T ;

κ — номер поезда;

$I_{\kappa x}$ — ток поезда номера κ в точке x ;

$dt_{\kappa x}$ — время хода этого поезда на длине dx .

Подставив полученное значение в (а), будем иметь

$$\frac{d^2 \Delta U_x}{dx^2} = - \frac{r}{T} \sum_{\kappa=1}^N \frac{I_{\kappa x} dt_{\kappa x}}{dx},$$

но $\frac{dt_{\kappa x}}{dx} = \frac{1}{v_{\kappa x}}$ и, следовательно,

$$\frac{d^2 \Delta U_x}{dx^2} = - \frac{r}{T} \sum_{\kappa=1}^N \frac{I_{\kappa x}}{v_{\kappa x}}. \quad (в)$$

Уравнение (в) является наиболее общим видом уравнения эпюры средних падений напряжения, потому что не зависит от схемы питания. Особенности различных схем питания определяются постоянными общего интеграла уравнения (в).

Как видно из вывода (см. выражение б), сосредоточенные нагрузки заменяются средними по времени и, следовательно, схема с передвижными нагрузками заменяется схемой с распределенной нагрузкой (в частном случае с равномерно распределенной нагрузкой).

В описании метода отмечается, что если при сосредоточенных нагрузках эпюра падений напряжения представляется веревочным многоугольником (при расчетах мгновенных схем графическим способом — см. § 25), то в данном случае эпюра получает вид плавной кривой.

Исходя из того, что в данном методе в основу кладется принцип распределенной нагрузки, можно и эпюру средних падений напряжения построить для распределенной нагрузки.

Определив из расхода энергии для отдельных участков пути (например для перегонов) величину равномерно распределенной нагрузки и заменив ее сосредоточенной, можно обычным путем построить многоугольник токов и соответствующий ему веревочный многоугольник (рис. 151).

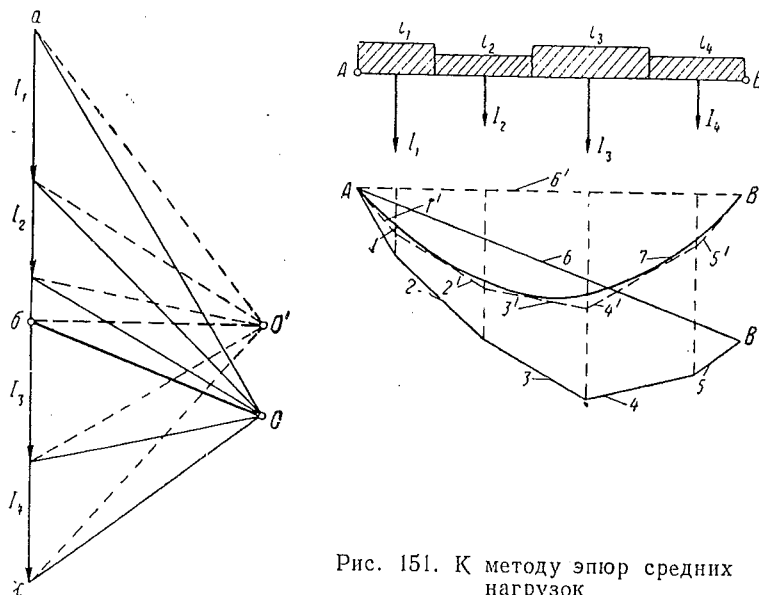


Рис. 151. К методу эпюр средних нагрузок

При этом падения напряжения измеряются ординатами, заключенными между линиями AB' и веревочным многоугольником (сплошная линия). Если уже известно распределение нагрузок между подстанциями ab и bc (на силовом многоугольнике), то не представляет трудности, передвинув полюс O , в положении O' добиться совпадения точек B и B' и тогда многоугольник получит вид, показанный пунктирной линией.

Эпюра же падений напряжения получается в виде плавной огибающей кривой, взятой около этого многоугольника.

Если такая кривая построена, то, как показано в методе, пользуясь ею, можно найти нагрузки подстанции, потери энергии и другие средние величины. Таким образом, данный метод дает возможность определить ряд средних значений расчетных величин. Поскольку он по существу исходит из средних нагрузок, то он не может быть использован для определения кратковременных (максимальных или минимальных) значений. Что же касается точности расчета, то, как это видно из изложенного, этот метод даст такую же точность, как и метод равномерно распределенной нагрузки, если при этом принимать ее на различных участках различной величины. В частном случае она может быть одинаковой по всей длине.

Следует также отметить, что метод исходит из расхода энергии за определенный промежуток времени, поэтому не учитывает влияния колебания числа поездов внутри этого промежутка времени на все расчетные величины.

МЕТОД РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ

§ 41. ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Выше установлено, что при расчетах элементов системы энергоснабжения надо определять ряд средних значений (нагрузки подстанции, фидеров и проводов контактной сети, эффективные их значения, потери напряжения, мощности и т. п.) и, кроме того, возможные кратковременные максимальные и минимальные значения их. Для определения тех и других величин необходимо располагать законами распределения соответствующей величины. Законы эти, выведенные на основе положений теории вероятностей, могут иметь большую или меньшую точность по сравнению со статистическими распределениями той же величины (или, как называют в курсах теории вероятностей, — «сходимость по вероятности»), а также и сложность в зависимости от заложенных в них исходных положений и принятых допущений.

Определение вероятностей появления той или иной нагрузки фидера или подстанции и т. п. с учетом того, что поезда потребляют различные токи в зависимости от их типа и места расположения и что непрерывно изменяется их число, является сложной задачей.

Наиболее простой вид эта задача получает в случаях, когда возможно допущение, что на рассматриваемых участках обращаются поезда одного типа, потребляющие на всем протяжении одинаковые токи. В этом случае закон распределения числа поездов, одновременно находящихся в рассматриваемой зоне, совпадает с законом распределения нагрузки этой зоны. Поэтому представляет интерес определение вероятностей появления того или иного числа поездов в рассматриваемой зоне при таких условиях.

Вопрос определения вероятности появления той или иной нагрузки подстанции неоднократно привлекал к себе внимание советских исследователей [29, 30]. При этом, как правило, обращались к так называемому «нормальному закону распределения» (известному также под названием закона Гаусса). Однако применение этого закона далеко не во всех случаях давало хорошие совпадения с практикой, а если и давало, то только в определенных условиях. Дело прежде всего в том, что кривая распределения Гаусса симметрична относительно вертикали, проходящей через наивысшую точку кривой, тогда как графики распределения тяговой нагрузки в общем случае несимметричны и это происходит в первую очередь за счет характера законов распределения числа поездов. Учет распределения числа поездов позволяет значительно приблизить теоретические кривые распределения к полученным из опыта.

Поэтому в первую очередь полезно остановиться на изучении законов распределения числа поездов.

§ 42. ЗАКОНЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ПОЕЗДОВ В РАССМАТРИВАЕМОЙ ЗОНЕ

В § 17 было показано, что распределение числа поездов в данной зоне, полученное на основе статистических материалов, имеет устойчивый характер. Это дает основание ожидать возможности составления математического закона распределения числа поездов.

Применение такого закона распределения для практических расчетов будет давать тем более ценные результаты, чем более полно будут отражены в нем исходные данные, т. е. чем ближе к реальным условиям будет расчетная схема.

Рассмотрим, какие величины влияют на частоту появления некоторого числа поездов.

Выше было выяснено, что в условиях эксплуатации неизбежно имеет место колебание числа поездов, одновременно занимающих фидерную зону. Рассматривались и причины такого явления. Это число поездов в отдельные периоды падает до некоторого минимума (самое «редкое движение») или даже до нуля. В какие-то другие моменты времени в зоне может находиться максимально возможное число поездов, определяемое условиями расстановки сигналов. Очевидно, что если это максимально возможное число поездов равно n , то в общем случае интересующие нас числа поездов, в разное время занимающие рассматриваемую зону m , лежат между нулем и величиной n , т. е. $0 < m < n$.

Не зная законов распределения числа поездов (т. е. величины m), мы все же можем подметить зависимость частоты появления числа поездов m от ряда факторов.

Рассмотрим наиболее упрощенный случай — одностороннее движение однотипных поездов.

Пусть при некотором значении суточного числа поездов N (одинаковом для различных суток) в результате длительного наблюдения было установлено, что в данной зоне:

Число поездов, равное	нулю,	появилось в течение	$q_0\%$	времени суток
»	единице	»	$q_1\%$	»
»	двум	»	$q_2\%$	»
»	k	»	$q_k\%$	»
»	n	»	$q_n\%$	»

Само собой разумеется, что $\sum_{m=0}^n q_m = 100\%$. Если представить графически $q_m = f(m)$, то получим многоугольник распределения числа поездов (рис. 152).

Если теперь увеличивать суточное число поездов N , то, очевидно, относительное время пребывания на участке различного числа поездов изменится. При этом частота появления чисел поездов, близких к наибольшему, будет увеличиваться, а частота малых чисел поездов будет падать. Тогда многоугольник b заменится многоугольником β (см. рис. 152). Наоборот, если суточное число поездов N уменьшить, то многоугольник b заменится многоугольником a . Однако во всех случаях сумма ординат даст те же 100%. Следовательно, частота появления числа поездов m зависит от N , а значит и вероятность появления этого числа поездов должна зависеть от N .

Несомненно, что частота появления m поездов должна зависеть и от того, сколько поездов может одновременно находиться в данной зоне. Например, если протяженность рассматриваемого участка увеличить вдвое, то при прочих равных условиях там может разместиться вдвое больше поездов. Нет сомнения, что с увеличением n будет чаще встречаться большее число поездов и реже меньшее, т. е. другими словами частота появления большего числа

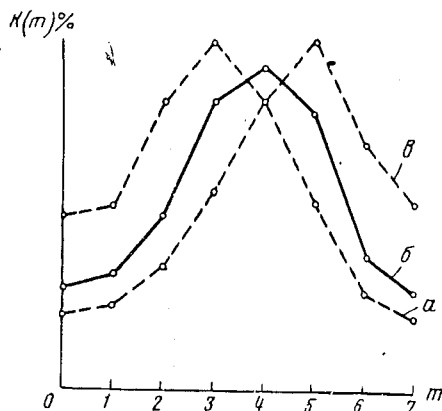


Рис. 152. Многоугольник распределения частот появления числа поездов m при различном суточном числе поездов: a — при суточном числе поездов N_a ; b — то же при N_b ; β — то же при N_β ; $N_a < N_b < N_\beta$

поездов будет расти, а меньшего — убывать. Таким образом, очевидно, что вероятность появления некоторого числа поездов m должна зависеть и от величины максимального числа поездов, могущих одновременно занимать рассматриваемую зону (n).

Обратим внимание еще на один фактор, который, несомненно, должен оказать влияние на частоту, а следовательно, и на вероятность появления числа поездов m .

Представим себе, что число поездов за некоторый промежуток времени T (например, за сутки) равно поперегонной пропускной способности N_0 ,

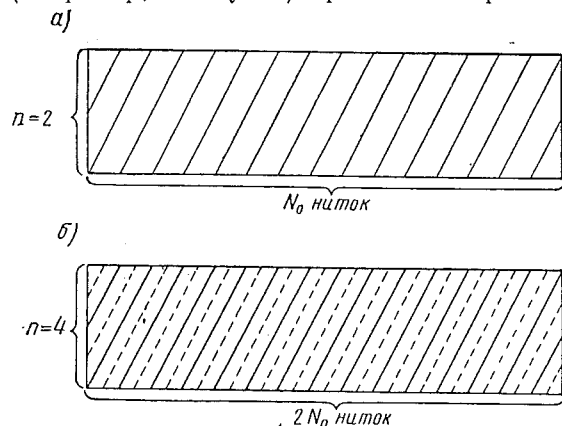


Рис. 153. График движения поездов для максимальной пропускной способности при одностороннем движении

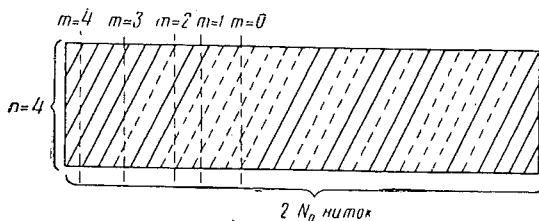


Рис. 154. Расположение поездов в нитках максимального графика

ке стало больше (из-за увеличения пропускной способности), и оказалось возможным больше пропустить поездов до и после рассматриваемого отрезка времени.

Поясним это на графике движения. Пусть мы имеем график для одностороннего движения, на который можно нанести за время T — N_0 ниток (рис. 153, а). Если фактическое число поездов N равно максимально возможному числу ниток N_0 , т. е. пропускной способности, то все нитки заняты поездами и постоянно в зоне держится число поездов n .

Допустим теперь, что на рассматриваемой линии перешли на более совершенную систему сношений. Это позволило проложить в графике еще такое же количество ниток (рис. 153, б, новые нитки добавлены пунктиром). Теперь, если расположить то же количество N поездов по этим ниткам неравномерно, то могут появиться периоды, когда в данной зоне не будет ни одного поезда. Например, как это показано на рис. 154 (жирными линиями показаны нитки графика, занятые поездами), есть периоды, когда $m = 4; 3; 2; 1$ и, наконец $m = 0$, хотя общее количество поездов осталось тем же, что и на рис. 153, а. Таким образом, становится ясным влияние величины пропускной способности N_0 на частоту и вероятность появления некоторого числа поездов в данной зоне.

т. е. по участку пропускается максимально возможное число поездов. Очевидно, в данном случае никакого колебания числа поездов, одновременно находящихся в данной зоне, не будет, а величина m становится постоянной и равной n , а частота $m=n$ будет равна единице. Теперь начнем увеличивать пропускную способность, например, переходя с жезловой системы сношений на полуавтоматическую блокировку и далее на автоматическую блокировку. Это, несомненно, отразится на частоте появления числа поездов m . Действительно, теперь в той же зоне может расположиться большее число поездов, так как вместе с увеличением N_0 увеличилась и величина n . Но этому явлению обязательно должно сопутствовать и другое. В какой-то отрезок времени в данной зоне поездов окажется значительно меньше прежнего или даже не будет вовсе. Это объясняется тем, что ниток в графике

Статистические исследования, проведенные для участков с различным числом поездов, различной пропускной способностью и т. п., подтверждают зависимость колебания числа поездов и частоты появления различного значения m от N , N_0 и n . Следовательно, расчетная схема для определения вероятности появления того или иного числа поездов должна связывать эту вероятность с величинами N (заданное число поездов за расчетный период T — обычно сутки), N_0 (пропускная способность за то же время) и n (максимальное число поездов, могущих одновременно находиться в данной зоне).

Примем следующую расчетную схему. Пусть мы имеем график движения, составленный по максимальной пропускной способности (рис. 155), т. е. имеющий N_0 ниток. Расстояние между парой смежных ниток определяется минимальным интервалом попутного следования — θ , т. е. $N_0 = \frac{T}{\theta}$.

Пусть в этом графике должно расположиться N поездов и располагаться они могут только по данным ниткам. Очевидно, можно представить себе самое разнообразное расположение этих N поездов в имеющихся N_0 нитках.

Будем рассматривать попадание того или иного поезда на ту или иную нитку как случайное явление, так как в действительности это явление связано с большим количеством причин, по-разному проявляющихся в различных условиях.

При построении закона распределения придется задаться некоторыми положениями в качестве исходных. Возможность использования принятых положений может быть установлена лишь тем, что результаты применения полученных закономерностей дадут хорошее совпадение с практикой. В таком случае мы сможем установленные в общем виде законы распределения применять в самых разнообразных случаях.

Примем, что вероятность попадания первого поезда на любую нитку одинакова.

Пользуясь терминологией, принятой в теории вероятностей, мы будем называть явление попадания поезда на определенную нитку «событием». В данном примере могут получить место N_0 событий. Пусть из числа этих событий нас в данном случае интересует только одно — попадание поезда на нитку $a - a_1$ (рис. 155). Событие, отвечающее поставленной задаче, называют благоприятным. Следовательно, из общего числа событий N_0 благоприятным является только одно, а так как мы условились считать все события равновероятными, то вероятность определенного события равна отношению числа благоприятных событий к их общему числу, т. е. в данном случае $\frac{1}{N_0}$. Другими словами, если бы в сутки проходил только один поезд, то вероятность того, что он займет одну определенную нитку (например, нитку $a - a_1$) из N_0 ниток, будет равна $\frac{1}{N_0}$.

Но так как число поездов за сутки равно N , то вероятность попадания одного какого-либо поезда из этих N поездов на определенную нитку (например, $a - a_1$) станет больше. В основном нас будет интересовать вероятность одновременного нахождения некоторого числа поездов в рассматриваемой зоне. Если максимальное число поездов, которое может вместить рассматриваемая зона, равно n и время хода поезда по этой зоне равно t , то, очевидно,

$$n = \frac{t}{\theta}, \quad (145)$$

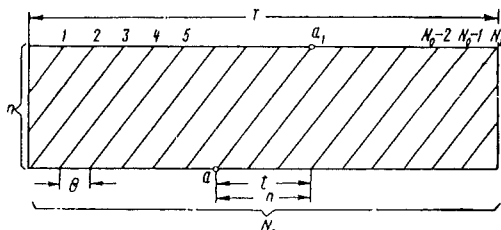


Рис. 155. График движения по максимальной пропускной способности

т. е. максимальное число поездов, которое может разместиться в данной зоне, равно числу ниток (или интервалов попутного следования θ), укладываемых в отрезок времени t . В этом случае вместо того, чтобы определять вероятность попадания некоторого числа поездов m в данный момент времени, можно определять вероятность попадания этого же числа поездов m на нитки, лежащие в отрезке времени t . Таким образом, нас интересует вероятность такого расположения поездов, при котором m поездов расположатся на каких угодно нитках внутри интервала t , а остальные $N - m$ поездов — на любых нитках за пределами этого интервала.

Выше мы приняли предположение, что все расположения поездов равновероятны, поэтому мы должны считать равновероятными и все графики.

На первый взгляд это может показаться противоречащим здравому смыслу, так как из опыта известно, что в жизни неизмеримо чаще встречаются графики с более или менее равномерным расположением поездов по времени суток, нежели, например, такие, в которых все поезда были бы расположены плотно в одной части суток. Однако это только кажущееся противоречие. Допущение равной вероятности всех возможных графиков движения отнюдь не противоречит, а наоборот, приводит к выводу, что наиболее вероятным является равномерное расположение поездов по времени суток. Объясняется это тем, что условие скопления всех поездов, например, в первой половине суток дает только один вариант графика движения, при расположении же поездов равномерно по времени суток даст огромное число вариантов графика.

Выше мы установили те параметры (N , n и N_0), с которыми необходимо связать закон распределения числа поездов. Схема же вывода формулы, описывающей закон распределения, будет зависеть еще от того, как мы будем учитывать влияние появления одного поезда в рассматриваемой зоне на появление второго, затем появление двух на появление третьего и т. п. Правильнее, конечно, будет предположение, что появление одного поезда в графике изменяет вероятность появления второго на каком-либо пути (поскольку одна нитка уже занята). Учет взаимозависимости появления поездов приведет нас к так называемому гипергеометрическому закону распределения. Если же мы будем пренебрегать этой зависимостью, то придем к биномиальному закону. Последний логически менее близок к истине, но зато в обращении он намного более прост. Возникает вопрос, какую ошибку внесет отказ от учета упомянутой зависимости. Чтобы ответить на этот вопрос, остановимся на выводе обоих законов.

Гипергеометрический закон распределения числа поездов. Вероятность попадания одного поезда на определенную нитку, как показано выше, равна $\frac{1}{N_0}$. Вероятность же попадания одного поезда из числа поездов N на определенную нитку будет равна $\frac{N}{N_0}$. Это то же самое, как если мы наудачу назвали бы номер нитки графика движения, то вероятность того, что эта нитка оказалась бы занятой поездом, равнялась бы $\frac{N}{N_0}$.

Соответственно, вероятность того, что наудачу взятая нитка окажется свободной, будет равна $\frac{N_0 - N}{N_0}$, так как свободных ниток в графике всего $N_0 - N$.

Однако после того, как мы определили вероятность занятия одним поездом одной определенной нитки из числа N_0 , вероятность занятия второй определенной нитки одним из оставшихся поездов уже изменяется.

Действительно, теперь число ниток, по которым могут размещаться оставшиеся поезда, равно $N_0 - 1$, так как одна уже занята, а число оставшихся поездов — $N - 1$. Следовательно, вероятность занятия вторым поездом второй определенной нитки равна уже $\frac{N - 1}{N_0 - 1}$.

Рассуждая так же, найдем вероятность занятия третьим поездом третьей определенной нитки; она, очевидно, будет $\frac{N-2}{N_0-2}$ и т. д., и, наконец, m -м поездом — m -й определенной нитки — $\frac{N-(m-1)}{N_0-(m-1)}$.

Теперь найдем вероятность того, что определенная нитка (из числа n ниток, нас интересующих) окажется свободной. К данному моменту мы уже заняли m определенных ниток, следовательно, всего осталось ниток $N_0 - m$. В этом числе ниток должны расположиться оставшиеся $N - m$ поездов и $N_0 - N$ ниток должны остаться свободными.

Рассуждая, как и выше, мы приходим к выводу, что вероятность того, что определенная нитка (при m занятых поездами) окажется свободной, будет равна

$$\frac{N_0 - N}{N_0 - m}.$$

Точно так же вероятность того, что вторая определенная нитка окажется свободной, будет равна

$$\frac{N_0 - N - 1}{N_0 - m - 1}.$$

Очевидно, вероятность того, что определенная k -я нитка окажется свободной, будет равна

$$\frac{N_0 - N - (k - 1)}{N_0 - n - (k - 1)}.$$

Зная вероятность «занятия» поездами отдельных ниток и вероятность «незанятия» других определенных ниток, можно найти вероятность того, что заданное число определенных ниток будет занято и другое заданное число определенных ниток будет свободно. Для этого следует воспользоваться положением теории вероятностей о том, что вероятность сложного события равна произведению вероятностей событий составляющих. Другими словами, вероятность того, что m определенных ниток будут заняты, а k определенных — свободны, будет равна произведению всех приведенных выше вероятностей.

Если же определять вероятность того, что в числе n определенных ниток (в данном случае расположенных внутри отрезка времени t , как показано на рис. 155) расположилось m поездов на определенных нитках, а $n - m$ опять-таки определенных ниток (из этого же числа n ниток) остались свободными, то в упомянутом произведении следует только заменить k на $n - m$. Тогда эта вероятность будет равна

$$\begin{aligned} \frac{N}{N_0} \cdot \frac{(N-1)}{(N_0-1)} \cdots \frac{N-(m-1)}{N_0-(m-1)} \cdot \frac{N_0-N}{N_0-m} \cdot \frac{N_0-N-1}{N_0-m-1} \cdots \\ \cdots \frac{N_0-N-(n-m-1)}{N_0-m-(n-m-1)}. \end{aligned} \quad (a)$$

Умножив числитель и знаменатель этого выражения на произведение

$$(N-m)! (N_0-n)! [N_0-N-(n-m)]!,$$

получим

$$\frac{N! (N_0 - N)!}{N_0!} \cdot \frac{(N_0 - n)!}{(N - m)! [N_0 - N - (n - m)]!},$$

или, так как

$$\frac{N! (N_0 - N)!}{N_0!} = \frac{1}{C_{N_0}^N} \quad \text{и} \quad \frac{(N_0 - n)!}{(N - m)! [N_0 - N - (n - m)]!} = C_{N_0 - n}^{N - m},$$

то определяемая вероятность получится равной

$$\frac{C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N}.$$

Нас же будет интересовать не вероятность того, что m поездов займут определенные нитки из числа их n , а вероятность того, что они вообще попадут в отрезок времени t , т. е. как угодно расположатся в этих n нитках. Конечно, такая вероятность будет значительно выше.

Согласно положению теории вероятностей общая вероятность ряда несовместных событий (т. е. таких, когда любая пара событий не может появиться одновременно) равна сумме их вероятностей. Следовательно, вероятность расположения m поездов в любых нитках из числа их n будет равна сумме вероятностей всех возможных расположений m поездов в n нитках. А так как в данном случае все возможные расположения m поездов в m (из n) определенных нитках равновероятны, то сумма всех вероятностей будет равна вероятности одного варианта расположения, умно-

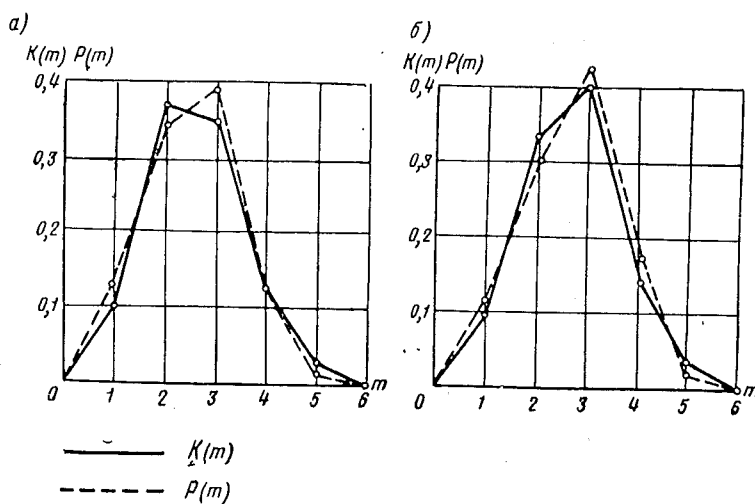


Рис. 156. Сравнение графиков (многоугольников) распределения для фидерной зоны двухпутной дороги:

а — летний плановый график; б — зимний плановый график

женной на число таких вариантов. Последнее же равно числу комбинаций, которые можно составить, размещая m поездов в n нитках, т. е. числу сочетаний из n по m (C_n^m). Тогда искомая вероятность равна

$$p(m) = \frac{C_n^m C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N}. \quad (146)$$

В теории вероятностей подобная зависимость носит название гипергеометрического распределения.

На рис. 156 и 157 приведены многоугольники распределения, полученные на основании статистических данных (сплошные линии), и на них наложены многоугольники распределения, построенные по формуле (146) для тех же условий.

Такое хорошее совпадение теоретических данных со статистическими дает полное основание считать выведенный закон вполне пригодным к применению для соответствующих расчетов.

Биномиальный закон распределения числа поездов. Расчетная схема и вывод закона распределения значительно упростятся, если мы отбросим влияние предыдущих событий на последующие, т. е. будем рассматривать

всю разобранную выше задачу как сложное событие, состоящее из ряда независимых. Поэтому надо считать, что для любого поезда независимо от того, появился ли предыдущий, вероятность занятия определенной нитки графика движения остается одной и той же — $\frac{N}{N_0}$.

Точно так же для всех ниток вероятность того, что эта нитка окажется свободной, будет одинакова и равна

$$\frac{N_0 - N}{N_0}.$$

Тогда, очевидно, вместо выражения (а) получим

$$\left(\frac{N}{N_0}\right)^m \left(\frac{N_0 - N}{N_0}\right)^{n-m} \quad (a')$$

и соответственно вместо выражения (146) будем иметь

$$p(m) = C_n^m \left(\frac{N}{N_0}\right)^m \left(\frac{N_0 - N}{N_0}\right)^{n-m}. \quad (147)$$

Полученный закон распределения называют биномиальным. Сравнение выражений (147) и (146) показывает, что отказ от учета влияния предыдущих событий на последующие только в тех случаях даст малое различие в величине вероятности, когда $N_0 \gg n$ и $N \gg m$, т. е. когда рассматривается достаточно большой период времени T (сутки и более). Если же рассматривается относительно небольшой период, где заданное число поездов N близко по величине к m , то разница в результатах расчета по формулам (146) и (147) может быть весьма ощутимой. Учитывая это обстоятельство, можно в зависимости от расчетных условий выбирать тот или иной закон распределения.

Среднее значение определяемой величины. В расчетах системы энергоснабжения приходится широко пользоваться средними значениями рассматриваемой величины: тока, напряжения, потерь мощности и т. п. При этом значение величины, например, тока в проводах контактной сети может входить в эти искомые средние значения в различных степенях. Например, если требуется определить средний уровень напряжения в какой-либо точке сети, то изменяющийся по времени ток можно заменить его средним значением, так как потеря напряжения пропорциональна току в первой степени. Если же нужно было бы определить количество тепла, выделенного этим же током в проводах, потребовалось бы уже определять среднее значение от квадратов тока, так как выделяемое количество тепла пропорционально квадрату тока. Можно привести еще ряд примеров, когда искомая величина будет зависеть от тока в еще больших степенях.

Если мы даже знаем все значения, которые может получать рассматриваемая величина, то этого недостаточно для определения ее среднего значения, надо еще знать, как часто будет появляться то или иное значение. Другими словами, можно установить среднее значение величины, если известна частота появления ее различных значений. Если рассматриваемая величина (например, число поездов, одновременно находящихся в фидерной зоне) m может иметь значения от 0 до n , то, обозначив число опытов, в которых появилось данное

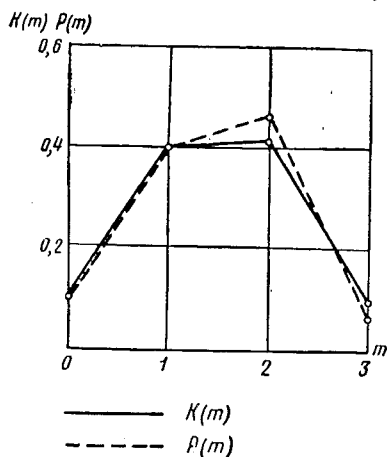


Рис. 157. Сравнение графиков (многоугольников) распределения для фидерной зоны однопутного участка

значение величины m , через κ_m , очевидно, среднее значение этой величины найдем

$$m_{cp} = \frac{\sum_{m=0}^n m \kappa_m}{\sum_{m=0}^n \kappa_m},$$

или

$$m_{cp} = \sum_{m=0}^n m \frac{\kappa_m}{K},$$

где $K = \sum_{m=0}^n \kappa_m$ — общее количество опытов.

Но отношение $\frac{\kappa_m}{K}$ есть частота появления величины m , следовательно, среднее значение величины равно сумме произведений из всех возможных значений ее на частоту их появления. Таким же образом может быть найдено среднее значение от любой степени рассматриваемой величины.

$$(m^a)_{cp} = \sum_{m=0}^n m^a \frac{\kappa_m}{K}.$$

Из статистических данных мы можем определять такие средние значения только для прошедшего отрезка времени или для будущего, если есть основание полагать, что абсолютно все условия работы на рассматриваемой линии не изменятся. Необходимо же уметь предугадать среднее значение интересующей нас величины для самых различных условий.

Как частота с увеличением числа опытов стремится к своему пределу — вероятности, так и среднее значение величины с увеличением числа опытов стремится к некоторому пределу. Этот предел называют математическим ожиданием

$$\overline{m^a} = \lim_{K \rightarrow K_{\max}} (m^a)_{cp} = \lim_{K \rightarrow K_{\max}} \sum_{m=0}^n m^a \frac{\kappa_m}{K}.$$

Здесь черта над величиной обозначает ее математическое ожидание, а K_{\max} — максимально возможное число опытов. В зависимости от постановки задачи оно может равняться некоторому конечному значению или бесконечности. Можно написать

$$\overline{m^a} = \sum_{m=0}^n m^a \lim \frac{\kappa_m}{K},$$

но

$$\lim \frac{\kappa_m}{K} = p(m),$$

следовательно,

$$\overline{m^a} = \sum_{m=0}^n m^a p(m). \quad (148)$$

Таким образом, математическое ожидание равно произведению всех значений рассматриваемой величины на вероятность этих значений. Полученное выражение (148), если удалось установить закон распределения, дает возмож-

ность находить ожидаемые средние значения случайных величин (т. е. их предугадывать).

Рассмотрим несколько примеров определения математического ожидания. Остановимся сначала на определении суммы вероятностей появления всех значений случайной величины на примере числа поездов, одновременно занимающих рассматриваемую зону.

Пользуясь формулой (146), напомним

$$\sum_{m=0}^n p(m) = \sum_{m=0}^n \frac{C_n^m C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N} = \frac{\sum_{m=0}^n C_n^m C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N}.$$

Числитель правой части последнего выражения дает число всех возможных графиков движения, какие можно построить в N_0 нитках из N поездов, так как взяты все возможные значения числа поездов, одновременно занимающих рассматриваемую зону (m).

А тогда, следовательно,

$$\sum_{m=0}^n C_n^m C_{N_0-n}^{N-m} = C_{N_0}^N$$

и

$$\sum_{m=0}^n \frac{C_n^m C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N} = 1, \quad (149)$$

т. е.

$$\sum_{m=0}^n p(m) = 1, \quad (149')$$

что и следовало ожидать, так как сумма всех вероятностей должна дать единицу.

Аналогично и для биномиального закона [формула (147)], а также и для любого другого закона распределения положение (149') остается правильным.

Рассмотрим теперь, чему равно математическое ожидание (среднее значение) числа поездов m . Согласно выражению (148)

$$\bar{m} = \sum_{m=0}^n m p(m),$$

подставив сюда значение $p(m)$ из формулы (146), будем иметь

$$\bar{m} = \sum_{m=0}^n m \frac{C_n^m C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N}.$$

Можно упростить это выражение, используя равенство (149), но предварительно нужно вывести из-под знака \sum величину m . Так как первый член суммы (при $m=0$) обращается в нуль, то

$$\bar{m} = 0 + \sum_{m=1}^n m \frac{C_n^m C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N}.$$

Используя теперь известные свойства сочетаний, можно написать:

$$\bar{m} = \sum_{m=1}^n m \frac{\frac{n}{m} C_{n-1}^{m-1} C_{N_0-n}^{N-m}}{\frac{N_0}{N} C_{N_0-1}^{N-1}},$$

или

$$\bar{m} = \sum_{m=1}^n \frac{nN}{N_0} \cdot \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)}}{C_{N_0-1}^{N-1}}.$$

Но величина $\frac{nN}{N_0}$ относительно суммы является величиной постоянной и поэтому может быть выведена за знак суммы. Тогда

$$\bar{m} = \frac{nN}{N_0} \sum_{m=1}^n \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)}}{C_{N_0-1}^{N-1}}.$$

Выражение под знаком суммы есть согласно формуле (146) вероятность появления $m-1$ поездов в $n-1$ нитках при условии, что общее число ниток равно N_0-1 , а поездов — $N-1$, т. е.

$$\bar{m} = \frac{nN}{N_0} \sum_{m=1}^n p(m-1).$$

Примем $m-1$ за новое переменное (вместо m). Соответственно изменятся и пределы суммы. При $m=n$ и $m=1$ соответственно $m-1=n-1$ и $m-1=0$ и тогда

$$\bar{m} = \frac{nN}{N_0} \sum_{m-1=0}^{n-1} p(m-1).$$

Последнее выражение есть сумма вероятностей всех возможных значений величины $m-1$ от 0 до $n-1$ и поэтому согласно формуле (149')

$$\sum_{m-1=0}^{n-1} p(m-1) = 1.$$

Следовательно,

$$\bar{m} = \frac{nN}{N_0}. \quad (150)$$

Среднее число поездов может быть определено и минуя законы распределения. Действительно, если каждый поезд в данной зоне будет находиться в течение t единиц времени, а всего за время T пройдет N поездов, то среднее количество поездов за это время будет равно

$$m_{cp} = \frac{Nt}{T}. \quad (150')$$

Так как согласно формуле (145)

$$n = \frac{t}{\theta},$$

а максимальное количество ниток, которое можно заложить в график, равно

$$N_0 = \frac{T}{\theta}, \quad (151)$$

то, подставив в выражение (150) значения n и N_0 из выражений (145) и (151), получим

$$\bar{m} = \frac{\frac{t}{\theta} N}{\frac{T}{\theta}} = \frac{tN}{T},$$

т. е. выражения (150) и (150') тождественны.

Совершенно то же среднее значение мы получили бы, пользуясь биномиальным законом распределения (так как оно не зависит от закона распределения).

В дальнейшем нам понадобится и математическое ожидание квадрата числа поездов, т. е. $\overline{m^2}$

$$\overline{m^2} = \sum_{m=0}^n m^2 p(m),$$

или

$$\overline{m^2} = \sum_{m=0}^n m^2 \frac{C_n^m C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0}^N}.$$

Используя предыдущий вывод, можно написать

$$\overline{m^2} = \frac{Nn}{N_0} \sum_{m=1}^n m \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)}}{C_{N_0-1}^{N-1}}.$$

Заменяв здесь множитель m на $(m-1) + 1$, получим

$$\overline{m^2} = \frac{Nn}{N_0} \sum_{m=1}^n [(m-1) + 1] \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)}}{C_{N_0-1}^{N-1}},$$

или

$$\overline{m^2} = \frac{Nn}{N_0} \left[\sum_{m=1}^n (m-1) \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)}}{C_{N_0-1}^{N-1}} + \sum_{m=1}^n \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)}}{C_{N_0-1}^{N-1}} \right].$$

Второй член в квадратной скобке равен единице, а первый член первой суммы (при $m=1$) равен нулю.

Тогда

$$\overline{m^2} = \frac{Nn}{N_0} \left[0 + \sum_{m=2}^n (m-1) \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)}}{C_{N_0-1}^{N-1}} + 1 \right].$$

Подставив теперь сюда

$$C_{n-1}^{m-1} = \frac{n-1}{m-1} C_{n-2}^{m-2} \quad \text{и} \quad C_{N_0-1}^{N-1} = \frac{N_0-1}{N-1} C_{N_0-2}^{N-2},$$

а также

$$C_{(N_0-1)-(n-1)}^{(N-1)-(m-1)} = C_{(N_0-2)-(n-2)}^{(N-2)-(m-2)},$$

после сокращений получим

$$\overline{m^2} = \frac{Nn}{N_0} \left[\sum_{m=2}^n \frac{(N-1)(n-1)}{N_0-1} \cdot \frac{C_{n-2}^{m-2} C_{(N_0-2)-(n-2)}^{(N-2)-(m-2)}}{C_{N_0-2}^{N-2}} + 1 \right].$$

Если вынести $\frac{(N-1)(n-1)}{N_0-1}$ за знак суммы, то под ним останется выражение

$$\frac{C_{n-2}^{m-2} C_{(N_0-2)-(n-2)}^{(N-2)-(m-2)}}{C_{N_0-2}^{N-2}},$$

представляющее собой вероятность появления числа поездов $m-2$ в $n-2$ нитках при общем числе ниток N_0-2 и поездов $N-2$. Тогда рассматриваемая сумма может быть представлена в виде

$$\sum_{m=2}^n p(m-2).$$

Если $m=2$, то $m-2=0$. При $m=n$, $m-2=n-2$. Следовательно,

$$\sum_{m=2}^n p(m-2) = \sum_{m-2=0}^{n-2} p(m-2),$$

но $\sum_{m-2=0}^{n-2} p(m-2) = 1$, так как это есть сумма вероятностей всех значений величины $m-2$. Поэтому

$$\overline{m^2} = \frac{Nn}{N_0} \left[\frac{(N-1)(n-1)}{N_0-1} + 1 \right]. \quad (152)$$

Если же воспользоваться биномиальным законом, то, проделав аналогичные выкладки, получим

$$\overline{m^2} = \frac{Nn}{N_0} \left[\frac{N(n-1)}{N_0} + 1 \right]. \quad (153)$$

Если сравнить выражения (152) и (153), то легко увидеть, что $\overline{m^2}$ по биномиальному закону получает близкое значение $\overline{m^2}$ по гипергеометрическому при столь больших значениях N и N_0 , при которых можно допустить, что

$$\frac{N-1}{N_0-1} \approx \frac{N}{N_0}.$$

Поэтому в большинстве расчетов можно пользоваться более простым (биномиальным) законом распределения.

§ 43. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ И ИХ ФИДЕРОВ НА ОСНОВЕ ЗАДАННЫХ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ПОЕЗДОВ

Эффективная нагрузка подстанций и фидеров находится в прямой зависимости от числа поездов (а следовательно, от колебаний этого числа в отдельные моменты времени), а также от токов поездов, их изменения во времени и, наконец, от возможного расположения поездов относительно друг друга. Последний фактор имеет значение потому, что при различных взаиморасположениях поездов в отдельные моменты времени возможны различные сочетания поездных токов, что влияет на среднеквадратичное значение нагрузки подстанции или фидера.

Поскольку организация движения не допускает некоторых взаимных расположений поездов (например, нескольких поездов на одном блок-участке), то она в известной мере отражается на возможных сочетаниях токов поездов, а отсюда и на эффективной нагрузке подстанций и фидеров. Значит, рассматривая попадание поезда в данную точку фидерной или подстанционной зоны как случайное явление, строго говоря, нельзя принимать расположение поездов на одном и том же пути независимым, а поэтому нельзя считать токи отдельных поездов независимыми случайными явлениями. Если же принять, что все перегоны одинаковы, то допущение независимости расположения поездов друг от друга не даст ошибки и сильно упростит все выкладки. Здесь мы будем исходить из допущения независимости расположения поездов в фидерной или подстанционной зоне. Расчет может быть произведен, при необходимости, и с учетом такой зависимости [13].

Основные формулы имеют один и тот же вид для всех схем питания, встречающихся на электрических железных дорогах, поэтому вывод их можно дать для схемы одностороннего питания, как наиболее простого случая. Зависеть от схемы питания будет способ определения исходных величин, входящих в эти формулы.

Примем следующую систему обозначений. Наличие буквы t в сложном или однозначном индексе обозначает мгновенное значение данной величины, а отсутствие буквы t указывает, что рассматривается среднее значение ее. Эффективное значение величины отмечается в индексе буквой e . Наличие в индексе буквы k определяет номер поезда, к которому относится данная величина. Кроме того, для обозначения принадлежности величины тока фидеру или подстанции в индекс вводится соответственно буква f или c .

Все обозначения, не охватываемые этой системой, оговариваются ниже особо.

При одностороннем питании участков, примыкающих к рассматриваемой подстанции, нагрузка ее будет в каждый момент времени равна сумме всех нагрузок. Число же этих нагрузок может изменяться, снижаясь до некоторого минимума или до нуля и поднимаясь до максимального, определяемого организацией движения на участке.

Таким образом, если рассматривать нагрузку подстанции в данный момент времени как случайную величину, то она в свою очередь будет определяться значениями токов поездов и числом их. Ток поезда I_{tk} и число поездов m будем рассматривать как случайные величины. В соответствии с принятыми выше допущениями будем считать, что при любом числе поездов m каждый поезд может иметь любое значение тока I_{tk} , как если бы он был один в данной зоне; другими словами, будем считать эти случайные величины (токи поездов и их число) независимыми.

Учитывая это допущение, можно определять средние значения тока подстанции или ее фидера в два приема, т. е. сперва принять некоторое число поездов m за постоянное и найти для этого числа поездов искомую нагрузку. Согласно терминологии, применяемой в теории вероятностей, это будут условные средние значения. После этого можно найти средние значения тех же величин при колеблющемся значении m . При расчете мощности подстанций нас интересует среднее значение тока подстанции или ее фидера и эффективное значение того же тока (или квадрат его). При этом схема решения задачи остается неизменной, определяется ли ток подстанции или ее отдельного фидера. Только входящие в конечные выражения величины в зависимости от того, определяется ток фидера или подстанции, должны браться соответственно для фидерной или подстанционной зоны.

Средние значения будем определять как математические ожидания. Тогда согласно определению

$$I_c = \sum_{m=0}^n I_{cm} p(m)$$

и

$$I_{ec}^2 = \sum_{m=0}^n I_{ecm}^2 p(m).$$

Здесь наличие в индексе буквы m указывает, что эта величина соответствует данному постоянному значению числа поездов m , одновременно находящихся на подстанционной (или фидерной) зоне.

Рассмотрим некоторый момент времени, когда на данной зоне будет находиться m поездов. В этом случае нагрузка подстанции (мгновенная) будет равна

$$I_{tcm} = \sum_{k=1}^m I_{tk}.$$

Среднее значение тока подстанции за расчетный период T при m поездах в рассматриваемой зоне будет, очевидно, равно

$$I_{cm} = \overline{I_{tcm}} = \overline{\sum_{k=1}^m I_{tk}}.$$

Здесь, как и выше, черта над величиной обозначает ее среднее значение (или математическое ожидание).

Согласно известной теореме среднее значение суммы равно сумме средних значений, т. е.

$$I_{cm} = \sum_{k=1}^m \overline{I_{tk}} = \sum_{k=1}^m I_k.$$

Но, так как мы рассматриваем (для простоты) случай однотипных поездов, то

$$I_{cm} = mI.$$

Все, что написано до сих пор, было сделано в предположении неизменного значения числа поездов m . В действительности оно меняется в пределах от 0 до n . Тогда средний ток подстанции за период T при действительных условиях должен быть определен как среднее значение при всех значениях m , т. е.:

$$I_c = \overline{I_{cm}} = \overline{mI}.$$

Так как величина I есть среднее значение тока поезда за время его хода по рассматриваемой зоне, то она является постоянной и может быть вынесена за знак среднего значения. Таким образом

$$I_c = \overline{m}I.$$

Подставляя сюда значение \overline{m} из уравнения (150), получим окончательное выражение для среднего значения тока подстанции

$$I_c = \frac{Nn}{N_0} I. \quad (154)$$

Перейдем теперь к определению среднего значения квадрата нагрузки подстанции (квадрата эффективного значения этой нагрузки).

В момент времени t при постоянном числе поездов в рассматриваемой зоне m квадрат тока подстанции будет

$$I_{tcm}^2 = \left(\sum_{k=1}^m I_{tk} \right)^2.$$

Квадрат эффективного тока подстанции, равный среднему значению этой величины, определится выражением

$$I_{эcm}^2 = \overline{I_{tcm}^2} = \overline{\left(\sum_{k=1}^m I_{tk} \right)^2}.$$

Так как мы приняли допущение о независимости токов поездов между собой, то правую часть равенства можно выразить по известной теореме о среднем значении квадрата суммы независимых величин. Тогда

$$I_{эcm}^2 = \sum_{k=1}^m \overline{I_{tk}^2} + \left(\sum_{k=1}^m \overline{I_{tk}} \right)^2 - \sum_{k=1}^m \left(\overline{I_{tk}} \right)^2,$$

или

$$I_{эcm}^2 = \sum_{k=1}^m I_k^2 + \left(\sum_{k=1}^m I_k \right)^2 - \sum_{k=1}^m I_k^2.$$

Так как все поезда однотипны, то последнее выражение принимает вид

$$I_{эcm}^2 = mI_s^2 + m^2 I^2 - mI^2,$$

или

$$I_{sc}^2 = m(I_s^2 - I^2) + m^2 I^2.$$

Для действительных условий (при переменном значении m) квадрат эффективной нагрузки подстанции определится из выражения

$$I_{sc}^2 = \overline{I_{sc}^2} = \overline{m(I_s^2 - I^2) + m^2 I^2}.$$

Используя теоремы о среднем значении суммы, а также имея в виду, что токи поездов (средние и эффективные) в этом выражении постоянны, преобразуем его правую часть, т. е.

$$I_{sc}^2 = \overline{m}(I_s^2 - I^2) + \overline{m^2} I^2.$$

Заменяя здесь \overline{m} и $\overline{m^2}$ из формул (150) и (152), получим

$$I_{sc}^2 = \frac{Nn}{N_0} I_s^2 + \frac{N(N-1)n(n-1)}{N_0(N_0-1)} I^2. \quad (155)$$

Последнее выражение является расчетной формулой для определения эффективной нагрузки подстанции или ее фидера ($I_{sc} = \sqrt{I_{sc}^2}$) для любой схемы питания при однотипных поездах.

Если вместо гипергеометрического взять биномиальное распределение, то вместо формулы (155) получим

$$I_{sc}^2 = \frac{Nn}{N_0} I_s^2 + \frac{N_n^2(n-1)}{N_0^2} I^2. \quad (156)$$

Формула (156) непосредственно может быть получена из формулы (155), если принять, что $\frac{N-1}{N_0-1} \approx \frac{N}{N_0}$, и заменить первое отношение вторым. Это, как указывалось, не внесет заметной погрешности при достаточно большом расчетном периоде, т. е. при N и N_0 много больших, чем n .

§ 44. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ И ЭФФЕКТИВНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОЕЗДНЫХ ТОКОВ ПОДСТАНЦИЙ ИЛИ ФИДЕРОВ

В предыдущем параграфе получены формулы для определения средних и эффективных нагрузок тяговых подстанций или их фидеров. В эти формулы в качестве исходных величин, кроме N , N_0 и n , первая из которых задается, а остальные определяются по формулам (151) и (145), входят средние и эффективные значения поездных токов, потребляемых от данного фидера или подстанции (I и I_s или I_s^2).

Рассмотрим способы определения этих величин.

Определение средних и эффективных токов поездов при отсутствии рекуперации энергии. Если до расчета системы энергоснабжения были проделаны тяговые расчеты и построены кривые потребления поездами тока, то без труда может быть найдено среднее значение тока для каждого типа поезда, как средняя ордината кривой $I_t = f(t)$. Аналогично можно найти и средний квадрат тока поезда по кривой $I_t^2 = \varphi(t)$, которую для этой цели следует предварительно построить, возведя в квадрат ординаты кривой $I_t = f(t)$.

Если же кривых потребления тока поездами нет, то среднее значение тока может быть легко найдено по заданному расходу энергии. Вопрос определения эффективного значения тока в этом случае затрудняется. Однако легко показать, что при наличии данных о средних значениях тока поездов за все время хода I по рассматриваемому участку (блок-участку, перегону, фидерной или подстанционной зоне) и за время потребления им энергии на этом участке с достаточной точностью можно установить и соответствующее

эффективное значение тока. С другой стороны, определение средних и эффективных значений токов поездов по кривым $I_t = f(t)$ и $I_t^2 = \varphi(t)$ требует очень большой, кропотливой работы по планиметрированию площадей, образуемых этими кривыми и осью абсцисс в определенных пределах. Кроме того, обычно в тяговых расчетах даются кривые не по времени, а по пути, что требует еще и перестройки их. Можно, однако, показать, что искомые значения поездных токов можно получить значительно проще с достаточной для практических целей точностью.

При движении поезда по участку энергия потребляется поездом непрерывно, так как имеют место различные режимы движения (тяга, выбег, торможение) в зависимости от профиля и других условий движения.

На рис. 158 показана кривая $I_t = f(t)$ для общего случая. Пусть здесь рассматривается некоторый участок (например, фидерная зона) и t_x — время хода поезда по этому участку, а t_m — время потребления энергии поездом.

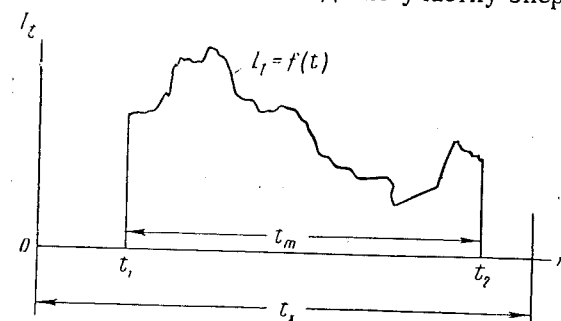


Рис. 158. К определению средних и эффективных значений токов поездов

Среднее значение тока поезда за время потребления энергии найдется из выражения

$$I_m = \frac{1}{t_m} \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt.$$

Среднее значение того же тока за все время хода по рассматриваемому участку будет

$$I = \frac{1}{t_x} \int_0^{t_x} f(t) dt.$$

Из рис. 158 видно, что интегралы обоих выражений равны и поэтому

$$I_m = \frac{t_x}{t_m} I.$$

Обозначая

$$\frac{t_x}{t_m} = \alpha, \quad (\alpha \geq 1)$$

найдем

$$I_m = \alpha I. \quad (157)$$

Квадрат эффективного значения тока поезда также за время потребления энергии и за все время хода выразится равенствами:

$$I_{\text{эм}}^2 = \frac{1}{t_m} \int_{t_1}^{t_2} f^2(t) dt$$

$$I_{\text{э}}^2 = \frac{1}{t_x} \int_0^{t_x} f^2(t) dt.$$

Как и выше, из-за равенства интегралов

$$I_{\text{э}}^2 = \frac{t_m}{t_x} I_{\text{эм}}^2 = \frac{1}{\alpha} I_{\text{эм}}^2. \quad (158)$$

Обозначив

$$\frac{I_{am}^2}{I_m^2} = \kappa_s^2,$$

где κ_s следует называть коэффициентом эффективности кривой поездного тока, получим

$$I_s^2 = \frac{1}{\alpha} \kappa_s^2 I_m^2.$$

Подставляя сюда значение I_m из формулы (157), получим окончательно

$$I_s^2 = \kappa_s^2 \alpha I^2. \quad (159)$$

Произведение $\kappa_s^2 \alpha = \kappa_{en}^2$ и величину κ_{en}^2 можно называть коэффициентом эффективности поездного тока.

Таким образом, эффективное значение тока поезда может быть определено через среднее, которое легко подсчитывается по расходу энергии.

Величина α — отношение полного времени хода поезда ко времени потребления энергии — может быть всегда получена из тяговых расчетов или других материалов.

Что касается величины κ_s^2 , то, как показали многочисленные расчеты, она колеблется в очень узких пределах.

В расчетах принимают $\kappa_s^2 = 1,00 \div 1,10$, причем бóльшие значения для участков с резко меняющимся профилем или с частыми остановками (метро, пригородные поезда). Ниже нами принято значение

$$\kappa_s^2 = 1,08 \text{ [13].}$$

Определение средних и эффективных токов поездов при рекуперации энергии. Приведенный способ определения эффективного тока поезда основан на том, что коэффициент эффективности поездного тока κ_{en} в основном зависит от соотношения времени потребления энергии и общего времени хода поезда. Изменение же кривой в период потребления тока дает небольшое изменение и оценивается, как и выше, коэффициентом $\kappa_s = 1,00 \div 1,05$.

На основании этих же соображений был предложен упрощенный способ определения эффективного тока поезда при применении рекуперативного торможения [32].

Суть этого способа сводится к следующему.

Пусть на некотором интересующем нас участке (перегоне, фидерной зоне и т. п.) кривая потребления тока имеет вид, представленный на рис. 159, а. Здесь и в приводимых ниже формулах приняты следующие обозначения:

I_{tm} — мгновенное значение тока в период потребления энергии;

I_{tr} — мгновенное значение тока в период рекуперации энергии;

I_s — среднее значение этого тока за время рекуперации.

Остальные обозначения те же, что и выше. Найдем среднее значение тока поезда и квадрат его эффективного значения.

Представим на рис. 159, б в условном виде собранные в одном месте все периоды потребления энергии, а в другом все периоды рекуперации, заменив изменяющиеся токи их средними значениями.

Тогда, принимая во внимание рекуперативный режим, средний ток поезда за все время его хода по данному участку будет

$$I = \frac{I_m t_m - I_r t_r}{t_x}. \quad (a)$$

При определении эффективного тока поезда ордината квадратов тока рекуперации будет иметь тот же знак, что и ордината квадратов тяговых токов. Поэтому согласно формуле (159)

$$I_s^2 = \kappa_s^2 \alpha I^2, \quad (б)$$

Заменяя I_i^2 его средним значением (квадратом эффективного тока поезда за время хода по фидерной зоне), можно эту величину вынести за знак средней. Тогда получим

$$I_{\Sigma A}^2 = I_{\Sigma}^2 \overline{\left(\frac{l-x}{l}\right)^2},$$

но

$$\overline{\left(\frac{l-x}{l}\right)^2} = \frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{l-x}{l}\right)^2 dx = \frac{1}{3}.$$

Поэтому

$$I_{\Sigma A}^2 = I_{\Sigma B}^2 = \frac{1}{3} I_{\Sigma}^2. \quad (164)$$

В этом случае при двустороннем питании можно определять квадрат эффективного поездного тока фидера (при отсутствии рекуперации) исходя из следующего.

Подставив в формулу (164) вместо I_{Σ}^2 его значение из формулы (159) и заменив κ_{Σ}^2 величиной $1,0 \div 1,1$, получим

$$I_{\Sigma A}^2 = (0,33 \div 0,37) \alpha I^2,$$

или, взяв среднее значение коэффициента,

$$I_{\Sigma A}^2 = 0,35 \alpha I^2. \quad (164')$$

Если на фидерной зоне поезда потребляют значительно изменяющийся ток или это потребление имеет частые перерывы (метро, пригородные участки, горные профили), то расчеты по средним токам поездов за время хода по фидерной зоне могут дать существенные ошибки. В этих случаях расчеты следует вести по средним токам поездов за время хода их по отдельным перегонам (блок-участкам).

Рис. 162. К расчету по средним токам поездов за время их хода по перегонам

При этом среднее значение поездного тока фидера, например подстанции А, определится из следующих соображений (рис. 162). Если на некотором перегоне (блок-участке) i найдено среднее значение тока поезда I_i , то для определения поездного тока фидера можно считать, что такой величины сосредоточенная нагрузка приложена в середине данного перегона. Тогда

$$I_{Ai} = I_i \frac{l_{oiB}}{l}.$$

Взяв среднее значение для всех n перегонов, получим

$$I_A = \sum_{i=1}^n I_{Ai} \frac{t_i}{t_{\phi}},$$

или

$$I_A = \frac{1}{lt_{\phi}} \sum_{i=1}^n I_i l_{oiB} t_i, \quad (165)$$

где t_i — время хода поезда по i -му перегону;

t_ϕ — то же по фидерной зоне.

Из тех же соображений получим и квадрат эффективного поездного тока фидера:

$$I_{\phi A}^2 = \sum_{i=1}^n I_{\phi Ai}^2 \frac{t_i}{t_\phi},$$

но

$$I_{\phi Ai}^2 = \overline{I_{Ai}^2} = I_{ii}^2 \left(\frac{x_B}{l} \right)^2,$$

где x_B — координата тока I_{ii} от подстанции B .

Заменим значение I_{ii}^2 средним значением за время хода по i -му перегону, т. е. квадратом эффективного тока поезда, и вынесем его за знак средней. Тогда

$$I_{\phi Ai}^2 = I_{\phi i}^2 \left(\frac{x_B}{l} \right)^2.$$

Очевидно, что

$$\overline{\left(\frac{x_B}{l} \right)^2} = \frac{1}{l_i} \int_{l_1}^{l_2} \frac{x_B^2}{l^2} dx = \frac{l_2^3 - l_1^3}{3l_i l^2}.$$

Так как $\frac{l_2 + l_1}{2} = l_{oiB}$ и $l_2 - l_1 = l_i$, то

$$\overline{\left(\frac{x_B}{l} \right)^2} = \frac{1}{l^2} \left(l_{oiB}^2 + \frac{l_i^2}{12} \right).$$

Если пренебречь вторым членом в скобке вследствие его относительной малости и взять среднее значение квадрата эффективного поездного тока фидера по всем перегонам, то получим

$$I_{\phi A}^2 = \frac{1}{l^2 t_\phi} \sum_{i=1}^n I_{\phi i}^2 l_{oiB}^2 t_i. \quad (166)$$

Можно еще повысить точность расчетов, если брать среднее значение токов поездов за время хода их по участку с непрерывным потреблением энергии. Для этих условий формулы (165) и (166) останутся справедливыми, но входящие величины приобретают несколько иное значение. Так, вместо I_i и $I_{\phi i}^2$ надо брать эти средние значения за время хода по соответствующему участку непрерывного потребления энергии. Величина l_{oiB} будет обозначать также расстояние от подстанции B до середины i -го участка непрерывного потребления энергии; так же и t_i следует брать для такого же участка. В данном случае n — число участков непрерывного потребления энергии.

§ 45. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗКИ ПОДСТАНЦИЙ ПО НАГРУЗКАМ ФИДЕРОВ¹

Участки постоянного тока. Сложение эффективных нагрузок отдельных фидеров, строго говоря, не может быть произведено во всех случаях одним и тем же способом. Объясняется это тем, что поездные нагрузки фидеров, питающих различные пути, не зависят друг от друга, тогда как для одного и того же пути они находятся в некоторой зависимости. Дело в том, что вероятность появления того или иного числа поездов в зоне, питаемой одним фидером, зависит от того, какое количество поездов находится в это время на том же пути, но в зоне, питаемой другим фидером той же подстанции.

¹ § 45 написан совместно с М. Е. Крестьяновым.

Количество же поездов, находящихся на одном пути, не влияет на вероятность появления того или иного числа поездов на другом пути. Поэтому для обоих фидеров одного пути следует сразу определять суммарную нагрузку по формуле (155) или (156), подставляя значения n , I и I_0 , относящиеся ко всей подстанционной зоне.

Это соображение играет роль только при определении эффективных нагрузок, для средних же оно не имеет значения.

Обозначим эффективные и средние нагрузки от нечетного и четного путей соответственно через $I_{\text{эс I}}$, $I_{\text{эс II}}$ и $I_{\text{с I}}$, $I_{\text{с II}}$, где I и II — номера путей (рис. 163). Эффективная нагрузка подстанции может быть определена на основе указанной выше теоремы о среднем значении (математическом ожидании) квадрата суммы независимых величин, т. е.

$$I_{\text{эс}}^2 = (I_{\text{эс I}}^2 + I_{\text{эс II}}^2) + (I_{\text{с I}} + I_{\text{с II}})^2 - (I_{\text{с I}}^2 + I_{\text{с II}}^2) \quad (167)$$

и после преобразований будем иметь

$$I_{\text{эс}}^2 = I_{\text{эс I}}^2 + I_{\text{эс II}}^2 + 2I_{\text{с I}}I_{\text{с II}}. \quad (168)$$

Если уже известны эффективные и средние нагрузки фидеров, то без большой погрешности можно, пренебрегая указанной выше зависимостью, определять эффективную нагрузку подстанций пользуясь формулой

$$I_{\text{эс}}^2 = \sum_{k=1}^M I_{\text{эфк}}^2 + \left(\sum_{k=1}^M I_{\text{фк}} \right)^2 - \sum_{k=1}^M I_{\text{фк}}^2 \quad (168')$$

где $I_{\text{фк}}$ и $I_{\text{эфк}}$ — средний и эффективный токи фидера номера k ;
 M — число фидеров подстанции.

Для однопутного участка при строгом решении задачи следует устанавливать отдельно вероятность появления того или иного числа поездов как в четном, так и в нечетном направлении таким образом, чтобы их общее число не превышало заданного числа перегонов на участке. Однако, как показывают расчеты, с достаточной для практики точностью можно исходить из общего числа поездов обоих направлений.

Эффективная нагрузка фаз трехфазного трансформатора при несимметричной нагрузке на участках однофазного тока. Для схемы рис. 123, пользуясь выражениями (138) (см. § 26), легко получить квадраты эффективных значений фазовых токов трансформатора¹. Так как выражения (138) относятся к мгновен-

Рис. 163. Схема питания двухпутного участка от подстанции четырьмя фидерами

ной схеме нагрузок, отметим это здесь введением дополнительного индекса t и перейдем от мгновенных значений к средним.

Тогда:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{эс AB}}^2 = \overline{I_{\text{ABt}}^2} &= \frac{1}{9} [I_{\text{At}}^2 + I_{\text{Bt}}^2 - 2I_{\text{At}}I_{\text{Bt}}\cos(60^\circ - \varphi_{\text{At}} + \varphi_{\text{Bt}})]; \\ I_{\text{эс BC}}^2 = \overline{I_{\text{BCt}}^2} &= \frac{1}{9} [I_{\text{At}}^2 + 4I_{\text{Bt}}^2 - 4I_{\text{At}}I_{\text{Bt}}\cos(120^\circ + \varphi_{\text{At}} - \varphi_{\text{Bt}})]; \\ I_{\text{эс CA}}^2 = \overline{I_{\text{CAt}}^2} &= \frac{1}{9} [4I_{\text{At}}^2 + I_{\text{Bt}}^2 - 4I_{\text{At}}I_{\text{Bt}}\cos(120^\circ + \varphi_{\text{At}} - \varphi_{\text{Bt}})]. \end{aligned} \right\} \quad (169)$$

¹ Во избежание возможных неясностей условимся значение постоянного тока, эквивалентное по выделяемому количеству тепла синусоидально изменяющемуся переменному току как и в курсах теоретической электротехники, называть действующим значением переменного тока. Значение же постоянного тока, эквивалентного по выделяемому количеству тепла переменному току с изменяющимся действующим значением, называть эффективным током, как и выше при расчете системы энергоснабжения постоянного тока.

Строго говоря, величины I_A и I_B зависимы, но без большой погрешности можно в данном случае (из тех же соображений, которые были высказаны при выводе формул для постоянного тока) также принять их независимыми. Далее известно, что угол сдвига фаз между током данного электровазона и напряжением на его токоприемнике тесно связан со значением его тока. Однако, если поезд движется по фидерной зоне с одним и тем же током и одним и тем же углом сдвига фаз, то при двустороннем питании ток, приходящийся на данный фидер, все время изменяется, тогда как угол сдвига фаз остается постоянным. При движении же по фидерной зоне нескольких поездов они могут давать самые различные комбинации токов и углов сдвига фаз. В результате при одном и том же токе фидеров будут иметься различные углы сдвига фаз этого суммарного тока, и наоборот, при различных фидерных токах они могут иметь одинаковый угол сдвига фаз. Изложенные рассуждения позволяют считать углы сдвига фаз φ_{Ai} и φ_{Bi} не зависящими от токов I_{Ai} и I_{Bi} , а это в свою очередь позволяет заменить среднее значение произведения (второй член в квадратных скобках правой части формул) произведением средних значений. При этом среднее значение входящего в формулу косинуса суммы углов может быть найдено по средним значениям косинусов и синусов углов φ_A и φ_B .

Учтя все изложенное, можно написать:

$$\left. \begin{aligned} I_{sAB}^2 &= \frac{1}{9} [I_{sA}^2 + I_{sB}^2 - 2I_A I_B \cos_{cp} (60^\circ - \varphi_A + \varphi_B)]; \\ I_{sBC}^2 &= \frac{1}{9} [I_{sA}^2 + 4I_{sB}^2 - 4I_A I_B \cos_{cp} (120^\circ + \varphi_A - \varphi_B)]; \\ I_{sCA}^2 &= \frac{1}{9} [4I_{sA}^2 + I_{sB}^2 - 4I_A I_B \cos_{cp} (120^\circ + \varphi_A - \varphi_B)]. \end{aligned} \right\} \quad (169')$$

Аналогично могут быть использованы и выражения (139). Преобразовав их таким же путем, получим:

$$\left. \begin{aligned} I_{sAB}^2 &= \frac{1}{9} [I_{sA}^2 + I_{sB}^2 - 2I_A I_B]; \\ I_{sBC}^2 &= \frac{1}{9} [I_{sA}^2 + 4I_{sB}^2 + 2I_A I_B]; \\ I_{sCA}^2 &= \frac{1}{9} [4I_{sA}^2 + I_{sB}^2 + 2I_A I_B]; \end{aligned} \right\} \quad (170)$$

Определение средних и эффективных токов (I_A , I_B , I_{sA} и I_{sB}) можно вести при однопольных поездах по формулам (154) и (155) или (156), а при разнотипных поездах и переменных по длине зоны размерах движения по формулам § 46.

При выборе мощности трансформатора при несимметричной нагрузке можно учесть, что нагрузка на две наиболее загруженные фазы может быть несколько увеличена за счет недогрузки третьей фазы. Это увеличение нагрузки оценивается коэффициентом κ_n [21];

$$\kappa_n = \frac{I_I}{I_n} = \frac{1,525}{\sqrt{1 + 0,45 \left[1 + \left(\frac{I_{II}}{I_I} \right)^2 + \left(\frac{I_{III}}{I_I} \right)^2 \right]}} \quad (171)$$

где I_I — ток наиболее загруженной фазы (первичный или вторичный)
 I_{II} и I_{III} — соответственно токи двух других фаз.

§ 46. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ НАГРУЗКИ ПОДСТАНЦИЙ И ФИДЕРОВ ДЛЯ НАИБОЛЕЕ ОБЩЕГО СЛУЧАЯ

В наиболее общем случае в рассматриваемой зоне может располагаться несколько различных по длине и характеру перегонов, в результате чего время хода и характер потребления энергии на этих перегонах получаются различными.

Кроме того, в проектной практике часто приходится иметь дело со случаями, когда в рассматриваемой зоне (подстанционной или фидерной) обращаются поезда различного типа (категорий) и грузопоток по длине этих зон неодинаков, так как на некоторых промежуточных станциях он зарождается или эти станции являются конечным пунктом для грузовых или пассажирских поездов. Последнее условие не позволяет пользоваться формулами, построенными в предположении примерно равномерного потребления энергии вдоль всей зоны, т. е. условия, на котором построены выведенные выше формулы.

Тем более не могут дать точных результатов построенные на таких предположениях формулы для случаев, когда потребление энергии резко разнится на отдельных элементах профиля и особенно при рекуперации энергии.

В наиболее точных из предложенных ранее формул [13], т. е. наиболее полно учитывающих все факторы, влияющие на расчетные величины, токи поездов заменялись их средними значениями только в пределах тех участков, где не может быть более одного поезда (условно это расстояние именовалось перегонем), а колебание числа поездов учитывалось исходя из гипергеометрического закона распределения числа поездов в рассматриваемой зоне.

При этом учет неравномерности потребления энергии вдоль зоны и колебания числа поездов, одновременно находящихся в фидерной или подстанционной зоне, а также разнотипности поездов, привел к весьма громоздким формулам, трудным для практического пользования. Поэтому наибольшее применение получили упрощенные формулы.

Для упрощения их пришлось отказаться от учета неравномерности потребления поездом энергии, т. е. перейти к расчету по средним значениям токов поездов (и квадратов токов поездов) в рассматриваемых зонах (а не по перегонам). Кроме того, при переходе к упрощенным формулам принималось, что

$$\frac{N-1}{N_0-1} \approx \frac{N}{N_0}.$$

В § 42 показано, что такое допущение равносильно переходу от гипергеометрического распределения к биномиальному.

Здесь при выводе расчетных формул будем сразу учитывать неравномерность движения исходя из биномиального закона распределения (т. е. из предположения, что появление поезда на одном перегоне не отражается на вероятности появления его на другом). Расчетные формулы получаются значительно более простыми и для длительных периодов (т. е. когда $N \gg 1$) практически не менее точными, а приближенные формулы сохраняют тот же вид, что и раньше.

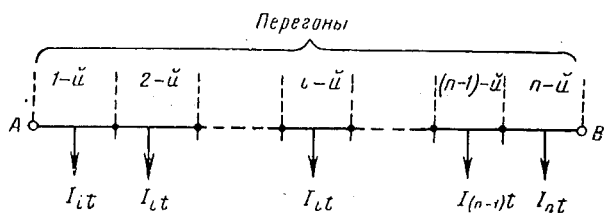


Рис. 164. Мгновенная схема расположения нагрузок на перегонах фидерной зоны

Для вывода расчетных формул примем, что в рассматриваемой зоне обращаются поезда разного типа, перегоны различной длины, кривые тока, потребляемого на перегонах одним и тем же поездом, неодинаковы и размеры движения на разных перегонах тоже различны (изменение грузопотока по длине фидерной зоны). При средствах сношения, позволяющих на одном перегоне иметь несколько поездов (например автоблокировка), под числом перегонов n будем понимать максимально возможное число поездов. Сначала сделаем вывод для простейшего случая — схемы одностороннего питания.

На рис. 164 показана мгновенная схема расположения нагрузок в рассматриваемой зоне (фидерной или подстанционной). Для этого момента времени ток фидера, питающего эту зону, равен

$$I_{\phi t} = \sum_{i=1}^n I_{it}$$

Квадрат эффективного тока фидера, очевидно, будет

$$I_{\phi\phi}^2 = \overline{I_{\phi t}^2} = \left(\overline{\sum_{i=1}^n I_{it}} \right)^2.$$

Если, как и прежде, принять, что ток на каком-либо перегоне не зависит от того, какой ток потребляется на другом перегоне, то можно к последнему выражению [как и при выводе формулы (155)] применить теорему о среднем значении (математическом ожидании) квадрата суммы независимых величин. Тогда

$$I_{\phi\phi}^2 = \sum_{i=1}^n I_{\phi i}^2 + \left(\sum_{i=1}^n I_i \right)^2 - \sum_{i=1}^n I_i^2. \quad (a)$$

Перейдем к определению величин $I_{\phi i}^2$ и I_i . За время T по перегону i пройдет в общем случае N различных поездов. Если бы изобразить на графике ток, потребляемый на перегоне i различными поездами за все время T , то этот график получил бы вид, показанный на рис. 165 (сплошные линии). На этом рисунке каждая такая часть кривой относится к различным поездам, проходящим последовательно данный перегон. Если все поезда, проходящие этот перегон за время T , перенумеровать, то мгновенное значение токов для поездов с номерами 1, ..., h , ... и N будет обозначено соответственно I_{i1} , I_{ih} и I_{iN} .

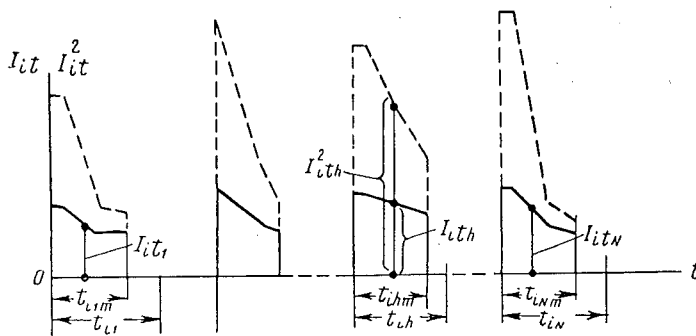


Рис. 165. К определению среднего и эффективного токов перегона

На этом же графике через t_{i1m} , t_{ihm} , t_{iNm} обозначены времена потребления энергии на перегоне i поездами с номерами 1, h и N , а через t_{i1} , t_{ih} и t_{iN} — времена их хода по этому перегону.

Для того чтобы получить значение $I_{\phi i}^2$, необходимо возвести в квадрат все ординаты токов (на графике рис. 165 показано пунктиром) и найти их среднее значение. В данном случае мы получим квадрат эффективного тока перегона:

$$I_{\phi i}^2 = \frac{\sum_{h=1}^N I_{\phi ih}^2 t_{ih}}{T}.$$

В этой формуле $I_{\phi ih}^2$ — квадрат эффективного тока поезда с номером h за время хода его по i -му перегону t_{ih} .

Так как согласно формуле (159)

$$I_{\phi ih}^2 = \kappa_{\phi ih}^2 \alpha_{ih} I_{ih}^2,$$

где $\kappa_{\phi ih} \alpha_{ih}$ — коэффициент эффективности поездного тока для поезда с номером h за время хода его по i -му перегону,

то

$$I_{si}^2 = \frac{1}{T} \sum_{h=1}^N \kappa_{sih}^2 \alpha_{ih} I_{ih}^2 t_{ih}.$$

Умножив и разделив числитель и знаменатель правой части этого равенства на величину $U^2 t_{ih}$, получим

$$I_{si}^2 = \frac{1}{TU^2} \sum_{h=1}^N \frac{\kappa_{sih}^2 \alpha_{ih} I_{ih}^2 U^2 t_{ih}^2}{t_{ih}}.$$

Но

$$I_{ih} U t_{ih} = A_{ih},$$

где A_{ih} — энергия, потребляемая на перегоне i поездом номер h , в $вт \cdot ч$,
 U — напряжение, при котором определяется расход энергии, в $в$.

Если принять (см. § 43)

$$\kappa_{sih}^2 \alpha_{ih} = 1,08 \frac{t_{ih}}{t_{ihm}},$$

то

$$I_{si}^2 = \frac{1,08}{TU^2} \sum_{h=1}^N \frac{A_{ih}^2}{t_{ihm}}.$$

Здесь t_{ihm} — время потребления энергии поездом с номером h на i -м перегоне.

Очевидно, средний ток перегона можно определить выражением

$$I_i = \frac{1}{T} \sum_{h=1}^N I_{ih} t_{ih}.$$

Проделав преобразования, аналогичные тем, которые были сделаны выше при определении эффективного тока перегона, и учтя, что

$$\sum_{h=1}^N A_{ih} = A_{Ti},$$

получим

$$I_i = \frac{A_{Ti}}{TU},$$

где A_{Ti} — энергия, потребляемая на перегоне i всеми поездами, проходящими этот перегон за время T , в $вт \cdot ч$.

Подставив найденные значения величин в выражение (а) и измеряя энергию в $квт \cdot ч$, получим

$$I_{sf}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \left[1,08 T \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^N \frac{A_{ih}^2}{t_{ihm}} + \left(\sum_{i=1}^n A_{Ti} \right)^2 - \sum_{i=1}^n A_{Ti}^2 \right]. \quad (172)$$

Так как

$$\sum_{i=1}^n A_{Ti} = A_T,$$

где A_T — энергия, потребляемая всеми поездами, проходящими рассматриваемую зону, в течение времени T ,

то

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \left[1,08 T \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^N \frac{A_{ih}^2}{t_{ihm}} + A_T^2 - \sum_{i=1}^n A_{Ti}^2 \right]. \quad (173)$$

Вместо суммы по всему числу поездов можно ввести суммирование по типам поездов. Если всего типов поездов V , а число поездов каждого типа N_p , где p — номер типа поезда, то вместо формулы (173) получим

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \left[1,08 T \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^V \frac{N_p A_{ip}^2}{t_{ipm}} + A_T^2 - \sum_{i=1}^n A_{Ti}^2 \right]. \quad (174)$$

Здесь A_{ip} — энергия, потребляемая одним поездом типа p на перегоне i ; t_{ipm} — время потребления энергии поездом типа p на перегоне i .

Если в рассматриваемой зоне применяется рекуперативное торможение, то заменив коэффициент эффективности поездного тока [см. выражение (а)] величиной в соответствии с формулой (160) при этих условиях, см. (160), получим вместо формулы (174)

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \left[1,08 T \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^V \frac{N_p (A_{ipm} + A_{ipa})^2}{t_{ipm} + t_{ipa}} + A_T^2 - \sum_{i=1}^n A_{Ti}^2 \right]. \quad (174')$$

В этой формуле A_{ipa} — энергия, рекупируемая поездом типа p на перегоне i , в $\text{квт} \cdot \text{ч}$;

t_{ipa} — время рекуперации энергии поездом типа p на перегоне i в ч .

Если число поездов, проходящих по отдельным перегонам фидерной зоны, неодинаково, то в общем случае величину N можно заменить на N_i . Практически же, так как число поездов, если и меняется вдоль зоны, не более одного раза, в первом члене правой части формул (173), (174) и (174') вместо суммы от $i=1$ до n надо взять две суммы: от $i=1$ до n_1 и от n_1 до n .

При двустороннем питании фидерной зоны все выведенные формулы остаются такими же, только в них надо произвести замену расходов энергии их составляющими, приходящимися на питающие подстанции A и B .

Таким образом в формулах (173), (174) и др. следует заменить A_{ih} соответственно на A_{ihA} или A_{ihB} ; A_i — на A_{iA} или A_{iB} и A_T на A_{TA} или A_{TB} .

Разложение расходов энергии между подстанциями выполняется принципиально так же, как и разложение токов (см. § 44).

Определение нагрузок подстанций удобнее всего производить, пользуясь указаниями § 45, т. е. определив предварительно нагрузки фидеров.

Формулы для случая однотипных поездов и приближенные формулы. Если в расчетах можно принять, что все поезда одного типа, а расход энергии на перегонах и время ее потребления не сильно разнятся, т. е. допустимо считать, что

$$A_{ih} = \frac{A_T}{Nn}$$

и

$$t_{ihm} = \frac{t_m}{n},$$

где t_m — время потребления энергии одним поездом за время хода по рассматриваемой зоне, то, используя формулу (173), получим для схемы одностороннего питания

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \left[1,08 T \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^N \frac{A_T^2}{N n^2 t_m} + A_T^2 - \sum_{i=1}^n \frac{A_T^2}{n^2} \right],$$

откуда

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[\frac{1,08 T}{t_m} \cdot \frac{1}{N} + 1 - \frac{1}{n} \right].$$

Если заменить $t_m = \frac{t}{\alpha}$ и $\frac{T}{t} = \frac{N_0}{n}$ и округлить $1,08 \approx 1,1$, то получим уже известную формулу [13]

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[1,1 \alpha \frac{N_0}{N n} + \frac{n-1}{n} \right], \quad (175)$$

или, заменив $n = \frac{t}{\theta}$, в ином виде

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{T}{N t_m} + \left(1 - \frac{\theta}{t} \right) \right]. \quad (175')$$

Чтобы распространить последнюю формулу и на случай разнотипных поездов, рассматривая ее, как приближенную, следует заменить t на $\frac{1}{N} \sum_{h=1}^N t_h$ и $t_m = \frac{1}{N} \sum_{h=1}^N t_{hm}$.

Тогда вместо формулы (175') получим

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm}} + \left(1 - \frac{\theta N}{\sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]. \quad (176)$$

Аналогичным путем может быть получена приближенная формула для однотипных поездов и подсобных друг другу перегонов при применении на участке рекуперативного торможения

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{N_0}{N n} \frac{t}{(t_m + t_z)} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{Tz})^2}{A_T^2} + \frac{n-1}{n} \right]. \quad (177)$$

Заменив в последней формуле $(t_m + t_z)$ на $\frac{1}{N} \sum_{h=1}^N (t_{hm} + t_{hz})$, можно получить по аналогии с формулой (176) приближенную формулу для разнотипных поездов и различных перегонов

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{T}{\sum_{h=1}^N (t_{hm} + t_{hz})} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{Tz})^2}{A_T^2} + \left(1 - \frac{\theta N}{\sum_{h=1}^N t_h} \right) \right] \quad (178)$$

При двустороннем питании участка при выводе приближенных формул вместо A_T надо ввести $\frac{A_T}{2}$, а за счет разложения тока между двумя подстанциями коэффициент $1,08$ заменить на $0,35$ [см. формулу (164')].

Тогда получим вместо формулы (175)

$$I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{4T^2 U^2} \left[1,4 \alpha \frac{N_0}{Nn} + \frac{n-1}{n} \right], \quad (179)$$

или по аналогии с формулой (176)

$$I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{4T^2 U^2} \left[1,4 \frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm}} + \left(1 - \frac{\theta N}{\sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]. \quad (180)$$

По аналогии с формулой (177) можно написать выражение для однотипных поездов и подобных друг другу перегонов при рекуперации энергии

$$I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{4T^2 U^2} \left[1,4 \frac{N_0}{Nn} \frac{t}{(t_m + t_s)} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{Ts})^2}{A_T^2} + \frac{n-1}{n} \right]. \quad (181)$$

По аналогии с формулой (178), получим приближенную формулу для разнотипных поездов и различных перегонов

$$I_{эф}^2 = \frac{A_T^2}{T^2 U^2} \left[1,4 \frac{T}{\sum_{h=1}^N (t_{hm} + t_{hs})} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{Ts})^2}{A_T^2} + \left(1 - \frac{\theta N}{\sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]. \quad (182)$$

Заменяя, как и в формуле (175'), $n = \frac{t}{\theta}$ и $N_0 \theta = T$, получим вместо формул (177), (179) и (181), приведенных в табл. 16 и 17, формулы (177'), (179') и (181'). Пользуясь любыми из этих формул, можно с помощью формулы (168) (§ 45) найти нагрузку подстанции. Средняя нагрузка фидера определяется выражением

$$I_\phi = \frac{A_T}{TU} 10^3.$$

Часто эффективный ток фидера определяют при помощи так называемого коэффициента эффективности κ_ϕ из выражения

$$\kappa_{эф}^2 = \frac{I_{эф}^2}{I_\phi^2} \quad (183)$$

Легко видеть, что $\kappa_{эф}^2$ равен величине, заключенной в квадратные скобки в формулах (175) — (182). В табл. 18 и 19 вместо формул для определения эффективных токов фидеров даны формулы для непосредственного определения эффективного тока подстанции. Эти формулы легко получаются, если в выражение (168) подставить значения токов фидеров из формул (176), (178), (180) и (182) для числа путей S . Если в формулы (176'), (178'), (180') и (182'), приведенные в табл. 18 и 19, подставить $S = 1$ и t_h взять за время хода по фидерной зоне, то получим формулы (176), (178), (180) и (182). Так как средняя нагрузка подстанции равна

$$I_c = \frac{A_T}{TU} 10^3,$$

где A_T — расход энергии в $квт \cdot ч$ во всей подстанционной зоне, то аналогично приведенным выше соображениям можно считать, что выражение, заключен-

ное в квадратной скобке в формулах (176'), (178'), (180') и (182') (см. табл. 18 и 19), представляет собой коэффициент эффективности нагрузки подстанций

$$K_{\text{эв}} = \frac{I_{\text{эв}}^2}{I_c^2} \quad (183')$$

§ 47. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ И ЭФФЕКТИВНЫХ НАГРУЗОК ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ИХ ШИНАХ¹

Ранее, в § 23, был рассмотрен метод расчета мгновенных нагрузок подстанций с учетом изменения напряжения на их шинах. Когда имеются графики нагрузок подстанций, определенных без учета их характеристик, полученные формулы могут быть непосредственно использованы для перестройки этих графиков.

Однако, когда расчет ведется методами, основанными на заданных размерах движения, таких графиков нет, и возникает необходимость определения средних и эффективных нагрузок подстанций с учетом изменяющегося режима напряжения на шинах подстанций по тем же величинам, но найденным без такого учета. Так как средние значения нагрузок подстанций линейно связаны с их мгновенными значениями, то, очевидно, приведенные выше формулы (113), (119) и (120) могут быть также использованы и для определения средних значений нагрузок. В этом случае под величинами I_{0x} , I_{0x-1} и I_{0x+1} следует понимать уже не мгновенные, а средние значения нагрузок соответствующих подстанций, найденные без учета их внешних характеристик.

Перейдем теперь к определению эффективных значений нагрузок подстанций, считая, что напряжения холостого хода всех подстанций равны. В соответствии с формулами (113), (119) и (120) мгновенное значение нагрузки подстанции x в общем случае может быть записано в виде

$$I_{xt} = B_x I_{0xt} + C_x I_{0x-1t} + D_x I_{0x+1t}.$$

Тогда квадрат эффективного значения нагрузки подстанции x будет равен

$$I_{\text{э}x}^2 = \overline{I_{xt}^2} = \overline{(B_x I_{0xt} + C_x I_{0x-1t} + D_x I_{0x+1t})^2}.$$

Строго говоря, величины I_{0xt} , I_{0x-1t} , I_{0x+1t} зависимые, так как они определяются числом поездов в различных фидерных зонах. Однако эта зависимость весьма мало отражается на результатах расчета нагрузок подстанций, поэтому без существенной ошибки можно упростить задачу, считая эти величины независимыми. Тогда, исходя из последнего выражения, можно написать:

$$I_{\text{э}x}^2 = (B_x I_{0x} + C_x I_{0x-1} + D_x I_{0x+1})^2 + B_x^2 (I_{\text{э}0x}^2 - I_{0x}^2) + \\ + C_x^2 (I_{\text{э}0x-1}^2 - I_{0x-1}^2) + D_x^2 (I_{\text{э}0x+1}^2 - I_{0x+1}^2),$$

или

$$I_{\text{э}x}^2 = B_x^2 I_{\text{э}0x}^2 + C_x^2 I_{\text{э}0x-1}^2 + D_x^2 I_{\text{э}0x+1}^2 + 2(B_x C_x I_{0x} I_{0x-1} + \\ + B_x D_x I_{0x} I_{0x+1} + C_x D_x I_{0x-1} I_{0x+1}). \quad (184)$$

Здесь I_{0x} , I_{0x-1} и I_{0x+1} представляют средние, а $I_{\text{э}0x}$, $I_{\text{э}0x-1}$ и $I_{\text{э}0x+1}$ — эффективные нагрузки соответствующих подстанций, определенные без учета изменения напряжения на их шинах.

Коэффициенты B_x , C_x , D_x и т. д. определяются совершенно так же, как показано в § 23.

¹ § 47 написан Г. Г. Марквардтом.

§ 48. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Система постоянного тока. Рассмотрим схему участка, питаемого с двух сторон, имеющего n не равных по длине и времени хода (неидентичных) перегонов с рядом сосредоточенных нагрузок (рис. 166). Все перегоны перенумерованы от 1 до n . Токам поездов, расположенных на них, присвоен тот же номер. Эти токи могут меняться в соответствии с действительным потреблением тока в различных точках перегона и в зависимости от типа поезда, проходящего этот перегон. В отдельные моменты времени эти нагрузки могут быть равны нулю вследствие того, что поезд в данной точке перегона не потребляет ток или поезд на перегоне отсутствует.

Через l_{1t} , l_{2t} , l_{it} , $l_{(n-1)t}$ и l_{nt} обозначены расстояния от подстанции А до нагрузок, расположенных на перегонах в рассматриваемый момент времени.

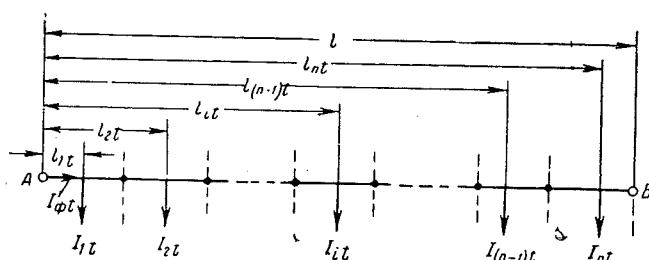


Рис. 166. Мгновенная схема расположения нагрузок по перегонам фидерной зоны

Как известно (см. § 24), потеря мощности в контактной сети равна сумме произведений из величин нагрузок на потери напряжения до них, т. е.

$$\Delta P_t = \sum_{i=1}^n \Delta U_{it} I_{it}.$$

Потеря напряжения в сети до поезда может быть представлена в виде суммы

$$\Delta U_{it} = \Delta U'_{it} + \Delta U''_{it},$$

где $\Delta U'_{it}$ — составляющая потери напряжения в сети до поезда, вызванная током этого поезда;

$\Delta U''_{it}$ — составляющая потери напряжения до этого же поезда, вызванная токами остальных поездов, находящихся в рассматриваемой зоне.

Для схемы двустороннего питания

$$\Delta U'_{it} = r I_{it} l_{it} \frac{(l - l_{it})}{l}.$$

Величина $\Delta U''_{it}$ представляет собой сумму потерь напряжения в сети до поезда, находящегося на i -м перегоне, от токов всех поездов, кроме i -го, т. е.

$$\Delta U''_{it} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Delta U'_{jt}.$$

Потеря напряжения от тока I_{jt} , находящегося правее перегона i , до нагрузки на перегоне i , равна

$$\Delta U'_{ijt} = r I_{jt} l_{it} \frac{(l - l_{jt})}{l}.$$

Та же величина, но от нагрузки I_{jt} , находящейся левее перегона i , будет

$$\Delta U_{it}^* = r I_{jt} l_{jt} \frac{l - l_{it}}{l}.$$

Используя полученные значения составляющих потерь напряжения, можно выражение потерь мощности представить в виде:

$$\Delta P_t = r \left[\sum_{i=1}^n I_{it}^2 l_{it} \left(1 - \frac{l_{it}}{l} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n I_{it} I_{jt} l_{it} \left(1 - \frac{l_{jt}}{l} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} I_{it} I_{jt} l_{jt} \left(1 - \frac{l_{it}}{l} \right) \right].$$

Выражения, стоящие под двойным знаком суммы, дают произведение тока I_{it} на падение напряжения, вызванное током I_{jt} в сети до нагрузки I_{it} . Равным образом это выражение может представлять собой произведение тока I_{jt} на потерю напряжения, вызванную током I_{it} в сети до нагрузки I_{jt} .

Таким образом, как второй, так и третий члены последнего выражения, давая всевозможные комбинации расположения двух поездов, равны друг другу. Поэтому

$$\Delta P_t = r \left[\sum_{i=1}^n I_{it}^2 l_{it} \left(1 - \frac{l_{it}}{l} \right) + 2 \sum_{i=1}^n I_{it} l_{it} \sum_{j=i+1}^n I_{jt} \left(1 - \frac{l_{jt}}{l} \right) \right].$$

Для того чтобы перейти к среднему значению ΔP_t за некоторый период T (обычно за сутки), найдем среднее значение последнего выражения. Как и раньше, используем положение, что среднее значение суммы равно сумме средних значений, и напомним

$$\Delta P = \Delta \bar{P}_t = r \left[\overline{\sum_{i=1}^n I_{it}^2 l_{it} \left(1 - \frac{l_{it}}{l} \right)} + 2 \overline{\sum_{i=1}^n I_{it} l_{it} \sum_{j=i+1}^n I_{jt} \left(1 - \frac{l_{jt}}{l} \right)} \right]. \quad (a)$$

Разберем каждое слагаемое правой части.

I_{it}^2 — квадрат мгновенного значения тока некоторого поезда на перегоне номер i в момент t , а l_{it} — координата этого тока. Строго говоря, эти величины зависимы, т. е. для них среднее значение произведения не равно произведению средних значений.

Точное определение среднего значения произведения $I_{it}^2 l_{it} \left(1 - \frac{l_{it}}{l} \right)$ может быть сделано, если имеется тяговый расчет (или кривые, полученные на основе опытных поездок), только путем графического интегрирования для каждого отдельного типа поезда. Если же таких данных нет, то остается путь приближенного решения.

В практике кривая действительного потребления тока всегда отличается от полученной из тяговых расчетов. Это объясняется некоторыми особенностями в способе ведения поезда различными машинистами, различием метеорологических условий, некоторым различием в весе поездов данного типа и, наконец, переменным уровнем напряжения. Поэтому наиболее достоверными факторами, определяющими нагрузку, приходящуюся на систему энергоснабжения, являются расход энергии на отдельных элементах профиля и координаты этих элементов профиля относительно подстанций.

Исследования показывают, что достаточную степень точности дают расчеты по расходам энергии на перегонах. Характер профиля на перегоне i следует при этом оценивать отношением времени хода по этому перегону ко времени потребления на нем энергии $\left(\frac{t_i}{t_{im}} = \alpha_i\right)$ и координатой нагрузки, взятой в центре тяжести площадей потребления энергии на данном перегоне от всех поездов.

Исходя из этих соображений, можно среднее значение упомянутых выше произведений заменить произведением средних значений, т. е. принять, что

$$\overline{I_{it}^2 l_{it}} \left(1 - \frac{l_{it}}{l}\right) = \overline{I_{it}^2} \overline{l_{it}} \left(1 - \frac{l_{it}}{l}\right).$$

Вместо l_{it} , не внося сколько-нибудь ощутимой погрешности, введем его среднее значение l_{0i} , понимая под ним расстояние от подстанции до центра тяжести площади, определяющей расход энергии на перегоне i . Это условно показано на рис. 167.

В § 46 было дано выражение для эффективного тока перегона с номером i

$$I_{gi}^2 = \frac{1}{TU^2} \sum_{h=1}^N 1,08 \frac{A_{ih}^2}{t_{ihm}},$$

где A_{ih} в $вт \cdot ч$, и, следовательно, первый член правой части равенства (а) получит вид:

$$\sum_{i=1}^n \overline{I_{it}^2 l_{it}} \left(1 - \frac{l_{it}}{l}\right) = \frac{1}{TU^2} \sum_{i=1}^n l_{0i} \left(1 - \frac{l_{0i}}{l}\right) \sum_{h=1}^N 1,08 \frac{A_{ih}^2}{t_{ihm}}.$$

Перейдем ко второму слагаемому правой части выражения (а).

Строго говоря, эта сумма произведений в некоторой степени зависит от тока I_{it} на i -м перегоне. Это можно объяснить тем, что если определенный поезд находится на перегоне i , то он уже не может находиться на других перегонах, и определять среднее значение этой суммы надо в зависимости от того, какой поезд находится на i -м перегоне.

Как уже отмечалось, учет этой зависимости возможен [13]. Однако, как показывают расчеты, отказ от учета этой зависимости при определении потерь энергии за достаточно длительный период (сутки и более) дает ничтожную погрешность. Поэтому примем, что токи на различных перегонах не зависят друг от друга. Выше мы привели соображения, позволяющие считать независимыми величины I_{it} и l_{it} . Исходя из всего изложенного, можно написать:

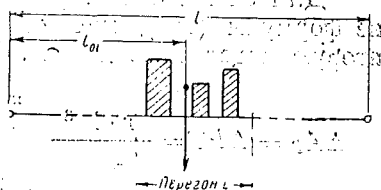


Рис. 167. К определению потерь энергии в контактной сети фидерной зоны

$$\sum_{i=1}^n \overline{I_{it} l_{it}} \sum_{j=i+1}^n \overline{I_{jt}} \left(1 - \frac{l_{jt}}{l}\right) = \sum_{i=1}^n \overline{I_{it}} \overline{l_{it}} \sum_{j=i+1}^n \overline{I_{jt}} \left(1 - \frac{l_{jt}}{l}\right).$$

Воспользуемся значениями среднего тока поезда на перегоне i (см. § 46), т. е.:

$$I_i = \overline{I_{it}} = \frac{A_{Ti}}{TU},$$

$$I_j = \overline{I_{jt}} = \frac{A_{Tj}}{TU},$$

чих равных условиях, время хода по этому перегону, т. е. минимальное значение интервала попутного следования; следовательно, уровень напряжения при режиме работы участка при пропуске поездов пакетом определяет поперечную пропускную способность участка, т. е. один из главных показателей работы данной линии.

Определение уровня напряжения при этом режиме даст возможность подсчитать, в частности, длительность пакетов поездов, возникающих после перерыва в движении (см. § 18). Если для таких режимов установлена норма минимального уровня напряжения, то, учтя отклонение напряжения на шинах подстанции, можно сопоставить эту величину с нормой и сделать соответствующие заключения.

При решении этой задачи возникают следующие вопросы:

- 1) какие типы поездов принимать в расчет при таком режиме движения;
- 2) какое количество поездов одновременно может находиться в фидерной зоне;
- 3) как при этом располагать поезда на перегонах.

Рассмотрим эти вопросы по порядку.

Обычно такие расчеты ведутся исходя из одного и того же типа поезда для каждого направления, так как пропуск отдельных, более тяжелых или легких поездов мало влияет на величину пропускной способности. При необходимости, как это будет показано ниже, можно учесть изменения уровня напряжения при пропуске по рассматриваемому перегону поезда, отличного по типу от других поездов в данной зоне.

Количество поездов в фидерной зоне при минимальном интервале θ между ними должно определяться для безостановочных поездов по формуле (145), т. е.

$$n = \frac{t}{\theta}.$$

В общем случае, т. е. если время хода по отдельным перегонам различно (перегоны неидентичны), число n меньше числа перегонов. Это означает, что при рассматриваемом режиме движения часть времени перегоны с меньшим временем хода остаются свободными.

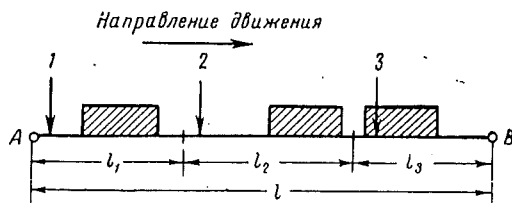


Рис. 168. Расположение участков потребления энергии на различных перегонах

яется одностороннее движение поездов (например, от А к В).

В этом примере периоды потребления энергии трех одновременно движущихся поездов не совпадают целиком или частично. Это существенным образом влияет на величину потери напряжения в сети до какого-либо поезда за время потребления им энергии на рассматриваемом (обычно лимитирующем) перегоне.

Если задача ставится таким образом, т. е. имеются в распоряжении кривые потребления тока и жесткий график движения, то наиболее точным оказывается метод расчета, основанный на анализе графика движения, причем достаточную точность и наибольшую простоту расчета в этом случае дают приближенные способы.

В этом случае можно пользоваться также и расчетными формулами, приводимыми ниже, но только действительные расходы энергии поездов необходимо заменить меньшими, соответствующими времени, в течение которого периоды потребления энергии совпадают с периодом потребления энергии поезда, до которого определяется потеря напряжения в сети.

В случае если таких кривых потребления тока не имеется или они не имеют резких изменений по всей длине перегона, или вообще в расчете можно удовлетвориться приближенными значениями, то при равных временах хода по перегонам пренебрегают несовпадениями периодов потребления энергии различными поездами.

Сюда же следует отнести случаи, когда при неидентичных перегонах поезда следуют с остановками и нельзя заранее предусмотреть моменты совпадения или несовпадения потребления энергии поездами на различных перегонах.

В соответствии с изложенным мы ниже будем характеризовать каждый перегон расходом энергии на нем поездом определенного расчетного типа.

И, наконец, если поезда идут без остановок по неидентичным перегонам, то при расчете по предлагаемым формулам необходимо учесть следующее. Во время хода поезда по интересующему нас перегону на другом перегоне (с меньшим временем хода) поезд будет находиться не все время, что уменьшит его влияние на величину потери напряжения. При выводе формул это обстоятельство будет учтено.

Рассмотренный режим движения может возникать в результате ликвидации скопления поездов, вызванного какими-либо нарушениями нормального, относительно равномерного пропуска поездов по часам суток.

В эти периоды времени некоторое понижение уровня напряжения и, следовательно, скорости движения поездов, если работа при таких пониженных уровнях напряжения будет возникать весьма редко, может и не иметь столь решающего значения, чтобы имело смысл идти на вложения дополнительных средств для повышения скорости движения. Если же и в условиях нормальной эксплуатации будут часто возникать такие режимы движения, а это возможно на линиях с высокой степенью использования пропускной способности, то может возникнуть необходимость в изыскании средств для повышения скорости движения поездов.

Таким образом, возникает необходимость в установлении вероятностей возникновения тех или иных отклонений напряжения в условиях нормальной эксплуатации.

Располагая такими сведениями, можно установить процент (долю) случаев понижения уровня напряжения, с которым уже можно не считаться, т. е. вследствие малого числа таких случаев (весьма редкого их появления) допускать понижение напряжения.

При решении этой задачи возникают те же три вопроса: какие типы поездов брать в расчет, какое количество поездов принимать в зоне и, наконец, как располагать их для расчетов.

При строгом решении задачи все эти три вопроса должны рассматриваться совместно, а в результате решения задачи следовало бы получить закон распределения среднего значения уровня напряжения у интересующего нас поезда за время потребления им энергии на рассматриваемом перегоне. Эта задача, представляющая большую сложность, в принципе могла бы быть решена в два приема. В первую очередь следовало бы установить вероятность появления m поездов в n нитях, а затем рассмотреть вероятность их расположения, и, следовательно, потребления того или иного тока.

Первая часть не вызывает трудностей и может быть решена при помощи формулы (146) или (147). Основную трудность представляет вторая половина задачи.

В данной задаче условия отличны от тех, которые приняты при выводе формул (146) и (147), так как мы рассматриваем случай, когда на заданном перегоне с номером i (для которого определяется потеря напряжения) расположен поезд и дело сводится уже к определению вероятности появления на той же фидерной зоне, т. е. на оставшихся $n-1$ нитках графика движения, числа поездов $m-1$, которое с исследуемым вместе составит m поездов.

В этом случае мы будем иметь уже не N поездов, а $N-1$, не N_0 , а N_0-1 ниток, не n свободных ниток, а $n-1$.

Следовательно, теперь вероятность появления m поездов в n нитках при

условии, что одна нитка занята поездом, согласно формуле (146) получит вид:

$$p_1(m) = \frac{C_{n-1}^{m-1} C_{N_0-n}^{N-m}}{C_{N_0-1}^{N-1}}$$

или по формуле (147)

$$p(m) = C_{n-1}^{m-1} \left(\frac{N}{N_0} \right)^{m-1} \left(\frac{N_0-N}{N_0} \right)^{n-m}.$$

Здесь мы рассматривали случай однотипных поездов, но эта задача при некотором усложнении расчета решается и для любого сочетания разнотипных поездов [13].

Однако для первого приближения можно и в таком случае ограничиться предположением, что все поезда одного типа. Это несколько увеличит вероятность появления m выбранного типа поездов, т. е. на самом деле вероятность будет ниже и, следовательно, расчет будет проведен с запасом.

Что касается величин нагрузок, потребляемых $m-1$ поездами, то ясно, что при одном и том же числе поездов значение этих нагрузок, а следовательно, и средней потери напряжения ΔU_{cpi} у поезда на перегоне i могут быть различными.

Для первого приближения ограничимся тем, что все остальные поезда будем оценивать по потребляемой ими энергии на отдельных перегонах и по времени хода.

Практически нас будет интересовать вероятность того, что понижение напряжения превзойдет некоторую определенную величину.

Если считать, что понижение напряжения будет непосредственно связано с числом поездов, то, задавшись некоторым числом поездов m , мы должны будем установить вероятность не только $m-1$ поезда в $n-1$ нитях, но и вероятность расположения любого другого числа поездов, большего $m-1$ в тех же $n-1$ нитях, так как каждое новое число поездов, большее $m-1$, будет давать еще большее понижение напряжения.

Таким образом, вероятность того, что понижение напряжения будет равно

или больше соответствующего m поездам в зоне определится, как $\sum_{m'=m-1}^{n-1} p(m')$,

где m' — число поездов в $n-1$ нитях.

§ 50. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ НАПЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В качестве наиболее общего случая при выводе формул для определения потери напряжения можно принять многопутный участок; провода контактной сети путей которого соединены в ту или иную схему. При этом на каждом из путей рассматриваемого участка может находиться некоторое количество поездов. Потеря напряжения в контактной сети до любого поезда зависит от токов всех поездов и их расположения на участке. Однако, так как потеря напряжения является линейной функцией тока, то при определении потери напряжения может быть использован принцип наложения. Это значит, что потеря напряжения в любой точке контактной сети от токов всех поездов в этой зоне может быть найдена как сумма потерь напряжения в этой точке от тока каждого поезда в отдельности. Исходя из этого потерю напряжения в данный момент в сети до поезда с номером k можно представить в виде суммы трех слагаемых

$$\Delta U_{kt} = \Delta U'_{kt} + \Delta U''_{kt} + \Delta U'''_{kt}, \quad (191)$$

где ΔU_{kt} — мгновенное значение потери напряжения в сети до поезда с номером k ;

$\Delta U'_{kt}$ — составляющая мгновенного значения потери напряжения в сети до поезда k , вызванная его током;

$\Delta U_{kt}''$ — составляющая мгновенного значения потери напряжения в сети до поезда k , вызванная токами остальных поездов этого же пути;
 $\Delta U_{kt}'''$ — составляющая мгновенного значения потери напряжения в сети до поезда k , вызванная токами поездов на всех остальных путях (т. е. за исключением пути, на котором находится поезд k).

Соответственно и для средних значений за некоторое время будем иметь

$$\Delta U_k = \Delta U_k' + \Delta U_k'' + \Delta U_k''' \quad (192)$$

Прежде чем приступить к выводу расчетных формул для определения средней потери напряжения в сети до поезда, необходимо уяснить, каким образом на рассматриваемом участке железнодорожной линии могут располагаться нагрузки, определяющие эту величину.

Наиболее общей является задача определения средней потери напряжения в сети до поезда за время его хода между некоторыми двумя точками F и D (рис. 169) на одном из путей заданного многопутного участка, с учетом соединения между собой проводов различных путей.

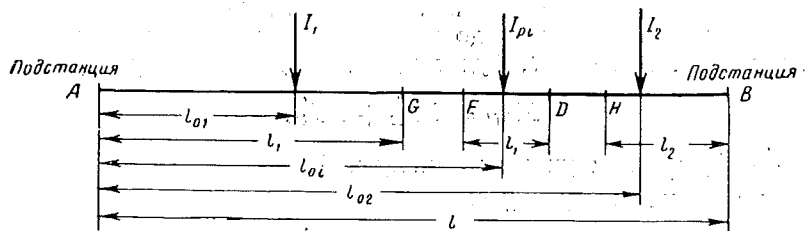


Рис. 169. К определению потерь напряжения в сети до поезда на i -м перегоне или блок-участке

В случае если рассматривается участок, организация движения на котором осуществляется только при помощи деления отдельными пунктами, между каждыми двумя соседними отдельными пунктами может находиться не более одного поезда. В этом случае точки F и D являются границами перегона, в любой точке которого может располагаться интересующий нас поезд. Одновременно участки AF и BD будут участками, на которых по первому пути могут располагаться все остальные поезда этого же пути. Таким образом, нагрузка от поезда k , до которого будет определяться потеря напряжения, может лежать только внутри интервала FD , а остальные нагрузки этого же пути — в любой точке за пределами этого интервала. Нагрузки же на остальных путях могут располагаться относительно поезда k как угодно на всей длине участка.

Если участки между отдельными пунктами сами делятся на части, например при введении автоблокировки на блок-участки, то между блок-участками, на которых располагаются смежные поезда, должно быть не менее определенного расстояния (одного или нескольких блок-участков). Тогда при одностороннем движении в зависимости от поставленной задачи приходится определять среднюю потерю напряжения или на отдельном блок-участке, или на всем перегоне FD .

В первом случае, если границами блок-участка опять-таки будут точки F и D , то остальные нагрузки будут лежать левее G и правее H , например на участках AG и HB .

Если не весь блок-участок проходит по автоматической характеристике, под участком FD следует понимать ту часть блок-участка, которая проходит по автоматической характеристике.

При двустороннем движении по одному пути, как известно, автоблокировка может дать увеличение пропускной способности только при пакетном движении поездов. При этом расположение поездов подчиняется тем же

законам, что и при одностороннем движении и, следовательно, потеря напряжения должна определяться и на отдельных блок-участках. При обычном же параллельном графике следует рассматривать потерю напряжения на отдельных перегонах.

Поставленные задачи можно решать для любого соотношения расстояний GF , FD и DH . При определении $\Delta U'_k$ необходимо будет рассматривать движение поезда по участку FD , при определении $\Delta U''_k$ — движение поездов на участках AG и HB (или AF и BD) и, наконец, при определении $\Delta U'''_k$ следует рассматривать движение поездов по всему участку AB .

Если определяется средняя потеря напряжения в сети до поезда k за время его хода по рассматриваемому перегону, то следует учитывать, что другой поезд, следующий по этому же пути, не может занимать этого перегона или соответствующих блок-участков. Каждый из остальных поездов, как бы они ни были расположены относительно друг друга, также должен занимать отдельный перегон или соответствующий блок-участок.

Однопутные участки. В качестве расчетной схемы примем ту же, что и при определении потерь энергии (см. рис. 166), т. е. схему линии, питаемой с двух сторон и с числом перегонов, равным n .

Потеря напряжения в сети до поезда с током I_{it} , располагающегося на перегоне в момент времени t , будет равна согласно формуле (191)

$$\Delta U_{it} = \Delta U'_{it} + \Delta U''_{it}. \quad (a)$$

Здесь $\Delta U'''_{it} = 0$, так как участок однопутный.

Согласно полученному в § 48

$$\Delta U'_{it} = r I_{it} l_{it} \left(\frac{l - l_{it}}{l} \right)$$

и

$$\Delta U''_{it} = \sum_{j=1}^n \Delta U''_{ijt} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta U''_{ijt} + \sum_{j=i+1}^n \Delta U''_{ijt}. \quad (б)$$

В свою очередь для поездов, располагающихся левее перегона i ,

$$\Delta U''_{ijt} = r I_{jt} l_{jt} \left(\frac{l - l_{it}}{l} \right) \quad (в)$$

и для поездов правее перегона i

$$\Delta U''_{ijt} = r I_{jt} l_{it} \left(\frac{l - l_{jt}}{l} \right). \quad (г)$$

Перейдем к среднему значению ΔU_{it} , учтя все соображения, изложенные при этом в предыдущем параграфе.

Очевидно, что среднее значение потери напряжения будет

$$\Delta U_i = \overline{\Delta U_{it}} = \overline{\Delta U'_{it}} + \overline{\Delta U''_{it}},$$

или

$$\Delta U_i = \Delta U'_i + \Delta U''_i. \quad (д)$$

Поскольку нас интересует среднее значение потери напряжения у поезда с током I_{it} за время хода его по автоматической характеристике, мы будем брать среднее значение ΔU_{it} за это время. Оно меньше времени t_{im} на время реостатного пуска.

Среднее значение l_{it} будет представлять собой расстояние до центра тяжести площади кривой потребления тока на перегоне i без учета площади, соответствующей времени реостатного пуска, обозначим его l_{0ia} . Здесь с достаточной точностью можно принимать $l_{0ia} = l_{0i}$.

Таким образом, среднее значение $\Delta U'_{it}$ может быть представлено в виде:

$$\Delta U'_i = r I_{im} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right).$$

Перейдем к остальным поездом.

В общем случае на перегоне j поезд типа p потребляет ток в течение времени t_{jpm} , а проходит этот перегон за время t_{jp} .

Среднее значение тока за время его потребления будет равно I_{jpm} и соответственно координата этого тока (расстояния от подстанции A до центра тяжести площади, образуемой кривой потребления этого тока) будет l_{oj} . Но если мы не располагаем данными о точном расположении кривой тока, т. е. не можем предсказать совпадения потребления токов на перегонах i и j , то надо учесть вероятность потребления тока на перегоне j . Она будет равна $\frac{t_{jpm}}{t_{jp}}$.

Следовательно, в расчет нужно ввести величину $I_{jpm} \frac{t_{jpm}}{t_{jp}}$, а это есть среднее значение тока I_{jt} уже не за время потребления энергии, а за все время хода поезда по перегону j , т. е.

$$I_{jp} = I_{jpm} \frac{t_{jpm}}{t_{jp}}.$$

Исключение представит случай движения поездов с минимальным интервалом попутного следования при наличии кривых тягового тока. При этом можно в расчет ввести среднее значение тока поезда j за время, совпадающее со временем потребления тока на перегоне i .

Перейдя к средним значениям тока на перегоне j — I_j , получим вместо формулы (в)

$$\Delta U''_{ij} = r I_j l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right)$$

и вместо формулы (г)

$$\Delta U''_{ij} = r I_j l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right).$$

Подставив найденные значения составляющих в формулу (д), получим

$$\begin{aligned} \Delta U_i = r \left[I_{im} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{j=1}^{i-1} I_j l_{oj} + \right. \\ \left. + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n I_j \left(1 - \frac{l_{oj}}{l} \right) \right]. \end{aligned} \quad (e)$$

Выразим значения токов I_{im} и I_j через соответствующие расходы энергии. Тогда

$$\Delta U'_i = \frac{r A_{idm}}{U t_{idm}} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) 10^3,$$

где A_{idm} — расход энергии на движение расчетного поезда типа d на перегоне i по автоматической характеристике (т. е. без учета энергии, затрачиваемой во время разгона под реостатами) в $квт \cdot ч$;

t_{idm} — время, в течение которого эта энергия потребляется, в $ч$.

Переход для $\Delta U'_j$ от средних токов к расходам энергии на перегонах зависит от поставленной задачи и исходных данных.

В общем случае будем считать, что в интересующей нас фидерной зоне находится m поездов ($m < n$, где n — максимально возможное число поездов или число перегонов).

Так как один поезд занимает i -й перегон, в остальных $n - 1$ перегонах размещается $m - 1$ поездов типа p . Зная это число поездов, время хода

их по всем остальным перегонам (кроме i -го) $t - t_i$ и время хода по каждому перегону t_j , можно найти среднее расчетное число поездов на каждом отдельном перегоне. Оно будет равно

$$(m-1) \frac{t_j}{t - t_i}.$$

Тогда средний ток перегона I_j можно выразить через A_{jp} , расход энергии, потребляемой поездом типа p на перегоне j ,

$$I_j = \frac{A_{jp}}{U t_j} (m-1) \frac{t_j}{t - t_i} 10^3,$$

или

$$I_j = \frac{(m-1) A_{jp}}{U (t - t_i)} 10^3.$$

Подставив в выражение (е) найденные значения входящих величин, получим среднюю потерю напряжения в сети до поезда типа d на i -м перегоне за время потребления им энергии при m поездах в фидерной зоне

$$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \frac{m-1}{t - t_i} \left[\left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{j=1}^{i-1} A_{jp} l_{oj} + \right. \right. \\ \left. \left. + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{jp} \left(1 - \frac{l_{oj}}{l} \right) \right] \right\}, \quad (193)$$

В частном случае, когда все перегоны равны друг другу по длине, времени хода и расходу энергии от каждого поезда и поезда однопотипны, можно средний ток слева от перегона i представить через расход энергии поезда на всей зоне A_p в виде (см. рис. 169):

$$I_1 = \frac{A_p (m-1)}{U t} \cdot \frac{l_1}{l} 10^3$$

и справа от перегона

$$I_2 = \frac{A_p (m-1)}{U t} \cdot \frac{l_2}{l} 10^3.$$

(Если потеря напряжения определяется не для всего перегона, а для одного блок-участка, то l_i и соответственно l_{oi} берутся для отрезка между точками F и D , см. рис. 169.)

Тогда от нагрузок, лежащих слева от перегона,

$$\Delta U_{i1}'' = \frac{r A_p (m-1) l_1^2}{2 U t l} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) 10^3.$$

От нагрузок, лежащих справа от перегона,

$$\Delta U_{i2}'' = \frac{r A_p (m-1) l_{oi} l_2^2}{2 U t l} 10^3.$$

Общая средняя потеря напряжения до поезда на перегоне i будет равна:

$$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{ipm}}{t_{ipm}} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \frac{A_p}{2 t l} (m-1) \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + l_2^2 l_{oi} \right] \right\}.$$

Заменив A_{ipm} на $\frac{A_p t_i}{t}$,

$$\Delta U_i = \frac{r A_p \cdot 10^3}{U t} \left\{ l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_i}{t_{im}} + \frac{m-1}{2 l} \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + l_2^2 l_{oi} \right] \right\}. \quad (194)$$

Аналогичным образом получим расчетную формулу в общем виде для схемы одностороннего питания

$$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} + \frac{(m-1)}{t-t_i} \left[\sum_{j=1}^{i-1} A_{pj} l_{oj} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{pj} \right] \right\}, \quad (195)$$

и то же для однотипных поездов и равных перегонов из формулы (194):

$$\Delta U_i = \frac{r A_p \cdot 10^3}{U t} \left[l_{oi} \frac{t_i}{t_{im}} + \frac{m-1}{l} \left(\frac{l_1^2}{2} + l_2 l_{oi} \right) \right]. \quad (196)$$

В формулах (194) — (196) A_p следует принимать с учетом или без учета рекуперации в зависимости от поставленной задачи.

Двухпутные участки. На двухпутном участке могут иметь место три схемы соединения проводов контактной сети отдельных путей:

- 1) провода контактной сети отдельных путей поперечных соединений не имеют — схема раздельного питания путей;
- 2) провода соединены на всем протяжении (практически в трех или более точках) — схема параллельного соединения путей;
- 3) провода соединены в одной точке (обычно в посту секционирования) — узловая схема питания.

В первом случае расчет для каждого пути ведется как для однопутного участка; во втором и третьем случаях добавляется величина $\Delta U_i''$.

Отличие $\Delta U_i''$ от $\Delta U_i'''$ заключается в том, что в последнем случае должна учитываться возможность потребления тока на перегоне i II пути.

Исходя из всех изложенных выше соображений, можно, используя формулу (193), написать выражение потери напряжения в сети до поезда, находящегося на i -ом перегоне I пути двухпутного участка при двустороннем питании,

$$\begin{aligned} \Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} & \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \frac{m_I - 1}{t_I - t_{iI}} \left[\left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{j=1}^{i-1} A_{Ij} l_{ojI} + \right. \right. \\ & + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{Ij} \left(1 - \frac{l_{ojI}}{l} \right) \left. \right] + \frac{m_{II} - 1}{t_{II} - t_{iII}} \left[\left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{j=1}^{i-1} A_{IIj} l_{ojII} + \right. \\ & \left. \left. + A_{IIi} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{IIj} \left(1 - \frac{l_{ojII}}{l} \right) \right] \right\}. \quad (197) \end{aligned}$$

Здесь A_{II} — расход энергии на движение поезда рассматриваемого типа.

I пути по перегону j в квт·ч;

A_{IIi} — то же II пути.

Для некоторого упрощения мы приняли, что $l_{oiI} = l_{oiII} = l_{oi}$. Однако при необходимости легко учесть их неравенство.

Для случая однотипных поездов и идентичных по времени хода и расходу энергии перегонов на каждом пути потеря напряжения по аналогии с формулой (194) будет равна

$$\begin{aligned} \Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} & \left\{ \frac{A_I}{t_I} \left[l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_{iI}}{t_{imI}} + \frac{m_I - 1}{2l} \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. + l_2^2 l_{oi} \right] \right\} + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right), \quad (198) \end{aligned}$$

где A_I и A_{II} — расходы энергии на движение поездов по фидерной зоне на I и II путях.

Для схемы одностороннего питания получим формулы:

$$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} + \frac{m_I - 1}{t_I - t_{iI}} \left[\sum_{j=1}^{i-1} A_{Ij} l_{ojI} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{Ij} \right] + \right. \\ \left. + \frac{m_{II}}{t_{II}} \left[\sum_{j=1}^{i-1} A_{IIj} l_{ojII} + A_{IIi} l_{oi} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{IIj} \right] \right\} \quad (199)$$

и соответственно

$$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_I}{t_I} \left[l_{oi} \frac{t_{iI}}{t_{imI}} + \frac{m_I - 1}{l} \left(\frac{l_1^2}{2} + l_2 l_{oi} \right) \right] + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} l_{oi} \right\}. \quad (200)$$

Расчетное число поездов m . В соответствии с изложенным в начале этого параграфа число m надлежит выбирать в зависимости от поставленной задачи. Для расчетов, соответствующих режиму движения с минимальным интервалом попутного следования, нужно для каждого пути принимать $m = n$, где $n = \frac{t}{\theta}$.

Для всех остальных режимов следует подставлять различные значения $m > m_{cp}$ и устанавливать вероятность соответствующей потери напряжения.

На двухпутных участках вероятность одновременного появления m_I поездов на I пути и m_{II} на II пути будет равна произведению вероятностей появления m_I на I пути и m_{II} на II пути.

Расчетное число условных перегонов

Как уже указывалось выше, под величиной n , называемой числом условных перегонов, понимается максимальное количество поездов, которое может одновременно находиться в рассматриваемой зоне. Соответственно условным перегоном (для краткости называемым нами перегоном) является отрезок пути, который не может быть занят более чем одним поездом.

В случае если число n получается дробным, то, строго говоря, следует рассматривать вместо одной задачи две с целым числом перегонов, отличающимися на единицу, т. е. большим и меньшим дробного числа ($n_1 < n < n_2$). После проведения расчета для обоих чисел n_1 и n_2 следует взять от результатов среднее взвешенное в соответствии с дробной частью n , т. е. если для n_1 и n_2 получены некоторые данные B_{n1} и B_{n2} , то

$$B_n = B_{n1} (n_2 - n) + B_{n2} (n - n_1). \quad (a)$$

С достаточной для практики точностью можно пользоваться в расчетах и непосредственно дробным значением n .

В том случае, если n получилось меньше единицы, то это говорит о том, что в рассматриваемой зоне не может быть более одного поезда, а длина условного перегона превышает длину зоны.

При определении расчетной величины с помощью выражения (a) и $n_1 = 0$ расчетная величина равна нулю, а при $n_2 = 1$ обращается в нуль второй член формул $\left(1 - \frac{1}{n}\right)$ или $\left(1 - \frac{\theta N}{s \Sigma t}\right)$. Поэтому, если n меньше единицы, следует вести расчет исходя из его дробного значения, но принимая одновременно приведенную величину равной нулю.

Если при выводе формул (194), (196), (198') и (200) принять

$$t_{im} = t_{iI} = t_{iII} = \bar{t}; \quad t_I = t_{II}; \quad t = \frac{1}{N} \Sigma t; \quad \Delta U_i' = U_i'''$$

и заменить $\frac{A_p}{t} = \frac{AT}{\Sigma t}$; $l_{oi} = l - \frac{l_i}{2}$, а для схемы одностороннего питания и

$l_2 = 0$ (l_i — в конце зоны), то получим приближенные формулы (201), (201'), (202) и (202') (см. табл. 18 и 19).

Особенности расчета потери напряжения в контактной сети однофазного тока. Сопоставление расчетных формул для определения потерь напряжения в контактной сети постоянного и переменного тока [см., например, формулы (108) и (132)] приводит к выводу, что при постоянных по длине значениях r_a и x контактной сети можно находить при переменном токе потерю напряжения в виде суммы двух слагаемых. Первое слагаемое получается как потеря напряжения, вызываемая в активном сопротивлении сети активными составляющими нагрузки, а второе слагаемое — как потеря напряжения в реактивной составляющей сопротивления сети от реактивной составляющей нагрузки.

Исходя из этого, можно и для контактной сети переменного тока пользоваться всеми приведенными формулами. При этом следует за активное сопротивление сети принимать действительную часть комплекса полного сопротивления z_0 и учитывать в расчете только активные составляющие расхода энергии. Этот результат расчета дает первое слагаемое средней потери напряжения в сети до поезда на рассматриваемом перегоне.

Затем, приняв за реактивное сопротивление мнимую часть комплекса сопротивления сети z_0 и приняв в расчет реактивные составляющие расхода энергии, находят по тем же формулам вторую составляющую потери напряжения. Сумма этих составляющих и даст потерю напряжения в сети до поезда на перегоне i .

§ 51. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Выбор метода для расчета той или иной из перечисленных выше величин для определения параметров системы энергоснабжения или определения условий ее работы при заданных параметрах определяется двумя факторами: исходными условиями и характером определяемой величины. К исходным условиям относятся данные, которые должны быть положены в расчет, — это в первую очередь данные о режимах движения поездов и потребляемых ими токах или мощностях.

Как это ясно из изложенного, данные о режиме движения могут быть представлены либо в виде графиков движения для различных условий работы (различных суток года), либо в виде заданных размеров движения, т. е. в виде числа поездов и их типа.

Данные о потребляемых поездами токах или мощностях могут быть представлены в виде результатов тяговых расчетов либо просто в виде расходов энергии по перегонам, блок-участкам или приближенно по фидерным зонам.

Характер определяемых величин различается в основном по тому, за какое время они выбираются. Так могут определяться средние по времени величины и величины, относящиеся к определенным моментам времени.

Первые также могут определяться за различные отрезки времени.

Строго говоря, если заданы графики движения, то наиболее правильно было бы определять все расчетные величины как кратковременные, так и средние, исходя из этих графиков движения.

Однако, как уже отмечалось, для средних величин, определяемых за длительный отрезок времени, это привело бы к весьма громоздким расчетам.

Поэтому при таких исходных данных наиболее правильно все кратковременные значения, т. е.: а) максимальные или минимальные нагрузки подстанций; б) максимальные нагрузки фидеров; в) максимальные и минимальные нагрузки систем; г) максимальные потери напряжения, определять исходя из заданных графиков движения, т. е. пользуясь методами, построенными на анализе заданного графика движения.

Таблица 14

1-й случай. Поезда разного типа, перегоны неидентичны по времени хода и расходу энергии, размеры движения изменяются по длине зоны (в пределах данной зоны часть грузопотока зарождается, погашается или ответвляется с данной линией)

А. Схема одностороннего питания

Наименование определяемой величины	Расчетные формулы	№ формул по тексту
Эффективный ток фидера или подстанции ¹ на участке без применения рекуперации на линии при параллельном соединении проводов в a^2	$I_{эф}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \times$ $\times \left[1,08 T \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^V \frac{N_p A_{ipm}^2}{t_{ipm}} + A_T^2 - \sum_{i=1}^n A_{Ti}^2 \right]$	174
То же, но с применением рекуперации в a^2	$I_{эф}^2 = \frac{10^6}{T^2 U^2} \times$ $\times \left[1,08 T \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^V \frac{N_p (A_{ipm} + A_{ipz})^2}{t_{ipm} + t_{ipz}} + A_T^2 - \sum_{i=1}^n A_{Ti}^2 \right]$	174'
Потери энергии в контактной сети (без применения рекуперации) на однопутном участке или двухпутном при параллельном соединении ² проводов путей в $кат.ч$	$\Delta A_T = \frac{r \cdot 10^3}{T U^2} \times$ $\times \sum_{i=1}^n l_{oi} \left[1,08 T \sum_{p=1}^V \frac{N_p A_{ip}^2}{t_{ipm}} + 2 A_{Ti} \sum_{j=i+1}^n A_{Tj} \right]$	186'
То же с применением рекуперации в $кат.ч$	$\Delta A_T = \frac{r \cdot 10^3}{T U^2} \sum_{i=1}^n l_{oi} \left[1,08 T \times \right.$ $\times \sum_{p=1}^V \frac{N_p (A_{pmi} + A_{pzi})^2}{t_{pm} + t_{pz}} + 2 A_{Ti} \sum_{j=i+1}^n A_{Tj} \left. \right]$	186''
Средняя потеря напряжения на однопутном участке за время потребления энергии поездом типа d на перегоне в $е$	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} + \right.$ $\left. + \frac{m-1}{t_i - t_l} \left[\sum_{j=1}^{i-1} A_{pj} l_{oj} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{pj} \right] \right\}$	195
То же на двухпутном участке при параллельном соединении проводов	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} + \right.$ $+ \frac{m_I - 1}{t_I - t_{II}} \left[\sum_{j=1}^{i-1} A_{Ij} l_{oIj} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{Ij} \right] +$ $+ \frac{m_{II} - 1}{t_{II}} \left[\sum_{j=1}^{i-1} A_{IIj} l_{oIIj} + A_{III} l_{oi} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{IIj} \right] \left. \right\}$	199

¹ При определении тока подстанции $I_{эф}$ заменяется на $I_{эс}$ и величины n и A_T берутся не для фидерной, а для подстанционной зоны.

Б. Схема двустороннего питания

Наименование определяемой величины	Расчетные формулы	№ формулы по тексту
Эффективный ток фидера ¹ или подстанции без применения рекуперации в a^2	Пользоваться формулой (174) из предыдущей таблицы, заменив величины расходов энергии A_{ip} , A_T и A_{Ti} их составляющими, приходящимися на данный фидер или подстанцию	
То же, но с применением рекуперации в a^2	Пользоваться формулой (174') из предыдущей таблицы, заменив величины расходов энергии A_{ipm} , A_{ipz} , A_T и A_{Ti} их составляющими, приходящимися на данный фидер или подстанцию	
Потери энергии в контактной сети (без применения рекуперации) на однопутном участке или двухпутном при параллельном соединении проводов путей в $квт \cdot ч$	$\Delta A_T = \frac{r \cdot 10^3}{TU^2} \sum_{i=1}^n l_{oi} \left[1,08 T \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{p=1}^V \frac{N_p A_{ip}^2}{t_{ipm}} + \right. \\ \left. + 2A_{Ti} \sum_{j=i+1}^n A_{Tj} \left(1 - \frac{l_{oj}}{l} \right) \right]$	185
То же, но с применением рекуперации в $квт \cdot ч$	$\Delta A_T = \frac{r \cdot 10^3}{TU^2} \sum_{i=1}^n l_{oi} \left[1,08 T \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{p=1}^V \times \right. \\ \left. \times \frac{N_p (A_{pmi} + A_{pzi})^2}{t_{pm} + t_{pz}} + 2A_{Ti} \sum_{j=i+1}^n A_{Tj} \left(1 - \frac{l_{oj}}{l} \right) \right]$	185 ^а
Средняя потеря напряжения на однопутном участке за время потребления энергии поездом типа d на перегоне i в $в$	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \right. \\ \left. + \frac{m-1}{t-t_i} \left[\left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{j=1}^{i-1} A_{pj} l_{oj} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{pj} \left(1 - \frac{l_{oj}}{l} \right) \right] \right\}$	193 ^а
То же на двухпутном участке при параллельном соединении проводов в $в$	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_{idm}}{t_{idm}} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \right. \\ \left. + \frac{m_I - 1}{t_I - t_{iI}} \left[\left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{j=1}^{i-1} A_{Ij} l_{oj} + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{Ij} \left(1 - \frac{l_{ojI}}{l} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{m_{II}}{t_{II}} \left[\left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \sum_{j=1}^{i-1} A_{IIj} l_{ojII} + A_{IIi} l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + l_{oi} \sum_{j=i+1}^n A_{IIj} \left(1 - \frac{l_{ojII}}{l} \right) \right] \right\}$	197

¹ См. примечание к табл. 14.

Таблица 16

2-й случай. Поезда одного типа, перегоны идентичны по времени хода и расходу энергии, размеры движения вдоль по зоне неизменны

А. Схема одностороннего питания

Наименование определяемой величины	Расчетные формулы	№ формул по тексту
Эффективный ток фидера или подстанции ¹ на участке без применения рекуперации в a^2	или $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^8}{T^2 U^2} \left[1,1 \alpha \frac{N_0}{N_n} + \frac{n-1}{n} \right],$ $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^8}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{T}{N t_m} + \left(1 - \frac{\theta}{t} \right) \right]$	175 175'
То же с применением рекуперации в a^2	или $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^8}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{N_0}{N_n} \cdot \frac{t}{t_m + t_2} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{T2})^2}{A_T^2} + \frac{n-1}{n} \right]$ $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^8}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{T}{N \cdot (t_m + t_2)} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{T2})^2}{A_T^2} + \left(1 - \frac{\theta}{t} \right) \right]$	177 177'
Потери энергии в контактной сети (без применения рекуперации) на однопутном участке или двухпутном при параллельном соединении проводов путей в $кат.ч$	$\Delta A_T = \frac{rl \cdot 10^3}{T U^2} \left[0,54 T \frac{N A^2}{t_m} + \frac{A_T^2 (2n^2 - 3n + 1)}{6n^2} \right]$	187'
То же, но с применением рекуперации в $кат.ч$	$\Delta A_T = \frac{rl \cdot 10^3}{T U^2} \left[0,54 T \frac{N (A_{Tm} + A_2)^2}{t_m + t_2} + \frac{A_T^2 (2n^2 - 3n + 1)}{6n^2} \right]$	188'
Средняя потеря напряжения на однопутном участке за время потребления энергии поездов на перегоне i в θ	$\Delta U_i = \frac{r A_p \cdot 10^3}{U t} \left[l_{oi} \frac{t_i}{t_{im}} + \frac{m-1}{l} \left(\frac{l_1^2}{2} + l_2 l_{oi} \right) \right]$	196
То же на двухпутном участке при параллельном соединении проводов в θ	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_I}{t_I} \left[l_{oi} \frac{t_{II}}{t_{im I}} + \frac{m_I - 1}{l} \left(\frac{l_1^2}{2} + l_2 l_{oi} \right) \right] + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} \cdot l_{oi} \right\}$	200

¹ См. примечание к табл. 14.

Б. Схема двустороннего питания

Наименование определяемой величины	Расчетные формулы	№ форм. по мул. по тексту
Эффективный ток фидера или подстанции ¹ на участке без применения рекуперации в a^2	или $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{4T^2 U^2} \left[1,4 \alpha \frac{N_0}{Nn} + \frac{n-1}{n} \right],$ $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{4T^2 U^2} \left[1,4 \frac{T}{Nt_m} + \left(1 - \frac{\theta}{t} \right) \right]$	179 179'
То же, но с применением рекуперации в a^2	или $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{4T^2 U^2} \left[1,4 \frac{N_0}{Nn} \cdot \frac{t}{(t_m + t_z)} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{Tz})^2}{A_T^2} + \frac{n-1}{n} \right]$ $I_{эф}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{4T^2 U^2} \left[1,4 \frac{T}{N(t_m + t_z)} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{Tz})^2}{A_T^2} + \left(1 - \frac{\theta}{t} \right) \right]$	181 181'
Потери энергии в контактной сети (без применения рекуперации) на однопутном участке или двухпутном при параллельном соединении проводов путей в $кат.ч$	$\Delta A_T = \frac{r l \cdot 10^3}{12 T U^2} \left[2,16 T \frac{N A^2}{t_m} + \frac{A_T^2 (n-1)(n^2 - n + 1)}{n^3} \right]$	189'
То же, но с применением рекуперации в $кат.ч$	$\Delta A_T = \frac{r l \cdot 10^3}{12 T U^2} \left[2,16 T \frac{N (A_m + A_z)^2}{t_m + t_z} + \frac{A_T^2 (n-1)(n^2 - n + 1)}{n^3} \right]$	190'
Средняя потеря напряжения на однопутном участке за время потребления энергии поездом на перегоне l в $в$	$\Delta U_l = \frac{r A_p \cdot 10^3}{U t} \left\{ l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_i}{t_{im}} + \frac{m-1}{2l} \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + l_2^2 l_{oi} \right] \right\}$	194
То же на двухпутном участке при параллельном соединении проводов в $в$	$\Delta U_l = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left(\frac{A_I}{t_I} \left\{ l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_{iI}}{t_{imI}} + \frac{m_I - 1}{2l} \left[l_1 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + l_2^2 l_{oi} \right] \right\} + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} \cdot l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \right)$	198'

¹ См. примечание к табл. 14.

Приближенные формулы

А. Схема одностороннего питания

Наименование определяемой величины	Расчетные формулы	№ формул по тексту
Эффективный ток подстанции или фидера ¹ без применения рекуперации энергии в a^2	$I_{sc}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm}} + \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	176'
То же, но с применением рекуперации в a^2	$I_{sc}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^6}{T^2 U^2} \left[1,1 \frac{T}{\sum_{h=1}^N (t_{hm} + t_{h2})} \times \frac{(A_{Tm} + A_{T2})^2}{A_T^2} + \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	178'
Потери энергии в контактной сети (без применения рекуперации) на однопутном участке или двухпутном при параллельном соединении проводов путей в $км \cdot ч$	$\Delta A_T = \frac{550 r l A_T^2}{T U^2} \left[\frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm}} + 0,61 \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	187''
То же, но с применением рекуперации в $км \cdot ч$	$\Delta A_T = \frac{550 r l A_T^2}{T U^2} \left[\frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm} + \sum_{h=1}^N t_{hl}} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{T2})^2}{A_T^2} + 0,61 \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	188
Средняя потеря напряжения на однопутном участке за время потребления энергии поездом на наиболее удаленном перегоне в $в$	$\Delta U_l = \frac{r l A_T \cdot 10^3}{U T} \left[\frac{2l - l_l}{2l} \cdot \frac{T}{\sum t} + \frac{(l - l_l)^2}{2l^2} \right]$	201
То же на двухпутном участке при параллельном соединении в $в$	$\Delta U_l = \frac{r l A_T \cdot 10^3}{U T} \left[\frac{2l - l_l}{2l} \cdot \frac{T}{\sum t} + \frac{1}{2} \cdot \frac{l^2 - \frac{l_l^2}{3}}{l^2} \right]$	201'

¹ Для получения нагрузки фидера надлежит принять $S=1$, а t_{hm} и t_h отнести к фидерной зоне.

Б. Схема двустороннего питания

Наименование определяемой величины	Расчетные формулы	№ формулы по тексту
Эффективный ток ¹ подстанции или фидера ¹ на участке без применения рекуперации в а	$I_{sc}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^8}{4T^2 U^2} \left[1,4 \frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm}} + \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	180'
То же, но с применением рекуперации в а	$I_{sc}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^8}{4T^2 U^2} \left[1,4 \frac{T}{\sum_{h=1}^N (t_{hm} + t_{m2})} \times \frac{(A_{Tm} + A_{Te})^2}{A_T^2} + \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	182'
Потери энергии в контактной сети (без применения рекуперации) на однопутном участке или двухпутном при параллельном соединении проводов ¹ путей в квт·ч	$\Delta A_T = \frac{184 r l A_T^2}{T U^2} \left[\frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm}} + 0,455 \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	189
То же, но с применением рекуперации в квт·ч	$\Delta A_T = \frac{184 r l A_T^2}{T U^2} \left[\frac{T}{\sum_{h=1}^N t_{hm} + \sum_{h=1}^N t_{h2}} \cdot \frac{(A_{Tm} + A_{Te})^2}{A_T^2} + 0,455 \left(1 - \frac{\theta N}{S \sum_{h=1}^N t_h} \right) \right]$	190
Средняя потеря напряжения на однопутном участке за время потребления энергии поездом на перегоне i в в	$\Delta U = \frac{r A_T \cdot 10^3}{4 U l T} \left\{ \frac{T}{\sum t} \left(l^2 - \frac{l_i^2}{3} \right) + \frac{1}{2} [l(l - 2l_i) + l_i^2] \right\}$	202
То же на двухпутном участке при параллельном соединении в в	$\Delta U = \frac{r A_T \cdot 10^3}{4 U l T} \left[\left(l^2 - \frac{l_i^2}{3} \right) \left(\frac{T}{\sum t} + \frac{1}{2} \right) - l_i \left(\frac{l}{2} - \frac{l_i}{3} \right) \right]$	202'

¹ Для получения нагрузки фидера надлежит принять $S = 1$, а t_{hm} и t_i отнести к фидерной зоне.

Наиболее удобными и точными в этом случае являются методы характерных сечений графика движения и непрерывного исследования.

Целесообразно пользоваться этими методами и для расчета средних значений за небольшие промежутки времени:

- а) эффективной нагрузки подстанции;
- б) эффективной нагрузки фидеров;
- в) эффективной нагрузки проводов контактной сети;
- г) средних потерь напряжения в сети до поездов за время хода их по рассматриваемому блок-участку (или перегону);
- д) потери энергии.

В этом случае можно с успехом использовать упомянутые методы в их упрощенном виде. При этом степень упрощения должна выбираться в зависимости от характера профиля.

Так, при резко меняющихся токах поездов по перегонам следовало бы брать 1-ю степень упрощения, заменяя действительные значения тока их средними значениями на каждом элементе профиля, где непрерывно потребляется ток.

При более равномерном потреблении тока можно брать средние значения токов по перегонам (особенно, если перерывы в потреблении токов незначительны). Также при равномерном потреблении тока по перегонам брать среднее их значение по всей рассматриваемой зоне.

Все средние величины, определяемые за длительный период, измеряемый, например, годами, как это имеет место при определении потерь энергии для экономических расчетов, можно определять, пользуясь расчетными формулами, приведенными выше.

Для 2-го случая, когда исходные данные представлены в виде сведений о размерах движения, все средние величины, как правило, должны определяться при помощи формул § 47—50.

При проверке средних значений, соответствующих определенным режимам работы, характеризующихся твердым графиком движения (например при работе с полным использованием пропускной способности), следует вести расчеты методами анализа заданного графика движения. Однако проще и скорее и в этом случае пользоваться этими же расчетными формулами.

Выбор же формул, дающих различную степень точности, надлежит вести в зависимости от некоторых условий.

При неизменном по длине зоны грузопотоке и равномерном потреблении тока можно пользоваться приближенными формулами табл. 18 и 19.

В общем же случае, когда меняется и грузопоток по длине линии и сильно изменяется ток потребляемый поездами, следует пользоваться формулами в их наиболее общем виде (табл. 14 и 15).

ПЕРЕЧЕНЬ ВЕЛИЧИН, ВХОДЯЩИХ В РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

$I_{эф}$ — эффективный ток фидера подстанции в a

$I_{эс}$ — эффективный ток подстанции в a

ΔA_T — потеря энергии за время T в $кат \cdot ч$

ΔU_i — среднее напряжение на перегоне i за время потребления поездом энергии в $в$

r — сопротивление контактной сети (проводов и рельсов) в $ом/км$

T — период времени, за который определяется расчетная величина, в $ч$

U — расчетное напряжение в контактной сети в $в$

n — максимальное число поездов, могущих одновременно находиться в фидерной (или подстанционной) зоне, или число условных перегонов в зоне

i — номер условного перегона в рассматриваемой зоне — фидерной или подстанционной

j — то же другого перегона

V — число типов поездов

p — номер типа поезда

N_p — число поездов типа p , проходящих любую точку зоны за время T (обычно сутки)
 N — общее число поездов, проходящих любую точку зоны за время T (обычно сутки)
 N_0 — пропускная способность участка за время T (обычно сутки)
 m — число поездов, одновременно находящихся в рассматриваемой зоне
 m_I — то же по I пути
 m_{II} — то же по II пути
 t_{ipm} — время потребления энергии поездом типа p на перегоне i в χ
 t_{pm} — время потребления энергии поездом типа p в рассматриваемой зоне в χ
 t_{ip2} — время рекуперации поездом типа p на перегоне i в χ
 t_{p2} — время рекуперации поездом типа p в рассматриваемой зоне в χ
 t — время хода поезда по рассматриваемой зоне в χ
 t_m — время потребления энергии поездом в рассматриваемой зоне в χ
 t_2 — время рекуперации поездом в рассматриваемой зоне в χ
 t_l — время хода поезда по перегону i в χ
 t_{im} — время потребления энергии поездом на перегоне i в χ
 t_1 — время хода поезда по рассматриваемой зоне по первому пути в χ
 t_{I1} — время хода поезда по перегону i первого пути в χ
 t_{II} — время хода поезда по рассматриваемой зоне по второму пути в χ
 t_{idm} — время потребления энергии поездом типа d на i -м перегоне в χ
 θ — минимальный интервал попутного следования в χ
 A_T — расход энергии в фидерной зоне от всех поездов (за вычетом энергии рекуперации) за время T в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{Tm} — то же только в тяговом режиме в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{T2} — энергия рекуперации от всех поездов за время T в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A — расход энергии на поезд в фидерной зоне
 A_p — то же для поезда типа p
 A_{ip} — расход энергии на поезд типа p на перегоне i в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{jp} — то же на перегоне j в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{Ti} — расход энергии на перегоне i за время T от всех поездов в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{Tj} — то же на перегоне j в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{ipm} — расход энергии в тяговом режиме на поезд типа p на перегоне i в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{idm} — то же на поезд типа d на перегоне i в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{ip2} — энергия рекуперации поезда типа p на перегоне i в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_I — расход энергии в рассматриваемой зоне от всех поездов по первому пути за время T в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{II} — то же по второму пути в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{IJ} — расход энергии на перегоне j от всех поездов на первом пути за время T в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 A_{IIJ} — то же на втором пути за время T в $\text{квт}\cdot\text{ч}$
 l_i — длина перегона с номером i
 l_{oi} — расстояние от подстанции до центра тяжести нагрузки на перегоне i или приближенно расстояние от подстанции до середины перегона i в км
 l_{0j} — то же для перегона j в км
 l_{0jI} — то же по первому пути в км
 l_{0jII} — то же по второму пути в км
 l_1 — расстояние от подстанции A (слева) до центра тяжести нагрузки, лежащей между подстанцией A и перегонном i . Приближенно половина расстояния от подстанции A до начала перегона i в км
 l_2 — то же от подстанции B (справа) до центра тяжести нагрузки, лежащей между подстанцией B и перегонном i в км . Приближенно половина расстояния от подстанции B до конца перегона i в км .

ЗАЩИТА ОТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

§ 52. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Короткие замыкания в контактной сети постоянного тока. При эксплуатации электрифицированных железных дорог, как показывает практика, возможны короткие замыкания контактной сети. Возникновение коротких замыканий может быть в результате обрыва проводов, перекрытия изоляторов контактной сети, замыкания токоприемником секционного изолятора или воздушного промежутка, отделяющего секцию сети, стоящую под напряжением, от заземленной, случайных соединений металлических поддерживающих конструкций с проводами контактной сети, ошибочных включений в схеме секционирования (при подаче напряжения на заземленный участок) и, наконец, в результате всяких неисправностей в подвижном составе.

Короткие замыкания могут привести к различным нарушениям нормальной работы.

Токи короткого замыкания большой величины даже при очень малой длительности могут в результате динамического воздействия привести к разрушениям машин, трансформаторов и различных приборов. Токи короткого замыкания, имеющие величины того же порядка, что и допускаемые кратковременные перегрузки, если они не будут своевременно отключены, могут явиться причиной термических повреждений машин, трансформаторов, различных аппаратов и перегрева проводов контактной сети.

При перегреве контактные провода вследствие отжига теряют механическую прочность. Если же короткое замыкание возникло в подвижном составе или при случайном металлическом соединении одного из проводов подвески с заземленной конструкцией, то тепло, развивающееся в месте такого контакта, как правило, ведет к пережогу провода.

Величины токов короткого замыкания зависят от мощности генераторов и трансформаторов, а также от величины сопротивления высоковольтной сети, которая лежит между питающей установкой и местом короткого замыкания. При некоторых условиях, например при расположении места короткого замыкания непосредственно у подстанции, величины токов короткого замыкания могут достигать больших значений. Возможные в таких случаях аварии могут привести к длительному перерыву нормальной эксплуатации участка, что совершенно недопустимо. Вот почему при проектировании системы энергоснабжения нужно с особой тщательностью подходить к выбору схемы защиты от токов короткого замыкания в контактной сети.

Правильно выбранной схемой защиты от токов короткого замыкания можно считать лишь ту схему, при которой автоматические выключатели будут способны отключить всякое короткое замыкание в контактной сети. Предпочтение следует отдать той схеме защиты, при которой из работы будет выходить возможно меньшая часть всего участка, если выполнение этого требования не связано с чрезмерной сложностью схемы и большим ее удорожанием.

При возникновении короткого замыкания ток не сразу достигает своей максимальной величины, а нарастает в течение некоторого, хотя и весьма малого промежутка времени, измеряемого долями секунды.

Закон изменения тока короткого замыкания, если принять э. д. с. генератора постоянной, может быть для каждого момента времени представлен формулой

$$I = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right), \quad (203)$$

где I — мгновенное значение тока в а;

E — э. д. с. генератора в в;

R — омическое сопротивление цепи короткого замыкания в ом;

L — индуктивность цепи в гн;

t — время, отсчитываемое от начала короткого замыкания, в сек.

Из уравнения (203) можно установить скорость нарастания тока короткого замыкания в момент его возникновения.

Продифференцировав уравнение (203) и приняв $t = 0$, получим

$$\frac{dI}{dt} = \frac{E}{L}. \quad (203')$$

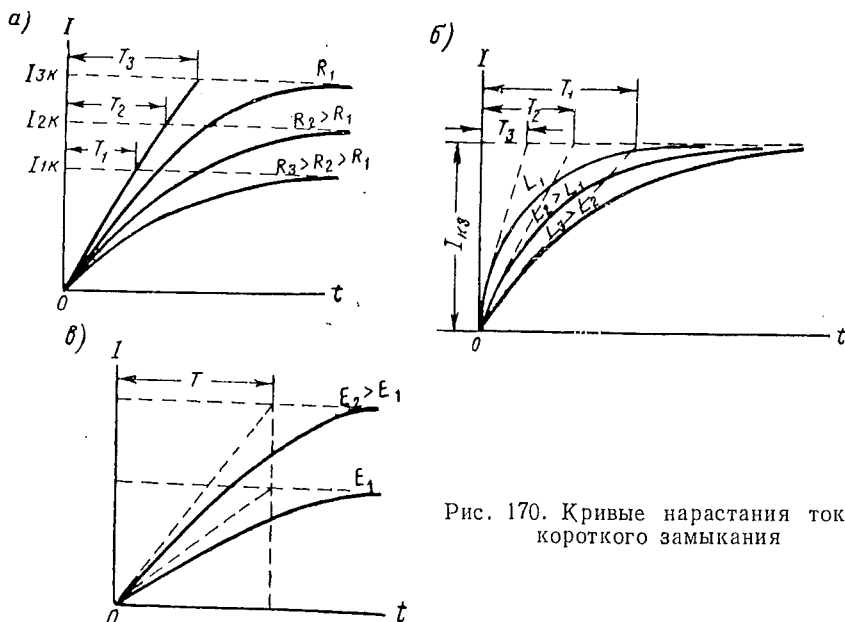


Рис. 170. Кривые нарастания тока короткого замыкания

Строго говоря, R и L изменяются во все время нарастания тока короткого замыкания, что объясняется присутствием в цепи короткого замыкания стальных массивных проводов (рельсов), а также протеканием части тока по земле. Методов, которые давали бы возможность определить R и L сети с учетом всех особенностей ее работы, не существует; обычно принимают, что во все время нарастания тока короткого замыкания эти величины остаются постоянными. При этом допущении можно, пользуясь выражением (203'), прийти к выводу, что в начальный момент времени скорость нарастания тока короткого замыкания для цепей, обладающих одинаковой индуктивностью, при одной и той же э. д. с. остается постоянной.

На рис. 170, а приведены кривые нарастания тока короткого замыкания для трех различных цепей, имеющих одинаковые э. д. с. и индуктивность, но обладающих различным омическим сопротивлением. Показанные пунктиром асимптоты определяют величины установившихся токов короткого замыкания. Уравнения асимптот легко получить из уравнения (203). Приняв в этом уравнении $t = \infty$, получим

$$I = \frac{E}{R}.$$

Касательная к кривым нарастания тока в начале координат (общая для всех трех кривых) отсекает на асимптотах отрезки T_1 , T_2 и T_3 , которые соответствуют постоянным времени цепей, т. е. промежуткам времени, в течение которых (если омическое сопротивление цепи принять равным нулю) ток, нарастая, достигал бы установившегося значения. Если же несколько электрических цепей обладают одинаковыми омическими сопротивлениями, но различными индуктивностями, то при одинаковых э. д. с.

кривые нарастания токов будут иметь другой вид (рис. 170, б). В отличие от предыдущего случая скорость нарастания токов короткого замыкания в начальный момент времени здесь различна. Цепь с большей индуктивностью в начальный момент дает меньшую скорость нарастания, чем цепь с меньшей индуктивностью. Установившиеся же токи короткого замыкания будут иметь одинаковую величину, так как они определяются только омическим сопротивлением цепи.

Если в разных контурах омические и индуктивные сопротивления соответственно равны, то в контуре с большей э. д. с. получится большая скорость нарастания токов короткого замыкания и большая установившаяся его величина (рис. 170, в).

В цепях постоянного тока небольшой мощности обычно токи перегрузки или токи короткого замыкания отключаются максимальными автоматическими выключателями. При защите же сетей, питаемых установками большой мощности, этот тип выключателя не дает надежной защиты.

Основным недостатком защиты от тока короткого замыкания при помощи максимального автоматического выключателя нормального типа является то,

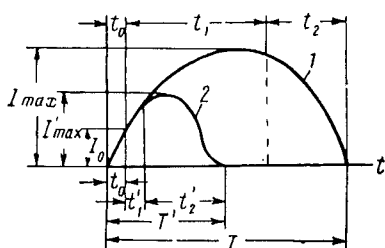


Рис. 171. Кривые отключения тока короткого замыкания максимальными выключателями нормального типа и быстродействующими:

I_0 — ток уставки выключателя;
 I_{\max} — максимальное значение тока при отключении выключателем нормального типа; I_{\max}' — то же при отключении быстродействующим автоматом; t_0 — время достижения тока уставки; t_1 — собственное время отключения нормального выключателя; t_1' — собственное время отключения быстродействующего выключателя; t_2 и t_2' — время разрыва дуги быстродействующим и нормальным выключателями

что если этот выключатель отрегулировать на ток, меньший установившегося значения, то в процессе нарастания ток короткого замыкания все же успевает достичь своего предельного значения. Другими словами, процесс нарастания протекает так же, как если бы этого выключателя вовсе не было в цепи, и, таким образом, отключение практически может быть произведено лишь при установившемся значении тока короткого замыкания. Объясняется это тем, что время, необходимое для отключения нормального выключателя, обычно превышает время, в течение которого ток короткого замыкания достигает значений, близких к своей установившейся величине.

Если предположить, что нормальный автоматический выключатель отрегулирован таким образом, что он должен отключать ток I_0 (рис. 171), то по достижении током при его нарастании этой величины выключатель получает необходимый импульс для отключения. Однако особенности схемы и конструкции выключателя вызывают настолько большое время отключения, что ток успевает

нарасти до своей максимальной величины, прежде чем приведенный в действие выключатель успеет отключить его. Только после достижения током установившегося значения практически наступает отключение короткого замыкания (рис. 171, кривая 1).

Полное время выключения обычно разбивают на три периода: первый t_0 — с момента возникновения короткого замыкания до достижения током величины, на которую отрегулирован выключатель; второй t_1 , называемый собственным временем выключения, измеряет время от момента, когда ток достиг отключающей величины, до момента, когда контакты начали расходиться; третий t_2 исчисляется с момента начала расходжения контактов до окончания процесса разрыва короткого замыкания, т. е. до потухания дуги, возникающей между контактами выключателя. При отключении тока короткого замыкания при помощи быстродействующего автоматического выключателя выигрыш во времени получается главным образом за счет собственного времени выключения.

Для сравнения на рис. 171 представлены кривые короткого замыкания, разорванного нормальным автоматическим выключателем (кривая 1) и быстродействующим автоматическим выключателем (кривая 2). Значительное уменьшение времени во втором случае произошло за счет уменьшения второго периода и частично за счет большей скорости гашения дуги.

Ток короткого замыкания в средних условиях достигает своего максимального значения в течение 0,01—0,1 сек.

У быстродействующего выключателя собственное время отключения значительно меньше (0,003—0,008 сек), что обеспечивает отключение тока короткого замыкания до достижения им своей максимальной величины. Однако при любой конструкции выключателя все же момент достижения током отключающей величины не совпадает с моментом начала движения контактов. Точно так же начало движения контактов не определяет еще уменьшения тока короткого замыкания, так как вследствие малого сопротивления дуги, возникающей между контактами, ток продолжает еще нарастать, но уже с меньшей скоростью. Дальнейшее увеличение длины дуги ведет к увеличению общего сопротивления и к прекращению нарастания тока. Пройдя через максимум, ток начинает убывать. Указать длительность времени горения дуги весьма затруднительно, так как оно зависит от ряда факторов и в первую очередь от напряжения отключаемой сети.

Основным преимуществом защиты при помощи быстродействующих выключателей является то, что они, отключая короткое замыкание в весьма малый промежуток времени, не дают току нарасти до опасной величины. При этом за столь малый промежуток времени масляные выключатели, установленные на высоковольтной стороне преобразовательной подстанции, сработать не успевают и, следовательно, отпадает необходимость повторного пуска подстанции.

На подстанциях, как правило, предусматривается автоматическое повторное включение быстродействующих выключателей (АПВ). При таком устройстве случайные перегрузки или кратковременные короткие замыкания проходят для электрифицированного участка почти совершенно незаметно.

С точки зрения бесперебойности работы быстродействующие выключатели имеют весьма существенные преимущества по сравнению с выключателями нормального типа, давая надежную защиту от токов короткого замыкания и незначительные по величине перенапряжения. Эти преимущества и привели к весьма широкому применению быстродействующих выключателей как основного аппарата защиты от тока короткого замыкания.

Особенности защиты тяговых сетей от токов короткого замыкания. Основные затруднения при настройке защиты от токов короткого замыкания в условиях железных дорог вызываются наименьшими токами короткого замыкания, которые могут иметь место на рассматриваемом участке.

Наименьшее значение ток короткого замыкания будет иметь при коротком замыкании в конце фидерной зоны, так как в цепь короткого замыкания будет введено наибольшее возможное сопротивление.

При расчетах короткого замыкания принимают, что в месте короткого замыкания образуется дуга, т. е. в расчет принимается ток короткого замыкания меньший, чем при непосредственном соединении провода и рельса. Включение в расчет тока короткого замыкания сопротивления дуги дает при расчете некоторый запас, обеспечивая тем самым большую надежность при защите от токов короткого замыкания. В частности, атмосферные перенапряжения, возникающие в контактной сети, иногда приводят к перекрытию изоляторов, возникающая при этом дуга продолжает поддерживаться уже рабочим напряжением. Для того чтобы при таком перекрытии не пострадали изоляторы, необходимо как можно быстрее ликвидировать возникшее короткое замыкание.

Для надежной работы участка необходимо, чтобы ток уставки быстродействующего выключателя был несколько меньше наименьшего тока короткого замыкания, но больше максимальной нагрузки, которая может иметь место при работе по нормальному графику движения.

Соотношение между максимальным рабочим током и минимальным током короткого замыкания устанавливается техническими условиями. Действующие технические условия (ТУПЭ—57) рекомендуют следующее соотношение между величинами $I_{к\ min}$ и I_{max} :

$$I_{\kappa \min} \geq I_{\max} + 300.$$

(204)

В тех случаях, когда не удастся выдержать это требование, т. е. когда токи короткого замыкания недостаточны для отключения фидерного выключателя, приходится принимать специальные меры защиты от малых токов короткого замыкания.

С таким положением приходится встречаться в большинстве случаев.

§ 53. ЗАЩИТА ОТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО УСТАНОВИВШЕМУСЯ ЗНАЧЕНИЮ ЭТОГО ТОКА

Защита при помощи постов секционирования. При рассмотрении различных схем питания сети перегонов было указано, что благодаря устройству постов секционирования при коротком замыкании выпадает из работы меньшая часть участка. Однако обычно главной причиной, заставляющей вводить в схему посты секционирования, является стремление получить защиту от малых токов короткого замыкания, которые не могут быть отключены выключа-

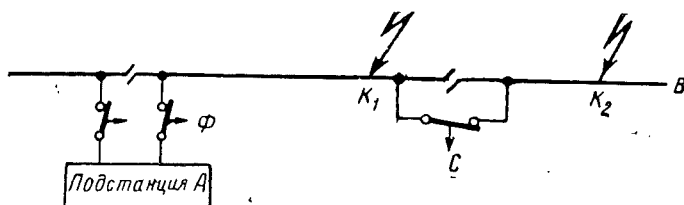


Рис. 172. Схема защиты участка одностороннего питания от недостаточных по величине токов короткого замыкания при помощи поста секционирования

телями фидеров. При такой схеме контактная зона в фидерной зоне разделяется на части, которые соединяются между собой при помощи быстродействующих выключателей. Эти выключатели вместе с соответствующими вспомогательными устрой-

ствами располагаются в специальном помещении и образуют так называемые посты секционирования.

При определении наибольшего тока, протекающего через фидер (рис. 172) при нормальной работе, в расчет обычно принимают ряд нагрузок, расположенных на всей длине зоны АВ. Если предположить, что нагрузки более или менее равномерно распределены по длине зоны, то максимальный рабочий ток, протекающий через выключатель Ф, как правило, будет много больше, чем максимальный ток, протекающий через выключатель С. Это позволяет дать уставку выключателю С меньшую, чем выключателю Ф, что позволит отключить ток короткого замыкания, который не мог быть отключен выключателем Ф. Наименьшее значение ток короткого замыкания получит при коротком замыкании в точке К2. Этот ток должен отключаться выключателем С; ток же короткого замыкания при коротком замыкании в точке К1 должен отключаться выключателем Ф и будет для него наименьшим.

Если же наибольший ток, протекающий через фидер, при нормальной работе будет определяться одной или несколькими нагрузками, расположенными на участке за постом, то выключатели С и Ф находятся в одинаковых условиях, т. е. оба должны иметь уставки не ниже суммарной нагрузки, и введение в схему поста секционирования не даст никаких преимуществ.

В практике железных дорог СССР одностороннее питание встречается, как исключение, лишь на концах электрифицированных линий. Такие концы (консоли) участков питания имеют обычно весьма небольшую длину и постов секционирования не требуют. Основное применение посты секционирования получают при параллельной работе подстанций, т. е. при схемах двустороннего питания.

Секционирование сети у подстанции (рис. 173) обеспечивает независимость одного участка от другого и необходимо с точки зрения защиты от токов короткого замыкания. Если бы такого разделения у подстанции не было, то фидерные выключатели непосредственно питали бы не только короткие замыка-

ния на участке между смежными подстанциями, но и лежащие за пределами фидерной зоны вплоть до конца электрифицированного участка. При большой протяженности участка ток короткого замыкания будет мал и отключение его будет невозможно, следовательно, короткое замыкание будет питаться от ряда удаленных подстанций. Если же такие разделения предусмотрены, то при параллельной работе подстанций короткое замыкание должно отключаться сразу с двух сторон. В этом случае для каждого выключателя наиболее удаленным будет короткое замыкание у соседней подстанции. Для определения величины уставки выключателя Φ_A следует рассматривать короткое замыкание

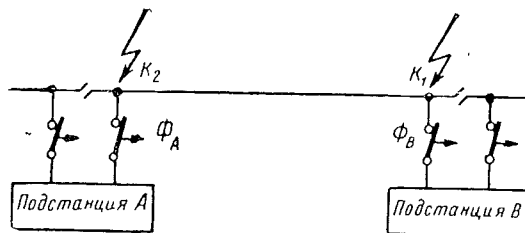


Рис. 173. Защита участка контактной сети с двусторонним питанием при помощи фидерных выключателей

у подстанции B в точке K_1 , а для выключателя Φ_B — короткое замыкание в точке K_2 . При таких коротких замыканиях ток через ближайший фидерный выключатель (например Φ_B при замыкании в точке K_1) заведомо превзойдет по величине ток уставки автомата, вызовет его отключение и, таким образом, вопрос защиты сведется, как и на рис. 172, к защите зоны, питаемой с одной стороны.

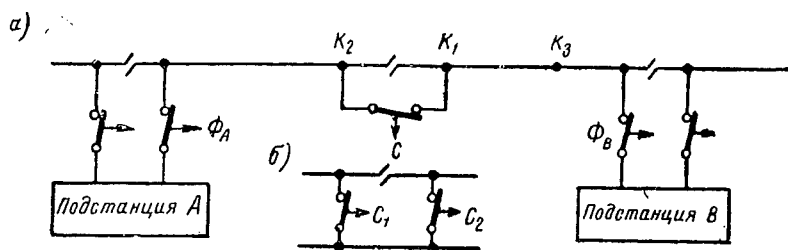


Рис. 174. Защита участка контактной сети с двусторонним питанием от недостаточных по величине токов короткого замыкания при помощи поста секционирования

Если ток короткого замыкания окажется недостаточным по величине для отключения второго выключателя, то для защиты может быть применен пост секционирования, расположенный около середины зоны. В таком случае уставка выключателя подстанции будет определяться протекающим через него током при коротком замыкании у поста (рис. 174).

Уставка быстродействующего выключателя, расположенного в середине зоны, при двустороннем питании может быть ниже, чем при одностороннем. Это объясняется тем, что при нормальной работе через этот выключатель протекают только уравнивающие токи, вызываемые различием в величине и расположении нагрузок на обеих частях зоны.

При рассматриваемой схеме защиты (рис. 174) короткие замыкания на участке AC должны отключаться выключателями Φ_A и C и при коротком замыкании на участке BC — выключателями Φ_B и C .

В посту секционирования для защиты от токов короткого замыкания могут быть использованы как неполяризованные, так и поляризованные выключатели. В первом случае достаточно одного выключателя (рис. 174, а), во втором — двух (рис. 174, б).

Несмотря на сравнительно небольшую величину токов, отключаемых выключателями постов секционирования, здесь не могут быть использованы небыстродействующие выключатели. Действительно при таких выключателях в случае короткого замыкания в точке K_1 или K_2 (см. рис. 174) токи, протекающие через выключатели Φ_A и Φ_B , будут приблизительно одинаковы и вызовут отключение обоих выключателей.

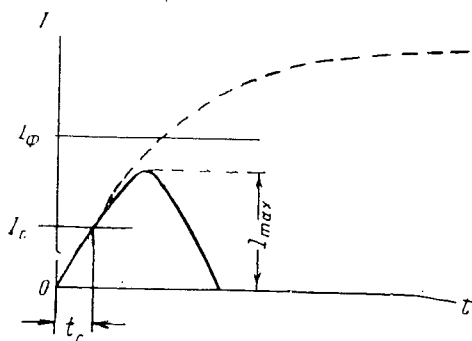


Рис. 175. Кривая тока короткого замыкания (к схеме рис. 174) при отключении его выключателем поста

При этом селективность работы схемы (отключение лишь поврежденной части участка) будет нарушена. Отключатся оба выключателя не только при коротких замыканиях у самого поста, но и в точках, отстоящих от него на некотором расстоянии тем большем, чем ниже ток уставки выключателей подстанций тока короткого замыкания у поста. Если же для устранения этого недостатка принять для выключателя Φ_A такую уставку, чтобы он не отключал ток короткого замыкания в точке K_1 , то он не будет отключать ток и на части участка AC , прилегающей к посту. В результате при коротком замыкании на определен-

ной части участка в так называемой «мертвой зоне» схема не обеспечит защиты от токов короткого замыкания.

Неселективной работы схемы удастся избежать при применении в точке C быстродействующего выключателя, отрегулированного соответствующим образом. В этом случае селективность действия схемы достигается при условии, что выключатель C отключается ранее, чем ток достигнет значения I_ϕ , необходимого для отключения выключателя фидера.

Если положить, что короткое замыкание имеет место в точке K_1 (рис. 174), то процесс отключения поврежденного участка пойдет следующим образом: ток короткого замыкания, нарастая, сначала достигнет уставки выключателя поста I_c (рис. 175) и тем самым даст ему импульс на отключение, но пока от-

ключение будет происходить, ток успеет нарасти до величины I_{max} меньшей, однако, тока уставки фидерного выключателя I_ϕ . После этого выключатель C разорвет дугу, прекратив тем самым протекание тока через выключатель подстанции A . В то же время ток в выключателе Φ_B , продолжая нарастать, достигнет величины уставки фидерного выключателя, что приведет к его отключению. После этого поврежденный участок будет отключен от подстанции.

Так как скорость нарастания тока короткого замыкания весьма велика, то работать в описанной последовательности схема может лишь при применении быстродействующих выключателей.

На многопутных участках, как правило, применяют узловую схему или схему параллельного соединения проводов контактной сети отдельных путей и параллельную работу подстанций. Обычно соединение проводов производят в одной точке (узловая схема) реже в двух или трех, в том же посту секционирования, где производят и продольное соединение проводов, смежных по

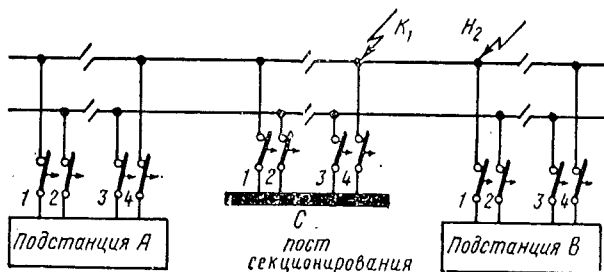


Рис. 176. Схема защиты двухпутного участка, питаемого с двух сторон, от недостаточных по величине токов короткого замыкания при помощи поста секционирования

длине участка секций (рис. 176). Такая схема создает особо благоприятные условия для селективности работы. При коротком замыкании в сети через выключатель, питающий поврежденную часть участка, устремляется ток, равный сумме токов, протекающих в это время через остальные выключатели секционного поста, и направленный от шины к сети.

Если пост расположен в середине участка, то при коротком замыкании возле него через выключатели подстанций будут протекать токи почти одинаковой величины. Однако отключится лишь выключатель подстанции, питающий непосредственно короткое замыкание (а не через шину поста). Достигается это так же, как и при однопутном участке, тем, что выключателям поста дают более низкую уставку по сравнению с выключателями фидеров подстанций. Вследствие этого, а также значительно большего тока выключатель поста, присоединенный к поврежденному участку, отключается раньше, нежели ток выключателя подстанции достигнет отключающей величины.

На рис. 177 кривая *a* дает зависимость тока короткого замыкания от времени в фидерах A_3 , A_4 , B_1 и B_2 (см. рис. 176), а следовательно, и в выключателях C_1 , C_2 и C_3 (при расположении поста в середине фидерной зоны и коротком замыкании в точке K_1). Строго говоря, эти токи не равны, но близки друг к другу по величине.

Кривая *b* относится к выключателю C_4 . Ток в этом выключателе равен сумме токов в выключателях C_1 , C_2 и C_3 .

Уставка выключателей поста по тем же соображениям, что и на однопутном участке, может быть много ниже, чем уставка выключателей фидеров подстанции.

Если при отключении выключателем C_4 короткого замыкания (кривая *d* на рис. 177) максимальный ток I_{\max} превысит уставку выключателя фидера подстанции, это не обязательно должно привести к отключению фидерных выключателей, так как соответствующее значение тока в фидерном выключателе I'_{\max} будет примерно в три раза меньше, чем I_{\max} . Очевидно, только в том случае, если I_{\max} превысит I_ϕ в три раза, произойдет отключение фидерных выключателей. При рассматриваемой схеме, учитывая, что I_c может быть много меньше I_ϕ , этого можно избежать соответствующим выбором I_c .

Уставка каждого выключателя должна быть выбрана с учетом короткого замыкания в наиболее удаленной точке защищаемого им участка. Для выключателей подстанции определяющим уставку явится ток короткого замыкания у поста (например, для выключателя B_1 ток при коротком замыкании в точке K_1). Для выключателей поста, определяющим уставку, явится ток короткого замыкания у соответствующей подстанции (например, для выключателя C_4 ток короткого замыкания в точке K_2).

В схемах многопутных постов секционирования обычно применяют быстродействующие выключатели направленного действия, что еще более повышает надежность работы и облегчает выбор уставок, так как в этом случае может отключиться только выключатель, непосредственно соединенный с поврежденным участком.

Всем рассмотренным схемам защиты присуще одно общее отрицательное качество. Разберем его для примера на схеме (рис. 174). Предположим, что короткое замыкание произошло в точке K_3 . Если защита отрегулирована правильно, то должны отключаться выключатели Φ_B и C .

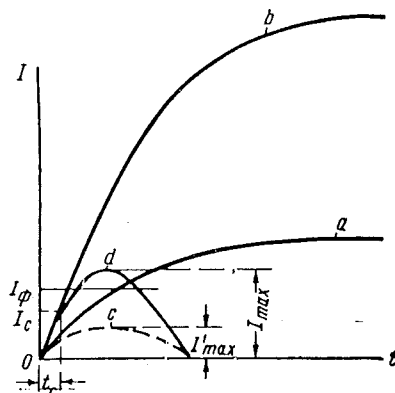


Рис. 177. Кривые токов короткого замыкания (к схеме рис. 176) при отключении его выключателем поста секционирования

Предположим, что токоприемник поезда, идущего слева с неповрежденного участка, перекрыл секционное разъединение у поста. Тогда короткое замыкание возобновится вновь, питаясь от подстанции A через фидер Φ_A . В лучшем случае возобновление короткого замыкания может привести к отключению выключателя Φ_A . Если же возникший ток короткого замыкания будет недостаточен для отключения выключателя Φ_A , то разрыв тока короткого замыкания произойдет между проводом и токоприемником, что может привести к перегоранию и обрыву провода. Такие же последствия может вызвать и короткое замыкание в точке K_2 , когда выключатель Φ_A отключится и токоприемник перекроет секционное разъединение у подстанции A . Короткое замыкание восстановится, питаясь от подстанции A через левый фидер. Второй фидер подстанции A отключится, а для выключателей других подстанций, лежащих левее подстанции A , ток окажется недостаточным. То же самое получится, если токоприемник соединит заземленный и незаземленный участки сети.

Все изложенное приводит к выводу, что схема секционного разъединения, при которой возможно восстановление короткого замыкания через токоприемник, не дает достаточной технической надежности.

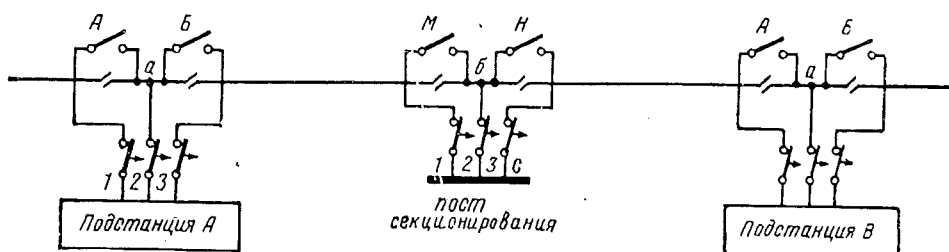


Рис. 178. Схема секционирования участка при помощи секционных разъединений с нейтральными вставками:

a — нейтральная вставка у подстанции; b — нейтральная вставка у поста секционирования

Избежать недостатка схемы можно или устройством специальной сигнализации, или введением в каждое разделение участка нейтральной вставки (рис. 178). Сигнализация могла бы быть устроена так, чтобы поезд не выпускался на поврежденный участок; для предупреждения поездов, которые в момент срабатывания выключателя C находятся от секционного разъединения (рис. 174) на расстоянии, меньшем тормозного пути, может быть предусмотрен сигнал, требующий опустить пантограф. Тот и другой сигналы должны быть заблокированы с соответствующим быстродействующим выключателем поста, давая необходимое указание при отключении быстродействующего выключателя.

В схеме с нейтральной вставкой длина вставки должна быть выбрана такой, чтобы исключить возможность одновременного перекрытия секционных разъединений на обоих концах нейтральной вставки.

Питание нейтральной вставки b можно осуществить при помощи третьего резервного выключателя или контактора. При применении контактора схема поста должна обеспечивать его отключение, как только отключится один из выключателей поста (1 или 3), после чего нейтральная вставка скажется без напряжения.

Все сказанное о секционных разъединениях возле подстанций относится в основном к случаю расположения подстанций на перегонах или в стороне от станций. Если же (как это обычно и бывает) подстанция располагается на станции, сеть которой отделяется с обоих концов от сети перегона, можно использовать сеть станции вместо нейтральной вставки a (рис. 178) и при перекрытии секционного разъединения будет отключаться выключатель 2, питающий сеть станции. Практически на станциях, где секционное разъединение оградить от наезда на него токоприемника легче, чем на перегоне, такие отключения будут происходить редко.

Использование сети станции в качестве нейтральной вставки возможно при нормальной схеме, при которой разъединители A и B разомкнуты, а выключатели 1, 2 и 3 подстанции A включены. При схеме питания, когда выключатели 1 и 3 включены, а выключатель 2 отключен и питание сети станции осуществляется через фидер A_1 или A_3 путем замыкания одного из разъединителей A или B , перекрытие секционного разъединения токоприемником вызывает восстановление короткого замыкания.

Защита при помощи блокировки фидерных выключателей. При блокировке фидерных выключателей отключение одного из фидерных выключателей немедленно вызывает отключение и другого, питающего эту же фидерную зону, независимо от того, достиг ли ток, протекающий через этот выключатель, величины его уставки. Эта схема нашла себе основное применение на однопутных участках, а также на двухпутных, имеющих раздельное питание путей.

В частности, весьма широко эта схема применяется на Московском метрополитене, где сравнительно небольшие расстояния между подстанциями и возможность проложить кабельную линию для соединения блокируемых выключателей в тоннеле создают для нее особенно благоприятные условия.

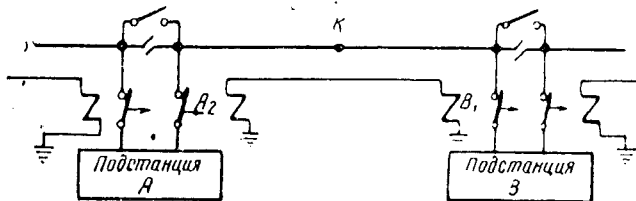


Рис. 179. Принципиальная схема защиты от недостаточных по величине токов короткого замыкания зоны, питаемой с двух сторон, при помощи блокировки фидерных выключателей

При отключении одного из фидеров, например A_2 (рис. 179), питающих фидерную зону A_2B_1 , вспомогательные контакты выключателя этого фидера производят необходимое переключение в цепи блокировки, которое приводит к отключению фидерного выключателя B_1 . Повторное включение выключателя B_1 , отключившегося от блокировки, возможно только после включения выключателя A_2 , отключившегося первым.

Блокировочные приспособления должны быть оборудованы устройством, позволяющим в случае необходимости осуществлять независимую работу обесточенных выключателей.

При рассматриваемой системе защиты следует ориентироваться на короткое замыкание в том месте, где условия для отключения выключателей одинаковы; при одинаковых токах уставки быстродействующих выключателей этому отвечает середина участка.

Таким образом, наиболее трудно отключаемое короткое замыкание, по которому приходится выбирать ток уставки выключателя, оказывается в середине участка, так же как и при схеме с секционным постом, расположенным в середине участка.

§ 54. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО УСТАНОВИВШЕМУСЯ ЗНАЧЕНИЮ ТОКА

Внешняя характеристика подстанций постоянного тока. При выводе формулы для определения величины тока короткого замыкания следует учитывать зависимость напряжения на шинах подстанций от величины ее нагрузки. Нагрузка же на подстанции может складываться из тока короткого замыкания на рассматриваемой фидерной зоне и нагрузок на зонах питания остальных фидеров данной подстанции (на неповрежденных путях).

Характеристика выпрямительной подстанции с известным приближением для расчета может быть представлена в виде прямой линии (рис. 180).

Здесь прямая 1 относится к случаю, когда на подстанции включены все

агрегаты (числом n_0) рабочей мощности и все вводы. При включении меньшего числа агрегатов n и части вводов (прямая 2) потеря напряжения на подстанции будет больше при той же нагрузке. Прямая 3 показывает потерю напряжения при включении только одного агрегата. Через U_n обозначено номинальное напряжение на шинах подстанции при полной номинальной нагрузке, U_0 — напряжение холостого хода.

Так как характеристика подстанции представлена прямой линией, то можно написать ее уравнение в виде:

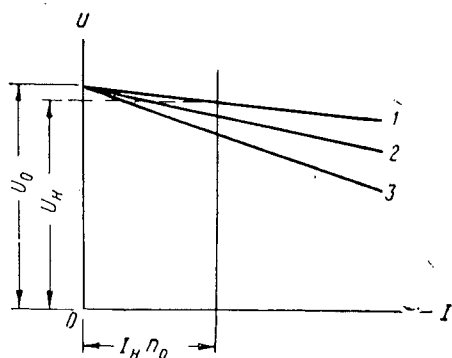


Рис. 180. Внешняя характеристика ртутновыпрямительной тяговой подстанции

$$U = U_0 - I\rho. \quad (205)$$

Это уравнение определяет напряжение на шинах подстанции при любом токе нагрузки, коэффициент ρ может быть условно представлен как внутреннее сопротивление источника энергии.

Наклон внешней характеристики определяется потерями напряжения в первичной питающей сети и преобразовательных агрегатах подстанции.

Снижение напряжения на шинах выпрямленного тока в результате потерь напряжения в индуктивных сопротивлениях трансформаторов преобразовательных агрегатов определяется выражением

$$\Delta U' = \frac{I}{I_n n} A \frac{u_{\kappa}\%}{100} U_0,$$

где I — нагрузка подстанций в a ;

I_n — номинальный ток агрегата в a ;

A — коэффициент относительного наклона внешней характеристики агрегата, зависящий от схемы выпрямления тока;

$u_{\kappa}\%$ — напряжение короткого замыкания трансформатора в %;

U_0 — напряжение на шинах выпрямленного тока при холостом ходе в a ;

n — число работающих агрегатов.

Дополнительное снижение напряжения на стороне выпрямленного тока из-за потерь напряжения в индуктивном сопротивлении первичной питающей сети

$$\Delta U'' = \frac{I}{I_n n_0} A \frac{n_0 S_n}{S_{\kappa.з}} U_0,$$

где S_n — номинальная мощность первичной обмотки трансформатора преобразовательного агрегата;

$S_{\kappa.з}$ — мощность короткого замыкания на шинах, от которых получают питание преобразовательные агрегаты (т. е. на сборных шинах высшего напряжения, а в случае двойной трансформации на вторичной стороне понизительных трансформаторов);

n_0 — число агрегатов рабочей мощности.

Таким образом, общее снижение напряжения на шинах выпрямленного тока при некоторой нагрузке подстанции I составит

$$\Delta U = \frac{I}{n_0 I_n} A \left(\frac{u_{\kappa}\%}{100} \cdot \frac{n_0}{n} + \frac{n_0 S_n}{S_{\kappa.з}} \right) U_0.$$

Отсюда внутреннее сопротивление подстанции и питающей системы может быть представлено в виде:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} = \frac{U_0}{n_0 I_n} A \left(\frac{u_{\kappa}\%}{100} \cdot \frac{n_0}{n} + \frac{n_0 S_n}{S_{\kappa.з}} \right). \quad (206)$$

Величина коэффициента A для обычно применяемых на тяговых подстанциях схем выпрямления (с уравнительным реактором или трехфазной мостовой) составляет 0,5.

Величина $u_k\%$ для трансформаторов питающих агрегатов колеблется в сравнительно узких пределах (от 7 до 10%).

При напряжениях выпрямленного тока 825 в и ниже следует дополнительно учитывать потери напряжения в активных сопротивлениях линии и трансформаторов.

В этом случае вместо величины $A \frac{u_k\%}{100}$ следует подставлять

$$A \frac{u_k\%}{100} + \frac{\Delta P_m\%}{100} + \frac{\Delta P_l\%}{100} \cdot \frac{n}{n_0},$$

где ΔP_m и ΔP_l — соответственно потери в меди трансформатора и линии в % при номинальном режиме.

Ток в фидерах подстанций при коротком замыкании в контактной сети.
При проектировании системы энергоснабжения производится расчет токов короткого замыкания и выбор схемы защиты. Прежде всего определяется возможность обеспечения защиты при помощи фидерных выключателей. При этом для определения токов уставки автоматов следует рассматривать короткое замыкание возле смежной подстанции. Если сравнение минимальных токов короткого замыкания с максимальным рабочим не обеспечивает выполнение условия (204), то следует выбрать дополнительную схему защиты. Вопрос о расчетном месте короткого замыкания решается для каждого типа защиты. Например, при применении блокировки автоматов смежных подстанций расчетным местом короткого замыкания будет середина фидерной зоны.

При выборе схемы защиты при помощи постов секционирования определение тока короткого замыкания можно вести в предположении, что сначала отключается выключатель секционного поста, питающий поврежденный участок, а затем уже соответствующий выключатель подстанции.

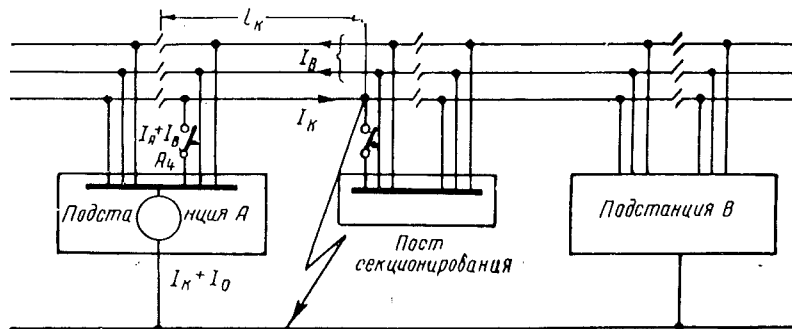


Рис. 181. Схема питания места короткого замыкания при отключении выключателя поста секционирования

Если положить, что поврежденный участок со стороны секционного поста уже отключился, то получим расчетную схему (рис. 181). При такой схеме ток, протекающий через выключатель A_4 , очевидно, будет равен сумме токов I_A и I_B . Последний будет протекать по проводам неповрежденных путей от подстанции В через шины подстанции А.

Ток I_B представляет по сравнению с током I_A незначительную величину, а с другой стороны, так как разность напряжений на подстанциях (определяющая появление тока I_B) является функцией не только тока короткого замыкания, но и тока нагрузки, то ток I_B (как и ток других смежных подстанций) обычно в расчет не принимается.

При таком условии расчетная схема получает весьма простой вид (рис. 182), одинаковый для участка с постом секционирования или без него с любым количеством путей (так как рассматриваются провода только одного пути).

Некоторую сложность представит учет влияния нагрузок на зонах питания остальных фидеров данной подстанции на ее напряжение.

Схема рис. 182, а может быть преобразована к виду, показанному на рис. 182, б, и соответственно может быть написано выражение

$$U_0 = (I_0 + I_k) \cdot (\rho + R_{\phi 2}) + [(r_k + r_p) l_k + R_{\phi 1}] I_k + e_d,$$

здесь U_0 — напряжения холостого хода подстанции в в;

I_0 — ток подстанции от поездов на неповрежденных секциях зоны в а;

I_k — ток короткого замыкания в а;

ρ — внутреннее сопротивление подстанции в ом;

r_k — сопротивление проводов контактной сети поврежденного пути в ом/км;

r_p — сопротивление рельсов ряда параллельно соединенных путей в ом/км;

l_k — расстояние от подстанции до места короткого замыкания в км;

$R_{\phi 1}$, $R_{\phi 2}$ — сопротивления питающего и отсасывающего фидеров в ом;

e_d — потеря напряжения в дуге в в.

В приведенной схеме для упрощения не учитывается влияние подстанций, расположенных на соседних участках. Такое допущение является обычным,

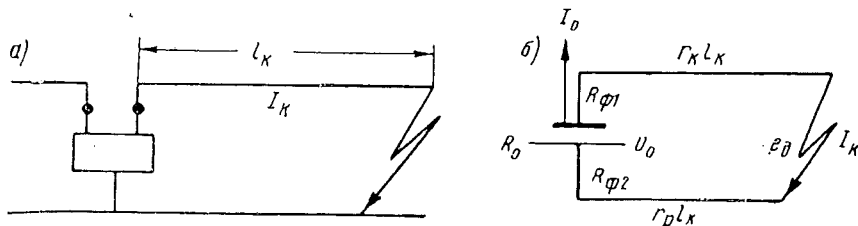


Рис. 182. Упрощенное изображение схемы рис. 181

так как оно несколько увеличивая надежность защиты, не дает при централизованном питании заметной погрешности и значительно упрощает задачу.

Обычно еще принимают во внимание возможное понижение напряжения источника энергии на $p\%$. Тогда

$$U_0 \left(1 - \frac{p}{100} \right) = (I_0 + I_k) (\rho + R_{\phi 2}) + [(r_k + r_p) l_k + R_{\phi 1}] I_k + e_d,$$

откуда

$$I_k = \frac{U_0 \left(1 - \frac{p}{100} \right) - I_0 (\rho + R_{\phi 2}) - e_d}{\rho + R_{\phi 1} + R_{\phi 2} + (r_k + r_p) l_k}. \quad (207)$$

Для того чтобы получить возможность пользоваться приведенной формулой, необходимо условиться о выборе величины I_0 . Не следует, конечно, ориентироваться на случайные пики нагрузки, так как продолжительность их ничтожна и вероятность совпадения с ними момента короткого замыкания весьма незначительна.

Следовательно, по нагрузке наиболее тяжелым будет режим интенсивного движения, особенно, если нагрузка подстанции превышает номинальную нагрузку. Однако в это время будет нагрузка и на поврежденном пути, которая добавится к току короткого замыкания, что облегчит условия защиты.

Часто принимают нагрузку $I_0 = I_n n$. В том случае, когда считают, что при коротком замыкании включены все рабочие агрегаты, т. е.

$$I_0 = I_n n_0,$$

то можно принять, что

$$U_0 \left(1 - \frac{p}{100} \right) - I_0 n_0 \rho \approx U_n \left(1 - \frac{p}{100} \right);$$

и вместо формулы (207) получим

$$I_k = \frac{U_n \left(1 - \frac{p}{100} \right) - I_n n_0 R_{\phi 2} - e_d}{\rho + R_{\phi 1} + R_{\phi 2} + (r_k + r_p) l_k}. \quad (207')$$

Таким же образом производится расчет тока короткого замыкания при блокировке автоматов и при защите только фидерными выключателями. Различие имеется лишь в выборе величины l_k .

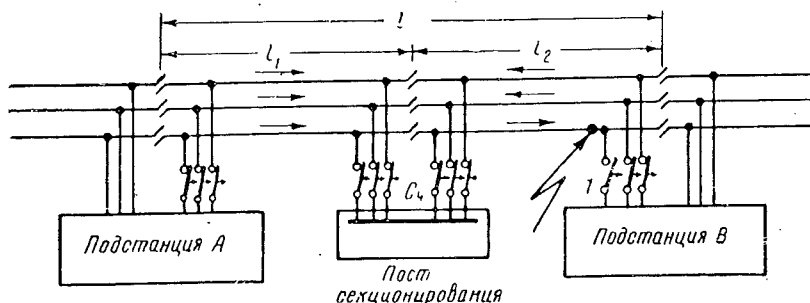


Рис. 183. К расчету установки выключателя поста секционирования

Иногда нагрузка на неповрежденных путях не учитывается. Это обосновывается прежде всего тем, что снижение напряжения от этой нагрузки сравнительно невелико. С другой стороны, если эта нагрузка по усло-

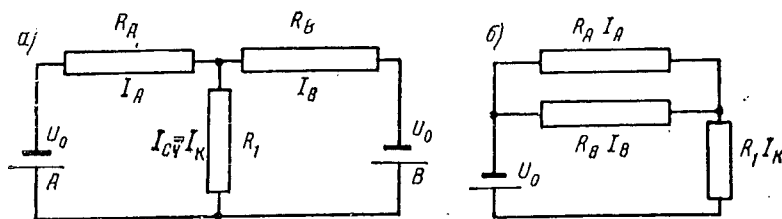


Рис. 184. Приведенная схема многопутного участка с одним постом секционирования

виям работы участка невелика, то ее влияние вполне компенсируется запасом, создаваемым за счет питания короткого замыкания от других подстанций. Если общая нагрузка значительна, то вероятность полного отсутствия нагрузки на участке, где рассматривается короткое замыкание, весьма мала. При наличии же нагрузки на рассматриваемом участке через выключатель, защищающий поврежденный участок, будет протекать сумма токов от нагрузки и тока короткого замыкания, что практически скомпенсирует влияние нагрузки на неповрежденных путях.

Для выбора тока установки выключателей необходимо, как указано выше, определить максимальный рабочий ток данного выключателя. Эта величина определяется на основании соображений, данных в § 17 и 18, а также в главе VII.

Ток в фидерах постов секционирования при коротком замыкании в контактной сети. В схеме многопутного участка с одним постом (рис. 183) наи-

меньшая величина тока короткого замыкания, которая определит уставку выключателя поста, например C_4 , получится при коротком замыкании у подстанции B .

При выбранном месте короткого замыкания ток выключателя I подстанции B (выключатель показан разомкнутым), отрегулированный на ток короткого замыкания у поста секционирования, отключится, и к месту короткого замыкания ток будет протекать в направлениях, показанных стрелками. Выключатель C_4 должен быть отрегулирован на суммарный ток, который будет протекать через него при такой схеме.

Рассматриваемую схему можно привести к виду рис. 184, а. На этой схеме:

$$\left. \begin{aligned} R_A &= \frac{r_k l_1}{S} + \frac{r_p l}{S} + \rho_A + \frac{R_{\phi A1}}{S} + R_{\phi A2}; \\ R_B &= \frac{r_k l_2}{S-1} + \rho_B + \frac{R_{\phi B1}}{S-1} + R_{\phi B2}; \\ R_1 &= r_k l_2, \end{aligned} \right\} \quad (208)$$

где S — число путей на участке;

$R_{\phi A1}$ — сопротивление одного питающего фидера подстанции A в ом;

$R_{\phi B1}$ — то же подстанции B в ом;

$R_{\phi A2}$ — сопротивление отсасывающего фидера подстанции A в ом;

$R_{\phi B2}$ — то же подстанции B в ом.

Остальные обозначения те же, что и выше.

Если сопротивления проводов или фидеров отдельных путей не равны между собой, то следует частные $\frac{r_k}{S}$, $\frac{R_{\phi A1}}{S}$, а также $\frac{r_k}{S-1}$ и $\frac{R_{\phi B1}}{S-1}$ заменить соответствующими сопротивлениями.

Оба источника энергии имеют одно и то же напряжение и один и тот же потенциал у минуса, так как согласно схеме рис. 184, а они соединены (внизу) проводом, не имеющим сопротивления, поэтому можно один источник энергии наложить на другой, т. е. придать схеме вид рис. 184, б; тогда сопротивление короткого замыкания представится формулой

$$R_k = \frac{R_A R_B}{R_A + R_B} + R_1,$$

и соответственно ток короткого замыкания для выключателя C_4

$$I_k = \frac{U}{R_k} = \frac{U(R_A + R_B)}{R_A R_B + R_1 R_A + R_1 R_B}, \quad (209)$$

приняв с некоторым запасом напряжение на шинах подстанции равным

$$U = U_n \left(1 - \frac{p}{100} \right),$$

получим

$$U = U_n \left(1 - \frac{p}{100} \right) - \Delta U_1 - e_d,$$

где ΔU_1 — потеря напряжения в контуре короткого замыкания от нагрузок на неповрежденных путях.

§ 55. ЗАЩИТА ОТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО УРОВНЮ НАПРЯЖЕНИЯ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Потенциальная защита. Эта защита также применяется в случае, если выполняется условие (204).

Описываемая схема была предложена и применялась на Московском метрополитене.

Между контактным и ходовым рельсами через потенциометр (рис. 185) или добавочное сопротивление приключается потенциальное реле. При нормальном режиме работы напряжение на потенциальном реле, как правило, не падает ниже определенной величины. Если же недалеко от места расположения потенциометра возникает короткое замыкание, то напряжение на потенциометре, а следовательно, и на реле падает; реле отпадает и обеспечивает отключение соответствующего фидерного выключателя.

На участках, оборудованных автоблокировкой, присоединение потенциометров к рельсам должно быть произведено через путевые дроссели или, если место расположения потенциометра не совпадает с местом расположения путевых дросселей, — через специальное дополнительное сопротивление, включенное между нитями рельсов.

Выбор установки потенциального реле производят в зависимости от распределения напряжения по линии при коротком замыкании.

Если l — расстояние между фидерами Φ_A и Φ_B (рис. 186) соответствующих подстанций, а $U_{\Phi A}$ и $U_{\Phi B}$ — напряжение в этих точках, то распределение напряжения по линии при наиболее удаленном коротком замыкании представится прямыми a и b . Если принять, что в месте короткого замыкания возникнет дуга с напряжением e_d , то изменение напряжения по линии будет происходить от соответствующего U_{Φ} до e_d по закону прямой.

На рис. 186 прямая a соответствует короткому замыканию у фидера Φ_B , а прямая b — ко-

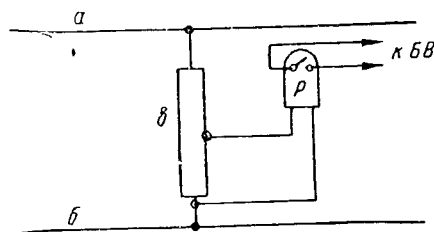


Рис. 185. Схема включения потенциального реле для защиты от недостаточных по величине токов короткого замыкания:

a — контактный провод (или контактный рельс); $б$ — ходовой рельс; $с$ — потенциометр; $р$ — потенциальное реле

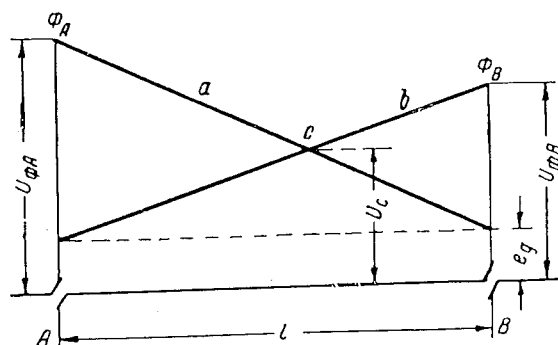


Рис. 186. График распределения напряжения по линии при коротком замыкании (для выбора настройки потенциального реле)

роткому замыканию у фидера Φ_A . Точка пересечения прямых C смещена в сторону конца линии с меньшим потенциалом у фидера.

Точка C определяет место расположения реле потенциальной защиты и настройку потенциального реле, которая должна быть несколько выше U_c , а последняя должна быть ниже возможных напряжений в данном месте контактной сети в рабочих условиях. При коротком замыкании в какой-либо другой точке участка линия a (или b) пойдет круче и напряжение U_c будет ниже, следовательно, реле отпадает.

Если при расчете принимается во внимание возможность выпадения из работы одной из подстанций, то при этом длина участка AB станет равной сумме длин двух смежных участков. Соответственно этому должна выбираться и настройка потенциальных реле.

Защита при помощи вольтметровой блокировки. Эта защита применяется также в случаях, когда при коротком замыкании в удаленной точке ток, протекающий через выключатель фидера, недостаточен для его отключения [33, 34].

При рассматриваемой схеме на подстанциях к фидерам, питающим данную зону, присоединяются реле минимального напряжения (рис. 187) (предложение доц. К. Г. Кучмы).

Через контакты этих реле питается вспомогательное реле, контакты которого (нормально замкнутые) при помощи соединительных проводов включены в цепь держащей катушки выключателя смежной подстанции.

При коротком замыкании у подстанции *В* выключатель *В*₁ отключится, а выключатель *А*₂ останется включенным, так как ток короткого замыкания недостаточен для его отключения. При этом напряжение в контактной сети (КС) около места короткого замыкания, т. е. вблизи от подстанции *В*, будет близко к нулю. Вследствие этого реле напряжения *РН* замыкает блок-контакты отключившегося выключателя подстанции *В* и через цепь, состоящую из соединительных проводов 3, блок-контакты 2 неотключившегося выключателя

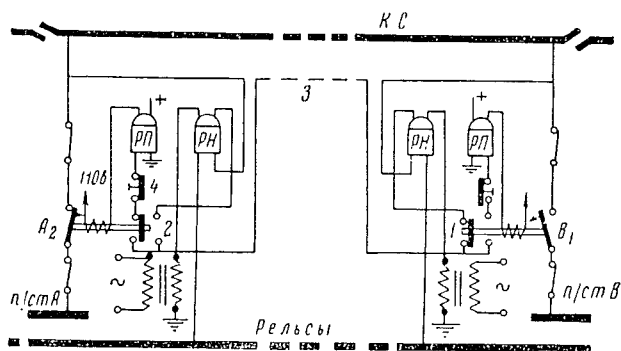


Рис. 187. Схема защиты при помощи вольтметровой блокировки

включения выключателей, т. е. когда в контактной сети напряжение равно нулю, цепь блокировки размыкается, чтобы не вызвать немедленного отключения автомата от реле напряжения. По данным эксплуатации, эта система обеспечивает четкую защиту от малых токов коротких замыканий. Недостатком этой схемы является необходимость подвески специальных проводов и зависимость ее работы от их состояния.

§ 56. ЗАЩИТА ОТ ТОКОВ КОРотКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО СКОРОСТИ НАРАСТАНИЯ ИЛИ ПО БРОСКУ ТОКА¹

Некоторые типы выключателей снабжаются так называемым индуктивным шунтом. Индуктивный шунт обычно представляет по конструкции медную шину, на которой размещены пакеты листовой стали. Число пакетов может быть изменено, благодаря чему будет изменена и индуктивность шунта, включаемого параллельно размагничивающему витку.

Омическое сопротивление шунта значительно ниже омического сопротивления витка, а индуктивность, наоборот, много выше, что приводит к различному распределению тока между витком и шунтом при различных скоростях нарастания тока.

Так как скорость нарастания тока короткого замыкания почти во всех случаях значительно выше скоростей нарастания тока различных рабочих режимов например, при включениях и переключениях тяговых двигателей, то при коротком замыкании токи, протекающие через размагничивающий виток, будут значительно большими, нежели токи в витке при рабочих режимах. Такое соотношение токов в витке может иметь место и в тех случаях, когда установившееся значение тока короткого замыкания получается меньше рабочего тока.

На рис. 188 линией *а* показана кривая нарастания тока короткого замыкания в наиболее удаленной точке зоны, а линией *б* — кривая части этого тока, протекающего через размагничивающий виток выключателя. Ток короткого замыкания, нарастая, изменяется от нуля до некоторого установившегося значения $I_{к\max}$, в то время как ток в витке уже в момент t'

¹ § 56 и 57 написаны автором совместно с доцентом В. Н. Пупыным.

получает максимальное значение $I'_{к\max}$, которое больше установившейся величины $I'_{к1}$. Если максимальный ток нагрузки может также достигать значений $I_{н\max}$, равных $I_{к\max}$, и при достижении этого значения нарастание происходит достаточно медленно, то, очевидно, часть тока, протекающего через виток, будет равна $I'_{н1} = I'_{к1}$. Если дать выключателю среднюю уставку по величине между токами $I'_{к1}$ и $I'_{к\max}$, то он будет отключать токи короткого замыкания, равные и даже несколько меньшие токов нагрузки.

Однако некоторые изменения нагрузки на участке (например, изменение режима работы электровозов) дают нарастание нагрузки также со значительной скоростью. При выборе тока уставки следует рассматривать, как и ранее, короткое замыкание в наиболее удаленной точке участка, ориентируясь на наименьший ток, протекающий через размагничивающий виток при коротком замыкании. При рассмотрении наиболее тяжелых случаев расположений поездов необходимо принимать во внимание положения, дающие наибольший ток в этом витке.

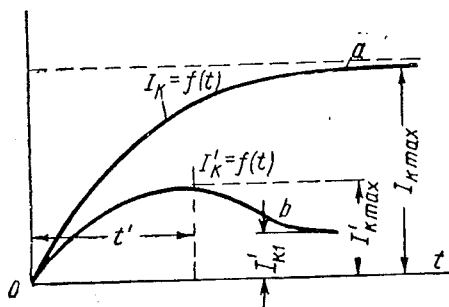


Рис. 188. Кривые нарастания тока короткого замыкания в сети и в отключающей петле выключателя:

a — кривая тока в сети; b — кривая тока в петле

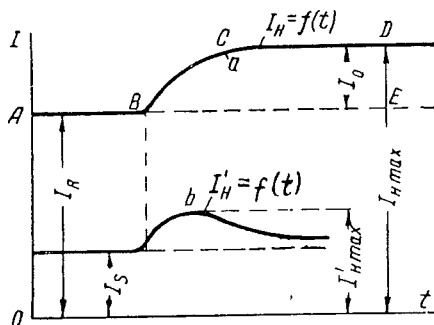


Рис. 189. Кривые нарастания тока нагрузки в сети и в отключающей петле: a — кривая тока в сети; b — кривая тока в петле

На рис. 189 линия AB представляет ток, протекающий через быстродействующий выключатель до изменения нагрузки, а линия BCD — во время и после ее изменения. При постоянном значении тока он будет распределяться между размагничивающими витком и шунтом в соответствии с их омическими сопротивлениями. Переменная же часть тока нагрузки, которая характеризуется отрезком BC , будет распределяться в соответствии с омическими и индуктивными сопротивлениями витка и шунта.

Для получения нормальных условий работы необходимо, чтобы значения $I'_{к\max}$ при наиболее неблагоприятном коротком замыкании и $I'_{н\max}$ (рис. 188 и 189) были связаны неравенством

$$I'_{к\max} \geq \alpha I'_{н\max},$$

где $I'_{н\max}$ — максимальное значение тока, протекающего через размагничивающий виток, при работе по нормальному графику движения; α — коэффициент запаса (больше единицы).

Уставка быстродействующего выключателя должна быть выше $I'_{н\max}$ и ниже $I'_{к\max}$. При таком токе уставки любое предусмотренное заданным графиком движения сочетание нагрузок не вызовет срабатывание автомата, а токи короткого замыкания при коротком замыкании в любом месте участка будут отключены.

Понятие «уставка выключателя», естественно, здесь не может иметь прежнего значения, так как ранее оно относилось к току, протекающему по линии, т. е. к суммарному току. Если выключение происходит при заданном токе в размагничивающем витке, то при выключателе с индуктивным шунтом суммарная величина тока зависит еще и от скорости его нарастания. Поэтому

под током уставки часто понимается ток установившегося режима, дающий в размагничивающем витке ток, необходимый для отключения быстродействующего выключателя.

При таком определении тока уставки (т. е. если принимать во внимание лишь омическое сопротивление витка и шунта) уставка быстродействующего выключателя получается часто больше установившегося значения тока короткого замыкания.

Если скорость нарастания тока нагрузки при переходе тяговых двигателей с одного режима работы на другой меньше скорости нарастания тока короткого замыкания, то выключатель с индуктивным шунтом сохраняет полностью свои преимущества. Если же скорость нарастания тока короткого замыкания ниже, то в отдельных случаях все же могут быть использованы преимущества такого выключателя. Это будет зависеть от величины нарастания тока (ED на рис. 189) и чем меньше будет нарастающая часть нагрузки (относительно всей нагрузки), тем большие преимущества будет иметь выключатель с шунтом.

Допустим, что нарастающая часть тока нагрузки I_0 будет иметь скорость нарастания, близкую к бесконечной, тогда вся нарастающая часть тока пойдет через размагничивающий виток. Однако, если эта часть невелика, то в сумме с составляющей тока I_s в размагничивающем витке от постоянной слагающей тока нагрузки I_R она может дать меньшее значение, чем $I_{K \max}$ (рис. 188).

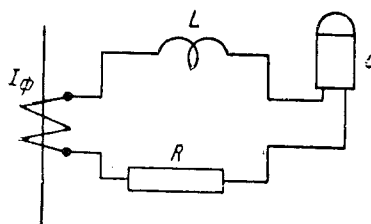


Рис. 190. Принципиальная схема защиты от токов короткого замыкания по скорости нарастания или броску тока

Общая характеристика защиты по скорости нарастания и броску тока. Рассмотрим схему рис. 190. Рабочий ток в фидере I_ϕ протекает по первичной обмотке трансформатора тока. Вторичная обмотка его замкнута на реле. Индуктивность и активное сопротивление контура в основном определяются постоянными

трансформатора. При необходимости может быть введена в контур еще и дополнительная индуктивность.

При изменении главного тока I_ϕ во вторичном контуре возбуждается э. д. с.

$$e = -M \frac{dI}{dt}, \quad (a)$$

где M — коэффициент взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками.

Эта э. д. с. вызывает во вторичном контуре ток i . Для этого контура может быть написано уравнение

$$e = iR_k + L_k \frac{di}{dt}, \quad (б)$$

где R_k и L_k — постоянные контура.

Приравняв выражение (б) выражению (а), получим

$$iR_k + L_k \frac{di}{dt} = -M \frac{dI}{dt}. \quad (в)$$

Разделив правую и левую части выражения (в) на R_k и заменив величину $\frac{L_k}{R_k}$ постоянной времени T_k , получим

$$i + T_k \frac{di}{dt} = -\frac{M}{R_k} \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (210)$$

Выражение (210) позволяет оценить влияние параметров схемы на характер ее работы. Можно подобрать постоянные контура так, чтобы постоянная времени этого контура была столь мала, что второй член левой части равенства оказался бы во много раз меньше первого.

При таких условиях без особой погрешности можно пренебречь этим членом. Тогда выражение (210) примет вид:

$$i = -\frac{M}{R_k} \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (211)$$

Из этого уравнения видно, что ток в этом контуре i оказывается пропорциональным скорости нарастания главного тока $\frac{dI}{dt}$.

Такая схема будет работать сходно с описанной выше работой выключателя с индуктивным шунтом. Разница будет лишь в том, что в данном случае величина постоянной составляющей главного тока не окажет никакого влияния на работу защиты. Характер кривой тока в контуре тот же, что и в петле выключателя с индуктивным шунтом, но только из-за отсутствия постоянной составляющей этот ток падает до нуля (рис. 191). Как видно из рис. 191, при одном и том же броске тока ΔI максимум тока i в контуре падает с уменьшением скорости нарастания главного тока I .

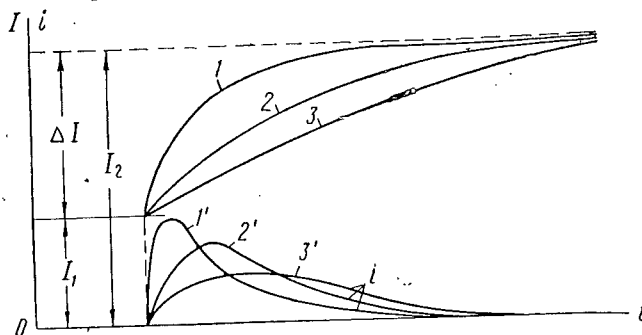


Рис. 191. Кривые изменения тока в контуре при настройке на скорость нарастания

Если же подобрать постоянные контура так, чтобы постоянная времени его оказалась столь большой, что можно, наоборот, пренебречь первым членом левой части уравнения (210), то мы получим его в виде:

$$T_k \frac{di}{dt} = -\frac{M}{R_k} \cdot \frac{dI}{dt},$$

или, разделив на T_k и заменив $T_k R_k = L_k$, получим

$$\frac{di}{dt} = -\frac{M}{L_k} \cdot \frac{dI}{dt}, \quad (г)$$

или

$$\frac{di}{dt} = A \frac{dI}{dt}, \quad (д)$$

где A — постоянная величина.

Отсюда найдем интересное нас значение [тока i .

Проинтегрируем выражение (д) в пределах значений главного тока от I_1 до I_2 . Тогда

$$i = A \int_{I_1}^{I_2} dI = A \Delta I, \quad (212)$$

где ΔI есть бросок — приращение тока I .

Таким образом, при этих условиях ток в контуре пропорционален броску тока, а не скорости его приращения. Кривая тока в контуре может быть

построена по точному уравнению (210). Характер ее и в этом случае остается тот же, что и на рис. 191. Однако существенная разница здесь в том, что максимальное значение тока i в контуре остается практически постоянным, т. е. не зависит от скорости его нарастания (рис. 192).

Кроме рассмотренной схемы, предложен еще ряд схем, работа которых описывается уравнениями того же вида, что и приведенные выше. Некоторые из этих схем будут рассмотрены ниже. Здесь важно отметить, что во всех случаях при достаточно большой постоянной времени контура защиты защита будет реагировать на бросок тока, а не на скорость его нарастания. В дальнейшем будем называть такую защиту импульсной.

В специальных работах [35] показано, что для правильной работы импульсной защиты необходимо выполнить соотношение

$$T_k \gg T_c,$$

где T_c — постоянная времени контура короткого замыкания в контактной сети.

Кроме импульсной защиты, на бросок тока реагирует и так называемая баллистическая защита. Она не требует большой постоянной времени кон-

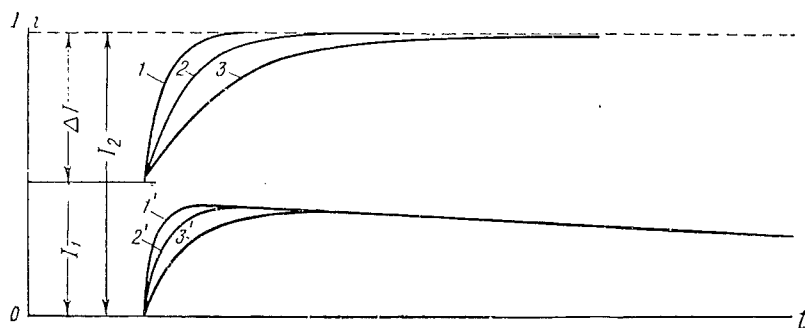


Рис. 192. Кривые изменения тока в контуре при настройке на бросок тока

тура защиты, но может быть осуществлена только при применении в схеме рис. 190 так называемого баллистического реле, которое реагирует не на ток, а на количество электричества q , протекшего через реле за время нарастания тока от значения I_1 до I_2 .

При малой постоянной времени контура реле можно, воспользовавшись уравнением (211), получить

$$q = \int_{I_1}^{I_2} i dt = -\frac{M}{R_k} \int_{I_1}^{I_2} dI = -\frac{M}{R} \Delta I. \quad (212')$$

Из уравнения (212') видно, что баллистическая защита также будет реагировать на ΔI . Недостатком баллистической защиты по сравнению с импульсной является то, что она по своей природе не может быть быстродействующей, так как требует использования реле с большой инерцией.

Практика показывает, что величина приращения тока, как правило, при нагрузке меньше, чем при коротком замыкании, тогда как скорость нарастания может быть у тока короткого замыкания и меньше. Поэтому защита, построенная на измерении броска тока, дает более надежную работу, чем защита, построенная на измерении скорости нарастания тока.

Остановимся на рассмотрении некоторых режимов работы участка, при которых возможно приращение тока. Если предположить, что число электровазов на линии не меняется (т. е. что изменение нагрузки может возникнуть лишь за счет изменения режима работы одного или нескольких электровазов), то увеличение нагрузки может получиться за счет:

1) включения двигателей при трогании с места, включения в ходу, увеличения нагрузки, связанного с изменением профиля;

2) переключения двигателей со схемы последовательного соединения на параллельное (или на последовательно-параллельное).

В первом случае увеличение тока происходит в тяговых двигателях и начальная скорость нарастания его определяется их индуктивностью (главным образом индуктивностью их полюсных катушек). Во втором случае нарастание тока будет зависеть от применяемой схемы переключения двигателей. Так, при способе переключения двигателей коротким замыканием (рис. 193, а) ток до включения контактора K имел величину I_1 (последовательное соединение), при включении же контактора K (рис. 193, б) появляется ток в реостате. Но так как увеличение тока происходит в цепи, куда включено два двигателя (где теперь протекает ток $I_1 + I_2$), то и скорость его нарастания определяется их индуктивностью. Следовательно, и здесь начальная скорость нарастания тока определяется индуктивностью двигателя. При схеме переключения двигателей способом мостика (рис. 193, в) ток до включения контакторов K_1 и K_2 протекает лишь через двигатели (ток I_1), после же их включения (рис. 193, г) в линии ток увеличивается и становится равным $I_1 + I_2$. Нарастание тока происходит за счет включения реостатов, т. е. цепи, практически не обладающей индуктивностью, поэтому скорость нарастания тока получается большей.

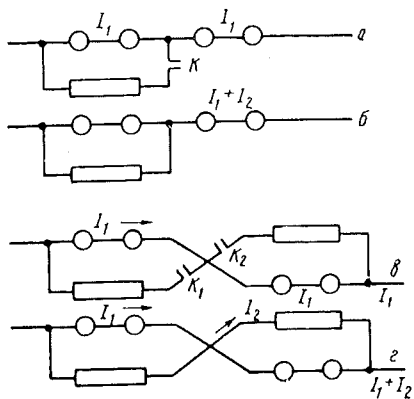


Рис. 193. Принципиальные схемы переключения двигателей локомотива:
а и б — при способе короткого замыкания;
в и г — при способе мостика

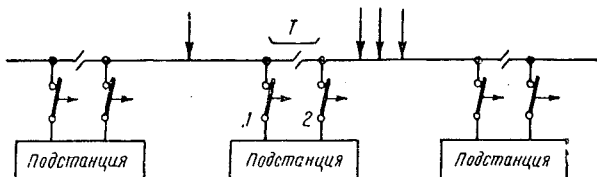


Рис. 194. К работе защиты, реагирующей на скорость нарастания тока при перекрытии секционного разъединения у подстанции токоприемником T поезда

Остановимся на рассмотрении другого случая, дающего резкое увеличение тока в фидерных выключателях (рис. 194). Здесь показаны две смежные фидерные зоны, питаемые от трех подстанций. Одна из крайних подстанций может и отсутствовать, т. е. один из участков можно считать имеющим одностороннее питание. Такое предположение не повлияет на приводимые ниже рассуждения.

Предположим, что на одной фидерной зоне нагрузка значительно выше, чем на другой, поэтому фидер 2 несет значительно большую нагрузку, чем фидер 1. Если в такой момент токоприемник T одного из электропоездов замкнет секционное разъединение, то нагрузка в выключателях должна выравняться. Выравнивание нагрузки будет сопровождаться увеличением тока в фидере 1. Так как ни в линии, ни в двигателях ток изменяться не будет, то нарастание тока будет почти мгновенным.

При этом проезд секционного разъединения может сопровождаться не только большой скоростью нарастания тока, но и значительным приращением его величины.

Для устранения ложных срабатываний (т. е. при отсутствии короткого замыкания) в таких случаях было предложено [35] ставить дополнительное блокировочное импульсное реле на отсасывающей линии. Смысл такой блокировки состоит в том, что отключение выключателя становится возможным только при срабатывании двух реле — на фидере и отсасывающей линии.

Такое положение возможно при коротком замыкании и невозможно при проходе поездом секционного разъединения с включенными двигателями, так как в последнем случае ток в отсасывающей линии не изменится и, следовательно, реле не сработает.

Практика показала, что защита, основанная на различии в скоростях нарастания токов короткого замыкания и нагрузки, не дает в ряде случаев надежного решения. Более надежной оказывается защита, построенная на различии в бросках (приращениях) токов нагрузки и короткого замыкания.

Пусть до момента переключения двигателей электровоза с одного соединения на другое (рис. 195) ток по фидеру подстанции был равен I_1 , а после переключения очень быстро достиг величины I_2 . В этом случае можно

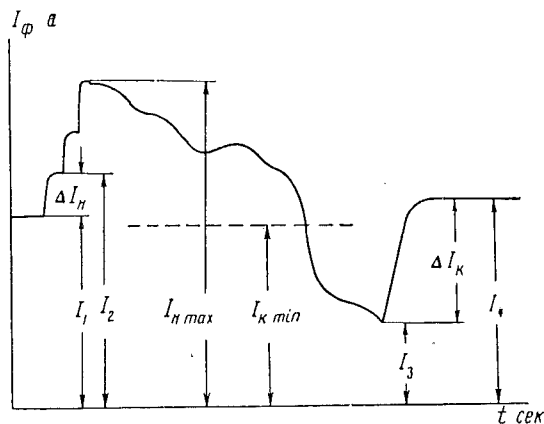


Рис. 195. Кривая изменения тока фидера

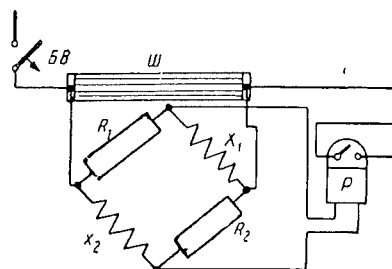


Рис. 196. Схема защиты участка по способу мостика:

X_1 и X_2 — плечи, обладающие активным и индуктивным сопротивлением; R_1 и R_2 — плечи, обладающие только активным сопротивлением; P — реле; $БВ$ — быстродействующий выключатель; $Ш$ — шунт

сказать, что скачок тока, сопровождающий переход локомотива с одного соединения двигателей на другое, равен

$$I_2 - I_1 = \Delta I_n.$$

При аварийных режимах скачки тока в фидере возникают в момент короткого замыкания и при отключении соседней подстанции от перегрузки. Так, если до короткого замыкания в линии ток был I_3 , а после короткого замыкания он вырос до величины I_4 , то можно сказать, что скачок тока в фидере, вызванный коротким замыканием, равен

$$I_4 - I_3 = \Delta I_k.$$

Если импульсное реле, реагирующее на величину скачка тока, отстроить от нагрузочного скачка тока, дав ему уставку ΔI_y , превышающую скачок тока ΔI_n , но меньшую, чем скачок тока ΔI_k , т. е. если принять

$$\Delta I_n < \Delta I_y < \Delta I_k, \quad (213)$$

то в таком случае, несмотря на то, что

$$I_{k \min} \leq I_{n \max},$$

реле будет срабатывать только при коротком замыкании в сети.

Принципиально возможно любую из защит, работающих по скорости нарастания тока, свести к защите по броску тока. Для этой цели следует только соответствующим образом изменить постоянные защитного устройства. Однако конструктивно при выключателях с шунтом это очень затруднительно. Поэтому в защитах, построенных на измерении броска тока, используют иные принципы.

Защита по схеме мостика. Защита по скорости нарастания или по броску тока может быть осуществлена с помощью реле, присоединенного к нескольким сопротивлениям, собранным по схеме мостика (рис. 196).

В защищаемый фидер включен шунт, к которому присоединены два про-

твояположных узла мостика. Во вторую диагональ мостика включено реле. Сам мостик состоит из четырех плеч, два из которых X_1 и X_2 обладают как активным сопротивлением, так и индуктивностью, а два других R_1 и R_2 представляют собой чисто активные сопротивления. Активные сопротивления плеч подбирают таким образом, чтобы при установившемся режиме в цепи рабочего тока мостик был уравновешен, т. е. ток в диагонали, в которую включено реле, не протекал. При неустановившемся режиме равновесие нарушается за счет э. д. с. самоиндукции, возникающей в плечах X_1 и X_2 , и реле обтекается током. Здесь также в зависимости от постоянного контура величина этого тока будет пропорциональна или скорости изменения тока в рабочей цепи, или величине броска тока.

Новые разработки в области импульсной защиты. За последние годы в МИИТе разработан ряд схем импульсной защиты, в которых для создания большой постоянной времени используются емкости, индуктивности или короткозамкнутые катушки, тормозящие изменение магнитного потока в специальном реле.

Ниже приводится описание одного из таких устройств, которое к настоящему времени прошло предварительные эксплуатационные испытания. Основной частью этой защиты является специальное импульсное реле.

На рис. 197 схематически представлена магнитная система такого реле. Она образована раздвоенным направляющим магнитопроводом 1, магнитопроводом реле 2, выполненным из листовой стали, якорем реле Я с пружиной Пр, контактами К и обмотками — управляющей УК, включающей ВК и короткозамкнутой ТК. Реле устанавливается непосредственно на шине защищаемого фидера ЗФ, выполняющей роль первичной обмотки реле.

Нормально якорь реле подтянут к верхнему поясу магнитопровода реле в месте разреза его и удерживается в таком положении потоком Φ_y (тонкая пунктирная линия), вызываемым током i_y катушки управления.

Можно показать, что при конструктивном выполнении магнитной системы реле, представленном на рис. 197, размагничивание и отпадание якоря реле возможно только в момент скачкообразного изменения тока в защищаемом фидере.

Действительно, при неизменном токе фидера I_ϕ — постоянный поток $\Phi(t)$, вызванный этим током, замыкается через каждый из направляющих магнитопроводов и через левый и правый сердечники магнитопровода реле (на рис. 197 показан сплошными линиями). Через якорь реле в этом случае поток $\Phi(t)$ ответвляться не будет ввиду полной симметрии путей двух потоков $\Phi(t)$ по левому и правому стержням магнитопровода реле.

Таким образом, когда ток в фидере неизменен, якорь реле удерживается силой, зависящей от тока первой секции катушки управления (см. рис. 197).

Однако это положение нарушается, как только в цепи защищаемого фидера произойдет резкое изменение (скачок) тока в сторону увеличения его на величину ΔI_ϕ . Этот скачок тока возбudit в левом и правом направляющих магнитопроводах дополнительные потоки $\Delta\Phi(t)$. Правый поток замкнется через правый стержень магнитопровода реле, практически не вызвав противодействия. Левый же пересечет витки короткозамкнутой катушки и наведет в ней ток, который по закону Ленца возбudit поток Φ_k , по направлению обратный потоку $\Delta\Phi(t)$, но равный ему по величине, т. е.

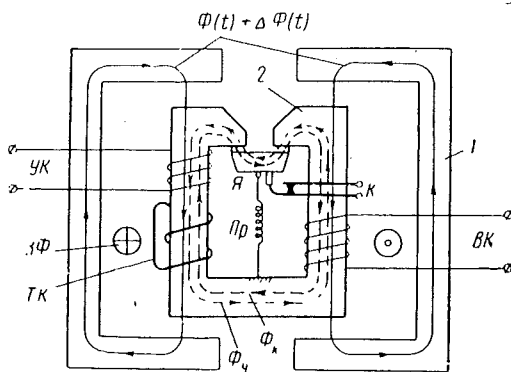


Рис. 197. Принципиальная схема импульсного реле

$$\Phi_k = -\Delta\Phi(t).$$

Этот поток короткозамкнутой катушки замкнется по пути наименьшего сопротивления, т. е. через магнитопровод реле и через якорь, размагничивая его (рис. 197). Сила, с которой удерживается якорь, уменьшается. При достаточно большом уменьшении этой силы якорь реле Я под действием пружины *Пр* отпадает и разрывает цепь держащей катушки быстродействующего выключателя, защищающего фидер.

Необходимо отметить, что указанное выше равенство

$$\Phi_k = -\Delta\Phi(t) = C \Delta I(t),$$

а следовательно, размагничивание якоря реле, пропорциональное скачку тока при различных скоростях нарастания возможно только при выполнении общего для всех импульсных защит условий $T_k \gg T_c$. Постоянная времени рассматриваемой защиты определяет отношение индуктивности короткозамкнутой катушки реле L_k при подтянутом якоре к омическому сопротивлению его R_k , т. е. величина

$$\frac{L_k}{R_k} = T_k \text{ сек.}$$

Для рассматриваемого реле выбрано

$$T_k = 0,4 \div 0,6 \text{ сек} \cong (10 \div 80) T_c.$$

При таких параметрах магнитной системы реле скорость нарастания скачков тока, могущих быть в фидере, практически не влияет на величину приращения (броска) тока $-\Delta I_y$, при котором реле срабатывает.

Уставка реле изменяется с изменением тока i_y в катушке управления УК.

Включающая катушка ВК служит для форсирования потока при возвращении якоря в нормальное рабочее положение после срабатывания реле.

Обмотки катушки управления и включающей катушки питаются от источника постоянного тока 110 в.

Полная схема защиты подстанции (рис. 198) образована импульсными фидерными реле РФ (по количеству фидеров) и одним общим импульсным реле РО, устанавливаемым на отсасывающей линии для предотвращения ложных срабатываний при проходе поезда под током воздушного промежутка.

Смешанные схемы защиты. Кроме рассмотренных схем защиты, на дорогах применяют схемы, построенные на одновременном использовании различных принципов, описанных выше.

Так, например, в схему защиты с постами секционирования вводится и влияние понижения напряжения при коротком замыкании, другими словами, используется то же явление, что и в потенциальной защите. Для этой цели питание держащих катушек выключателей на постах осуществляют от контактной сети. При появлении на линии короткого замыкания напряжение около поста секционирования уменьшается, следовательно,

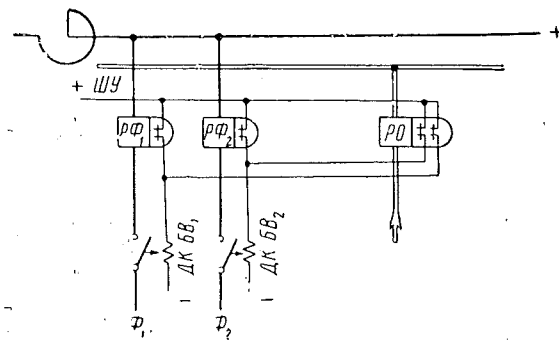


Рис. 198. Полная схема защиты подстанции при помощи импульсных реле

уменьшается и магнитный поток держащей катушки. Таким образом, для отключения быстродействующего выключателя нужен меньший ток в отключающей катушке и поэтому ток уставки быстродействующего выключателя понижается. Особенно сильно сказывается действие такого способа питания держащей катушки при коротком замыкании вблизи поста секционирования.

Выключатель может быть рассчитан так, чтобы магнитная цепь при нормальных условиях работала с высоким насыщением. Тогда ток, который может вызвать отключение, будет мало зависеть от потери напряжения при нормальной эксплуатации, но при потере напряжения сверх предусмотренного максимума он начнет быстро понижаться. Если же нагружены все пути и напряжение сильно снизится, то ток в выключателях поста будет иметь небольшую величину.

При питании держащих катушек выключателей постов от рабочего напряжения для сохранения селективных качеств схемы возникает особая необходимость в применении выключателей поляризованного типа. Действительно, при коротком замыкании у поста секционирования напряжение сильно понижается и уменьшается удерживающая сила держащей катушки. Таким образом, если бы на посту секционирования были применены неполяризованные выключатели, то это привело бы к выпадению всех выключателей поста.

Другим примером одновременного использования в одной схеме различных принципов защиты от токов короткого замыкания является применение блокировки выключателей подстанций и постов секционирования (рис. 199).

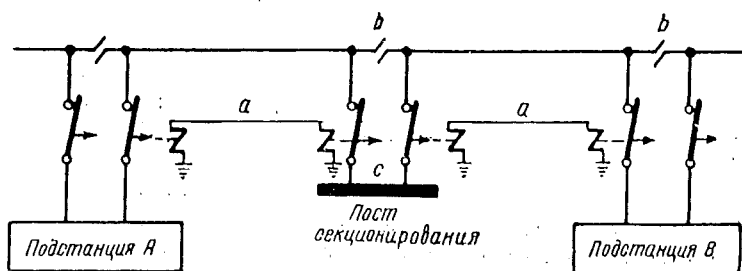


Рис. 199. Схема защиты от недостаточных по величине токов короткого замыкания при помощи блокировки выключателей подстанций и поста секционирования

При этой схеме защиты выключатель подстанции А связывается с одним из выключателей поста С, а выключатель подстанции В — с другим. Применение этой схемы позволит ориентироваться на местоположение короткого замыкания, более близкое к подстанции, и увеличить ток уставки выключателя. При рассматриваемой схеме в poste секционирования на однопутных участках должны находиться два выключателя, так как каждый должен быть связан со своей подстанцией. При одном выключателе необходимо иметь соответствующую релейную схему.

§ 57. ЗАЩИТА ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА УЧАСТКАХ ОДНОФАЗНОГО ТОКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

На фидерах, питающих контактную сеть переменного тока, обычно устанавливают максимальную токовую защиту мгновенного действия. В отдельных случаях, когда тяговые нагрузки фидеров превышают токи коротких замыканий в удаленных точках сети, приходится сооружать посты секционирования или же предусматривать дополнительные специальные защиты. Основное их отличие от постов секционирования на постоянном токе заключается в том, что в качестве выключателей применяются масляные выключатели переменного тока, приводимые в действие пружинно-двигательным или грузовым приводом. Так как сами выключатели не являются автоматическими, то они дополнительно оборудуются релейной защитой, приводящей выключатели поста в действие.

Одна из принципиальных схем поста секционирования двухпутного участка приведена на рис. 200. Выключатели B_1 и B_2 являются в этой схеме продольными, B_3 и B_4 — поперечными.

Такая схема соединения выключателей поста получила название четырехугольника. Основной ее особенностью по сравнению с узловой схемой, широко применяемой в постах постоянного тока, является возможность нормальной работы при выходе из строя одного из выключателей.

Каждый путь оборудован нейтральной вставкой, которые через обходные разъединители P_9 и P_{10} могут быть соединены с секцией сети, расположенной от вставки по направлению движения.

В качестве источника оперативного тока в схеме защиты используются трансформаторы напряжения $TН$. Во избежание повреждения оборудования поста атмосферными перенапряжениями подходы к нему со стороны секций контактной сети защищены разрядниками.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту схемы, применение постов, выполняющих функции защиты, удорожает систему однофазного тока

и связано с большими эксплуатационными неудобствами по обслуживанию оборудования и защитной аппаратуры поста.

Другой защитой контактной сети однофазного тока, применяющейся на дорогах Франции и Японии, является импедансная защита.

Принципиальная схема такой защиты показана на рис. 201. На рис. 202 приведена упрощенная принципиальная схема основного исполнительного органа французского варианта защиты — направленного реле сопротивления.

Рис. 200. Принципиальная схема поста секционирования на двухпутном участке переменного тока

тивления типа МО, по устройству аналогичного реле ИИН-1, выпускаемого ЦЛЭМ Мосэнерго.

Смысл действия схемы заключается в том, что направленное реле сопротивления $РС$ (рис. 201) непрерывно замеряет «сопротивление» линии, равное отношению напряжения U_p на трансформаторе напряжения $TН$ к току i_p , протекающему через трансформатор тока $ТТ$. При снижении сопротивления срабатывает реле последнее срабатывает. Само по себе сопротивление срабатывания реле не есть величина постоянная, так

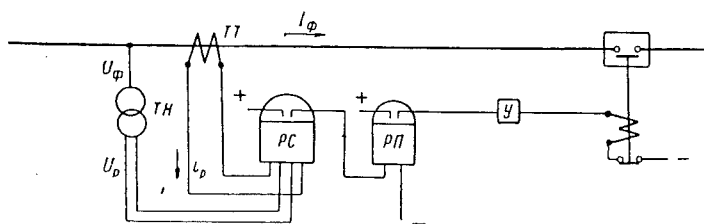


Рис. 201. Принципиальная схема импедансной защиты

как оно зависит от сдвига между током и напряжением, подаваемым на реле. Последнее легко показать, разобрав принципиальную схему реле $РС$ на рис. 202.

На четырехполюсном магнитопроводе размещено три обмотки: обмотка поляризующей цепи напряжения 1, обтекаемая током $i_{нп}$, создающим магнитный поток $\Phi_{нп}$, обмотка удерживающей цепи напряжения 2, обтекаемая током $i_{ну}$, создающим магнитный поток $\Phi_{ну}$, и обмотка цепи тока 3 с током i_p , создающим магнитный поток Φ_m (см. векторную диаграмму).

Причем

$$\Phi_{нп} = c_1 i_{нп} = c_2 U_p; \quad \Phi_{ну} = c_3 i_{ну} = c_4 U_p$$

$$\text{и } \Phi_m = c_5 i_p,$$

где $c_1 — c_5$ — коэффициенты пропорциональности.

Сопротивление удерживающей цепи имеет индуктивный характер, поэтому ток $i_{ну}$ отстает от напряжения U_p на угол $\delta \approx 65^\circ$.

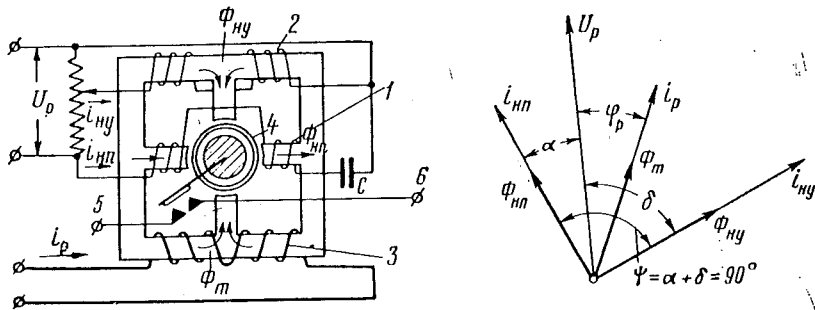


Рис. 202. Принципиальная схема направленного реле сопротивления и векторной диаграммы

В поляризующей цепи напряжения из-за наличия в ней емкости C ток $i_{нп}$ опережает напряжение U_p на некоторый угол α , величина которого подбором емкости доведена до величины

$$\alpha = 90^\circ - \delta,$$

откуда

$$\alpha + \delta = 90^\circ = \psi.$$

Вследствие выбранного расположения обмоток потоки $\Phi_{нп}$ и $\Phi_{ну}$, а также $\Phi_{нп}$ и Φ_m , вызванные токами этих обмоток сдвинуты в пространстве. Так как при этом потоки оказываются еще дополнительно сдвинутыми по фазе, то согласно теории индукционного прибора на подвижную систему реле — алюминиевый барабанчик 4 — пронизываемый этими потоками действуют два момента. Один, так называемый удерживающий,

$$M_{уд} = k_1 \Phi_{нп} \Phi_{ну} \sin \psi = k_2 U_p^2 \sin (\alpha + \delta) = k_2 U_p^2 \quad (214)$$

так как $\sin (\alpha + \delta) = 1$,

и другой, так называемый рабочий,

$$M_{раб} = k_3 \Phi_{нп} \Phi_m \sin (\Phi_{нп} \wedge \Phi_m) = k_4 U_p i_p \cos (\delta - \varphi_p). \quad (215)$$

В момент срабатывания реле $M_{уд} = M_{раб}$, т. е.

$$k_2 U_p^2 = k_4 U_p i_p \cos (\delta - \varphi_p). \quad (216)$$

Поделив обе части равенства (216) на $k_2 U_p i_p$, получим

$$\frac{U_p}{i_p} = \frac{k_4}{k_2} \cos (\delta - \varphi_p) \quad \text{или} \quad Z_{cp} = Z_p \cos (\delta - \varphi_p), \quad (217)$$

где

$$Z_{cp} = \frac{U_p}{i_p} \quad \text{и} \quad Z_p = \frac{k_4}{k_2}.$$

Из уравнения видно, что характеристика реле на комплексной плоскости представляет собой окружность диаметра Z_p (рис. 203); при $\varphi_p = \delta \approx 65^\circ =$

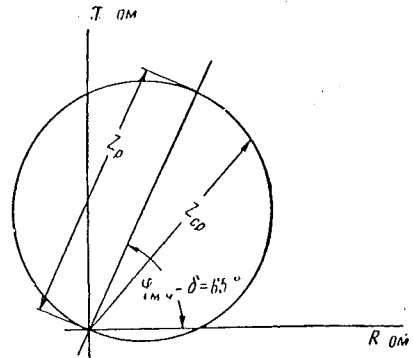


Рис. 203. Характеристика реле

$= \varphi_m$, $\cos(\delta - \varphi_p) = 1$ и реле имеет максимальную чувствительность, т. е.

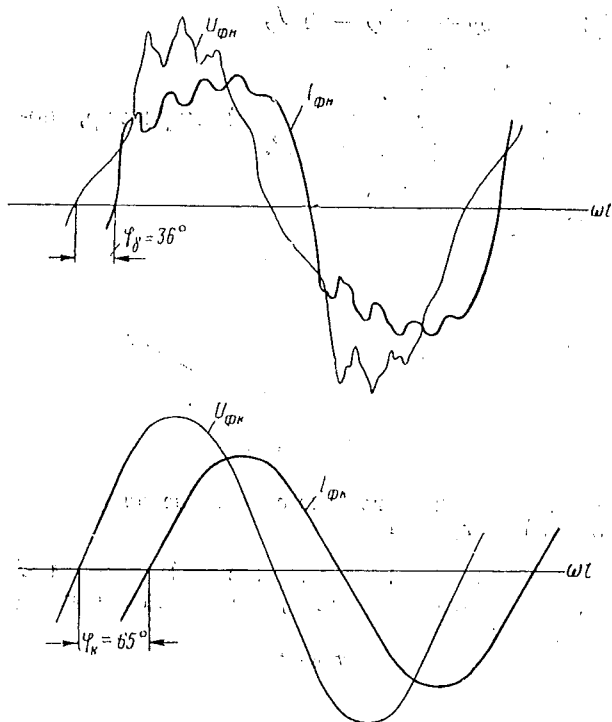


Рис. 204. Осциллограмма тока нагрузки и тока короткого замыкания

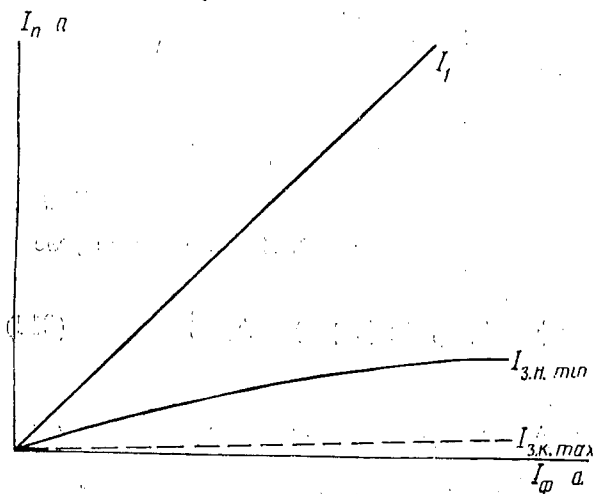


Рис. 205. Кривые изменения третьей гармоники в составе тока фидера при нагрузке и коротком замыкании

го тока с игнитронными преобразователями.

Характер тока нагрузки $I_{\phi н}$ и короткого замыкания $I_{\phi к}$ с небольшой остаточной нагрузкой показан на примере осциллограмм рис. 204, снятых на участке Ожерелье — Павелец.

Как показывает анализ кривых тока подстанции при нагрузке, содержание третьей гармонической тока в них не падает ниже 12—15%, тогда как при питании короткого замыкания с возможной остаточной нагрузкой содержание третьей гармонической не превышает 2% (рис. 205).

Это привело к мысли (предложение доц. Г. Г. Марквардта) исполь-

срабатывает при самом большом Z . Именно разная чувствительность реле к токам, сдвинутым на разные углы относительно напряжения, и положена в основу избирательного действия этой защиты. При токах короткого замыкания, приближающихся к токам нагрузки, сдвиг по фазе обычно около 65° . При нагрузке сдвиг по фазе никогда не бывает больше 45° . Исходя из всего изложенного, становится ясно, что импедансная защита более селективна, чем простая максимальная и может с успехом быть применена там, где ток нагрузки соизмерим, но не превышает тока короткого замыкания.

Специальные защиты МИИТа для случаев, когда минимальный ток короткого замыкания меньше тока нагрузки. Как уже указывалось выше, в случае, когда минимальный ток короткого замыкания меньше тока нагрузки, ни минимальная, ни импедансная защита не обеспечивают необходимой селективности. Единственным решением на этот случай, применявшимся до настоящего времени, являлось сооружение постов секционирования. Однако в последнее время кафедрой «Энергоснабжение железных дорог» МИИТа разработаны два новых вида защиты, обеспечивающих защиту участков однофазного тока практически любой длины и грузонапряженности, где эксплуатируются электропоезда переменного-постоянного

зовать третью гармоническую составляющую для предотвращения срабатывания (торможения) защиты от токов нагрузки.

Оба вида защиты используют это обстоятельство.

а) Максимальная защита с торможением, пропорциональным третьей гармонической составляющей (схема Г. Г. Марквардта).

Схема защиты (рис. 206) состоит из трансформатора тока $ТТ$, пускового токового реле $РТ$, двух фильтров, третьей гармонической тока заграждающего Φ_1 и резонансного Φ_3 , двух выпрямительных мостов B_1 и B_3 , шунтирован-

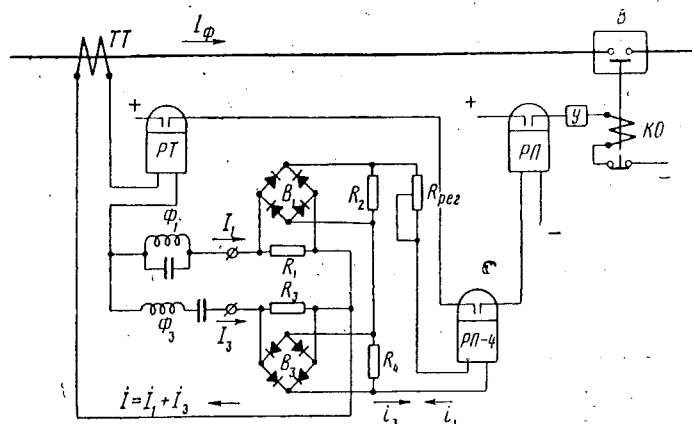


Рис. 206. Схема защиты, построенная на относительной разности величин тока первой и третьей гармонических составляющих

ных нагрузочными сопротивлениями R_1 и R_3 , балансных добавочных сопротивлений R_2 , R_4 и $R_{рег}$, поляризованного реле РП-4 и выходного промежуточного реле РП.

Назначением фильтров является выделение третьей гармонической тока i_3 из вторичного тока трансформатора i . Выделенный ток третьей гармонической нагружает сопротивление R_3 и частично ответвляется в цепь моста B_3 . Аналогичным образом частично ответвляется в цепь моста B_1 первая гармоническая тока.

На выходе мостов выпрямленные токи первой и третьей гармонической замыкаются через балансные сопротивления R_2 и R_4 и частично через обмотку поляризованного реле РП-4, причем поляризованное реле включено таким образом, что оно обтекается разностью выпрямленных токов первой и третьей гармонической. Балансные сопротивления R_2 и R_4 подобраны таким образом, чтобы при максимальном токе нагрузки $I_{н\max}$ токи i_1 и i_3 в реле были равны. Тогда на всем диапазоне от 0 до $I_{н\max}$ большим будет ток третьей гармонической и реле РП-4 работать не будет. В случае же, если произойдет короткое замыкание, процентное содержание третьей гармонической тока упадет и во всяком случае не превысит величин, ограниченных прямой $i_{3к}$, соответствующей 3%-ному содержанию I_3 в токе I_ϕ (рис. 207).

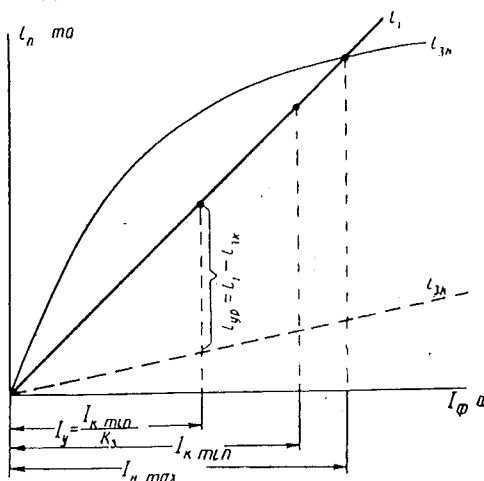


Рис. 207. Предельное содержание третьей гармонической тока фидера при нагрузке и коротком замыкании

не будет. В случае же, если произойдет короткое замыкание, процентное содержание третьей гармонической тока упадет и во всяком случае не превысит величин, ограниченных прямой $i_{3к}$, соответствующей 3%-ному содержанию I_3 в токе I_ϕ (рис. 207).

Направление суммарного тока в реле под действием большей по величине составляющей первой гармонической изменится на обратное и реле, сработав через промежуточное реле *РП*, произведет отключение выключателя.

Необходимая уставка реле по току при этом должна быть рассчитана при значении тока фидера I_f , равного частному от деления минимального тока короткого замыкания на коэффициент запаса K_3 , принимаемого равным 1,4—1,5. Во избежание ложных отключений выключателя от защиты при переходных процессах (включения трансформаторов электровозов на холостой ход) работа ее разрешается только при срабатывании пускового органа *РТ*, выполненного токовым реле типа ЭТ.

б) Импедансная защита с торможением, пропорциональным третьей гармонической составляющей тока (схема доц. В. Н. Пупынина).

Селективность работы импедансной защиты, в случае если минимальный ток короткого замыкания меньше тока нагрузки, можно увеличить, введя в исполнительный орган ее тормозной момент, пропорциональный величине третьей гармонической составляющей тока, ослабляющий действие рабочего момента от первой гармонической составляющей. Ниже приводится схема одного из осуществленных вариантов такой защиты, выполненной с помощью специального реле сопротивления с торможением, разработанного кафедрой «Энергоснабжение железных дорог» МИИТа. Реле изготовлено на базе выпускаемого нашей промышленностью комплектного направленного реле сопротивления типа КРС-132.

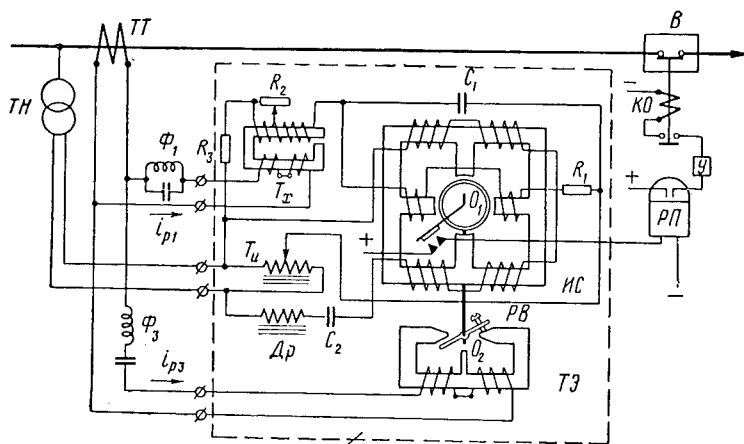


Рис. 208. Схема импедансной защиты с торможением, пропорциональным третьей гармонической составляющей тока

Отличием рассматриваемого реле от реле КРС-132 является наличие электромагнитного тормозного элемента *ТЭ*, насаженного на одну ось $O_1—O_2$ вместе с вращающейся системой индукционного реле сопротивления *ИС* (рис. 208).

Цепи тока индукционной системы *ИС* и электромагнитного тормозного элемента *ТЭ* разделены, причем благодаря наличию фильтров третьей гармонической составляющей Φ_1 и Φ_3 ток первой гармонической i_{p1} течет в основном по цепи индукционной системы, а третьей i_{p3} — по цепи тормозного электромагнитного элемента *ТЭ*.

Вращающий момент индукционной системы $M'_{вр}$, несмотря на относительно большую сложность ее, имеет уже знакомое нам выражение

$$M'_{вр} = M_{раб} - M_{торм} = k_2 U_p^2 - k_4 i_{p1} U_p \cos(\delta - \varphi_p).$$

Тормозной момент электромагнитной системы $M'_{торм}$

$$M'_{торм} = k_5 i_{p3}^2 = k_6 i_{p1}^2,$$

где

$$k_6 = k_5 \left(\frac{i_{p3}}{i_{p1}} \right)^2.$$

При срабатывании реле $M_{op} = M'_{op} - M'_{морм} = 0$, т. е.

$$k_2 U_p^2 - k_4 i_{p1} U_p \cos(\delta - \varphi_p) + k_6 i_{p1}^2 = 0.$$

Поделив обе части равенства на $k_2 i_{p1} U_p$, получим

$$\frac{U_p}{i_{p1}} - \frac{k_4}{k_2} \cos(\delta - \varphi_p) + \frac{k_6}{k_2} \cdot \frac{i_{p1}}{U_p} = 0.$$

Заменяя

$$\frac{U_p}{i_{p1}} = Z_{cp}; \quad \frac{k_4}{k_2} = Z_p; \quad \frac{k_6}{k_2} = Z_m^2$$

и преобразовав, получим окончательно

$$Z_{cp} + Z_m^2 \frac{1}{Z_{cp}} = Z_p \cos(\delta - \varphi_p).$$

Решая относительно Z_{cp} , найдем

$$Z_{cp} = \frac{Z_p \cos(\delta - \varphi_p) \pm \sqrt{Z_p^2 \cos^2(\delta - \varphi_p) - 4Z_m^2}}{2}.$$

Выражение для Z_{cp} представляет собой уравнение окружности с диаметром, равным $\sqrt{Z_p^2 - 4Z_m^2}$, центр которой расположен на расстоянии Z_p от начала координат под углом δ .

Как видно из изложенного, диаметр окружности уменьшается пропорционально квадрату тормозного тока, вследствие чего тормозной электромагнитный элемент можно отрегулировать винтом PB таким образом, что при 3%-ном содержании тормозного тока обеспечивается четкая работа защиты при коротком замыкании, но при 10%-ном содержании тока третьей гармоники рабочая область сожмется настолько, что или будет очень мала, или же исчезнет совсем, поэтому срабатывание защиты от тока нагрузки будет исключено.

Вычисление токов короткого замыкания. Для обоснованного выбора тех или иных мер защиты тяговой сети переменного тока необходимо производить расчеты минимальных величин токов короткого замыкания, возникающих при повреждении сети в наиболее удаленных точках защищаемых фидерных зон.

Решение рассматриваемой задачи можно производить упрощенным методом, исходя из предположения, что питающая система обладает неограниченной мощностью. Возможность такого допущения очевидна, поскольку вычисляемые токи коротких замыканий соизмеримы с токами нагрузок и практически не оказывают влияния на генераторы питающей энергосистемы.

Таким образом, предполагается, что периодическая составляющая тока короткого замыкания остается неизменной в течение всего процесса, т. е. значения сверхпереходного и установившегося токов одинаковы. Из основных положений по расчетам токов короткого замыкания в системах переменного тока известно, что для данного случая соотношение между установившимися токами при двух- и трехфазном коротком замыкании будет

$$\frac{I_{\kappa}^{(2)}}{I_{\kappa}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

а величина тока при трехфазном (симметричном) коротком замыкании

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{S_{\sigma}}{\sqrt{3} U_{\sigma} Z^*},$$

где S_{σ} — базисная мощность в *квa*;
 Z^* — эквивалентное базисное сопротивление расчетной схемы (на фазу) в относительных единицах;

U_{σ} — базисное напряжение, принимаемое равным среднему номинальному напряжению тяговой сети, в *кв*.

Базисная мощность S_{σ} , как известно, может быть выбрана произвольно, но в рассматриваемом случае удобно принять ее равной номинальной мощности трансформатора тяговой подстанции.

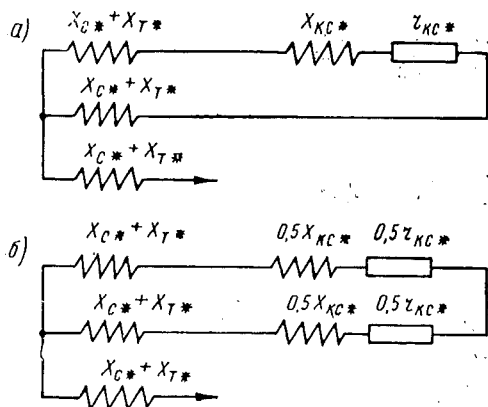


Рис. 209. К расчету тока короткого замыкания в контактной сети однофазного тока

Эквивалентное сопротивление расчетной схемы определяется без учета активных сопротивлений первичной питающей сети и трансформаторов тяговой подстанции.

Поскольку тяговые подстанции переменного тока питаются воздушными линиями электропередачи напряжением 110 *кв* и выше и мощности трансформаторов достаточно велики, то такой подход не может отразиться на результатах расчета.

Относительное индуктивное сопротивление цепи короткого замыкания (для одной фазы) определяется выражением

$$X_{\kappa}^* = X_{\sigma}^* + X_T^* + 0,5 X_{\kappa\sigma}^*,$$

где X_{σ}^* — относительное индуктивное сопротивление питающей сети до высоковольтных вводов подстанции;

X_T^* — относительное индуктивное сопротивление трансформатора подстанции (поскольку определяется минимальный ток короткого замыкания, то второй трансформатор, если таковой имеется, предполагается отключенным);

$X_{\kappa\sigma}^*$ — относительное индуктивное сопротивление контактной сети.

Коэффициент 0,5 перед величиной $X_{\kappa\sigma}^*$ учитывает переход от междуфазового сопротивления к сопротивлению на фазу, что поясняется на рис. 209, а и б.

Относительное активное сопротивление цепи короткого замыкания, очевидно, составляет

$$r_{\kappa}^* = 0,5 r_{\kappa\sigma}^*.$$

Относительные сопротивления отдельных элементов рассматриваемой цепи определяются следующим путем.

Сопротивление питающей сети до высоковольтных вводов подстанции может быть найдено по величине мощности короткого замыкания на стороне высокого напряжения $S_{\kappa,з}$. Эта величина определяется в ходе расчетов токов короткого замыкания, производимых с целью выбора основной аппаратуры тяговой подстанции, и может считаться известной.

Сопротивление питающей сети в этом случае рассчитывается по формуле

$$X_{\sigma}^* = \frac{S_{\sigma}}{S_{\kappa,з}},$$

где S_0 — принятая базисная мощность;

$S_{к.з}$ — мощность короткого замыкания на стороне первичного напряжения тяговой подстанции.

Сопротивление трансформатора определяется по выражению

$$x_{T*} = \frac{u_k\%}{100} \cdot \frac{S_0}{S_n},$$

где $u_k\%$ — напряжение короткого замыкания трансформатора в %;

S_n — его номинальная мощность.

Если в качестве базисной мощности принята номинальная мощность трансформатора, то, очевидно, относительное сопротивление численно равно напряжению короткого замыкания трансформатора, выраженному в долях единицы.

Сопротивления контактной сети в относительных единицах определяются по формулам:

$$x_{кс*} = x_0 l \frac{S_0}{U_0^2}$$

и

$$r_{кс*} = r_0 l \frac{S_0}{U_0^2},$$

где x_0 и r_0 — мнимая и действительная части комплекса, характеризующего полное сопротивление контактной сети в $\Omega/\text{км}$;

l — расстояние от подстанции до расчетной точки короткого замыкания в км ;

S_0 — базисная мощность в тыс. кВА ;

U_0 — среднее напряжение контактной сети в кВ (при номинальном напряжении на шинах подстанции 27,5 кВ может приниматься равным 26,2 кВ).

Полное эквивалентное сопротивление на фазу расчетной схемы

$$Z_{к*} = \sqrt{x_{к*}^2 + r_{к*}^2}.$$

Установившееся значение тока двухфазного короткого замыкания определяется, как

$$I_{к}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{к}^{(3)},$$

где

$$I_{к}^{(3)} = \frac{S_0}{\sqrt{3} U_0 Z_{к*}},$$

т. е. по формуле

$$I_{к}^{(2)} = \frac{S_0}{2 U_0 Z_{к*}}.$$

Здесь

S_0 — в кВА , U_0 — в кВ , $I_{к}^{(2)}$ — в А .

Расчет тока короткого замыкания может быть проведен также в именованных единицах по формуле

$$I_{к}^{(2)} = \frac{U_n}{Z_{э\text{кв}}^{(2)}} \text{ А},$$

где U_n — номинальное напряжение контактной сети в в;

$Z_{\text{экв}}^{(2)}$ — эквивалентное приведенное сопротивление цепи двухфазного короткого замыкания в ом.

Величина $Z_{\text{экв}}^{(2)}$ в свою очередь определяется из выражения

$$Z_{\text{экв}}^{(2)} = \sqrt{(2x'_c + 2x'_T + x_{kc})^2 + r_{kc}^2},$$

где r_{kc} и x_{kc} — активное и индуктивное сопротивления рассматриваемого участка контактной сети в ом;

x'_c и x'_T — индуктивные сопротивления первичной сети и трансформатора в ом, приведенные к ступени напряжения, на которой рассматривается короткое замыкание (т. е. к напряжению контактной сети).

Ток уставки максимальной защиты на фидерах I_y выбирается, исходя из условий соблюдения неравенств

$$\kappa_n I_{\text{max}} < I_y < \frac{I_{k \text{ min}}^{(2)}}{\kappa_{\text{ч}}},$$

где I_{max} — максимальный рабочий ток;

$I_{k \text{ min}}^{(2)}$ — минимальное значение тока короткого замыкания;

κ_n — коэффициент надежности, выбираемый в пределах от 1,15 до 1,25;

$\kappa_{\text{ч}}$ — коэффициент чувствительности, принимаемый равным 1,5.

При наличии в зоне поста секционирования для выбора уставки фидерного выключателя вместо κ_n надо взять произведение коэффициента чувствительности на коэффициент возврата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок, раздел I. Госэнергоиздат, 1957.
2. А. В. Фрайфельд и М. Е. Крестьянов. Схема автоматического параллельного соединения контактной сети для двухпутных электрифицированных железных дорог. Труды МЭМИИТа, выпуск 63, Трансжелдориздат, 1953.
3. Г. Г. Марквардт. Влияние уровня напряжения на использование живой силы поезда при преодолении подъемов. Труды МИИТа, вып. 90/13. Трансжелдориздат, 1956.
4. Г. М. Сехниашвили. К вопросу определения оптимальных параметров электротяговых сетей. Труды Грузинского политехнического института им. С. М. Кирова, № 5, 1957.
5. Э. С. Бржозовский. Анализ режима напряжения в системе энергоснабжения некоторых электрических железных дорог СССР. Труды IV конференции молодых ученых. АН СССР, энергет. ин-т им. Кржижановского, 1957.
6. Бернар. Расположение и устройство тяговых подстанций однофазного тока 50 гц. «Реферативный журнал Акад. наук СССР», Электротехн., 1956, № 2, с. 117.
7. Петров С. А. Расчет скорости движения ртутновыпрямительного электровоза и фазы основной гармоники его первичного тока. Вопросы электрификации железных дорог на однофазном токе. Изд-во АН СССР, 1957.
8. Б. Я. Гохштейн, Б. Н. Тихменев. Особенности электрического расчета устройств энергоснабжения электрической тяги при выпрямительных электровозах. Труды ЦНИИ, вып. 156. Трансжелдориздат, 1958.
9. А. М. Брылеев и Б. С. Рязанцев. Рельсовые цепи. Трансжелдориздат, 1952.
10. Zickler. Elektr. und Maschinenbau, 1923, S. 14.
11. Г. М. Петухин. Расчет стальных проводов, шин и крановых троллеев. Госэнергоиздат, 1948.
12. Устройство СЦБ при электрической тяге переменного тока. Труды ЦНИИ, вып. 126. Трансжелдориздат, 1956.
13. К. Г. Марквардт. Энергоснабжение электрифицированных железных дорог. Трансжелдориздат, 1948.
14. Д. П. Загрядимов, А. П. Петров, Е. С. Сергеев. Организация движения на железнодорожном транспорте. Трансжелдориздат, 1956.
15. М. Е. Крестьянов, Г. Г. Марквардт. О расчетах максимальных нагрузок фидеров постоянного тока подстанций метрополитена. Труды МИИТа, вып. 90/13. Трансжелдориздат, 1956.
16. М. В. Кудрявцев. О комплексном энергоснабжении электрических железных дорог. «Железнодорожный транспорт», 1957, № 8.
17. Т. С. Хачатуров. Проблемы экономической эффективности капитальных вложений в промышленность СССР. «Вопросы экономики», 1957, № 2.
18. Ю. П. Порплиц. К вопросу об определении потерь энергии в схемах продолжного комплексного энергоснабжения электрических железных дорог. Труды IV конференции молодых ученых. АН СССР, энергет. ин-т им. Г. М. Кржижановского, 1957.
19. И. Я. Рышковский. Условия применения экономического подхода при проектировании системы энергоснабжения электрических железных дорог. Сборник трудов ЛИИЖТа, вып. 131. Трансжелдориздат, 1936.
20. В. Е. Розенфельд, Ю. Е. Рывкин, И. А. Лакштовский. Электрическая тяга поездов. Трансжелдориздат, 1940.
21. Л. М. Шницер. Нагрузочная способность силовых трансформаторов. Госэнергоиздат, 1953.
22. П. Г. Грудинский, Е. Н. Приклонский. Нормы на экономическую плотность тока. «Электричество», 1957, № 3.
23. Технический справочник железнодорожника, т. X. Трансжелдориздат, 1956.
24. К. Г. Марквардт. Расчет тяговой сети методом характерных сечений графика движения. «Советский метрополитен», 1939, № 11.
25. К. Г. Марквардт. Метод непрерывного исследования графика движения. «Советский метрополитен», 1940, № 8.
26. Д. К. Минов. Электрический расчет железнодорожной сети при постоянном токе. «Электричество», 1931, № 2.
27. Л. М. Перцовский. Метод расчета нагрузки тяговой подстанции по кривым расхода энергии. «Электрификация ж.-д. транспорта», 1935, № 6.
28. А. Б. Лебедев. Основы электрической тяги. ОНТИ, 1937.

29. Н. Н. Костромитин. Применение теории вероятностей по выбору мощности тяговых подстанций. «Электричество», 1927, № 2.

30. В. Е. Розенфельд и др. Электрические железные дороги. Трансжелдориздат, 1957.

31. Л. Г. Абелишвили. Расчет элементов внутреннего энергоснабжения электрических железных дорог методом эпюр средних нагрузок. Труды ТБИИЖТа, вып. XXII. Трансжелдориздат, 1950.

32. Г. Г. Марквардт. Приближенное определение коэффициента эффективности поездного тока при применении рекуперативного торможения. «Техника железных дорог» № 4, 1956.

33. К. Г. Кучма. К вопросу защиты контактной сети от токов короткого замыкания. «Техника железных дорог», № 1, 1947.

34. И. Я. Рышковский и К. Г. Кучма. Тяговые подстанции. Трансжелдориздат, 1953.

35. Г. Г. Марквардт, В. Н. Пупынин. Импульсная защита от токов короткого замыкания в контактной сети. Труды МИИТа, выпуск 90/13. Трансжелдориздат, 1956.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	Стр. 3
---------------------	-----------

Глава I

Системы энергоснабжения электрических железных дорог

§ 1. Принципиальная схема питания электрической железной дороги	4
§ 2. Энергосистемы	6
§ 3. Схемы питания электрических железных дорог при различных системах электрической тяги	8
§ 4. Схемы питания тяговых и районных потребителей	11
§ 5. Схемы питания и секционирования контактной сети	15

Глава II

Режим напряжения в системе энергоснабжения электрических железных дорог

§ 6. Основные положения	32
§ 7. Влияние изменений напряжения на работу электрических локомотивов	33
§ 8. Влияние режима напряжения в контактной сети на работу электрифицированного участка	38
§ 9. Напряжение сетей системы энергоснабжения электрических железных дорог	44
§ 10. Особенности работы системы энергоснабжения при рекуперации энергии	46

Глава III

Параметры контактной сети

§ 11. Сопротивление контактной сети постоянного тока	49
§ 12. Влияние проводимости земли на сопротивление контактной сети постоянного тока	53
§ 13. Активное сопротивление контактной сети однофазного тока	61
§ 14. Полное сопротивление отдельных контуров	66
§ 15. Полное сопротивление контактной сети	69

Глава IV

Режимы работы и принципы построения методов расчета и выбора параметров системы энергоснабжения электрических железных дорог

§ 16. Назначение расчетов системы энергоснабжения	82
§ 17. Режимы работы системы энергоснабжения в нормальных условиях	86
§ 18. Режимы работы системы энергоснабжения при максимальном использовании пропускной способности линии	105
§ 19. Экономические расчеты при выборе параметров системы энергоснабжения	115
§ 20. Выбор параметров системы энергоснабжения	122
§ 21. Принципы построения методов расчета системы энергоснабжения	137

Глава V

Расчеты мгновенных схем

§ 22. Определение нагрузок тяговых подстанций (или их фидеров) и расчет потерь напряжения в контактной сети на дорогах постоянного тока	140
§ 23. Расчет нагрузок тяговых подстанций с учетом изменения напряжения на их шинах	149
§ 24. Определение потерь мощности в контактной сети	156
§ 25. Понятие о графическом расчете мгновенных схем	157
§ 26. Определение нагрузки подстанций и потерь напряжения в контактной сети на дорогах однофазного тока	161
§ 27. Определение потерь мощности в контактной сети при однофазном токе	169

Глава VI

Методы расчета по заданному графику движения

§ 28. Метод равномерного сечения графика движения	172
§ 29. Метод характерных сечений графика движения	174
§ 30. Метод непрерывного исследования графика движения	176
§ 31. Особенности расчета при параллельном графике движения и одинаковых типах поездов	180
§ 32. Приближенные способы расчета по заданному графику движения	181
§ 33. Принцип графоаналитического метода расчета тяговых сетей	181
§ 34. Расчет нагрузки тяговой подстанции по кривым расхода энергии поездов	183
§ 35. Построение суточных графиков нагрузки	184
§ 36. Определение потерь энергии	186

Глава VII

Методы расчета по средним размерам движения

§ 37. Метод равномерно распределенной нагрузки	188
§ 38. Основные положения метода подвижных нагрузок	189
§ 39. Основные положения метода расчета по заданным размерам движения (без учета колебания числа поездов)	190
§ 40. Понятие о методе эпюр средних нагрузок	192

Глава VIII

Метод расчета системы энергоснабжения с учетом неравномерности движения

§ 41. Закон распределения нагрузки элементов системы энергоснабжения магистральной электрической железной дороги	194
§ 42. Законы распределения числа поездов в рассматриваемой зоне	194
§ 43. Определение нагрузки тяговых подстанций и их фидеров на основе заданных законов распределения числа поездов	206
§ 44. Определение средних и эффективных значений поездных токов подстанций или фидеров	209
§ 45. Определение нагрузки подстанций по нагрузкам фидеров	215
§ 46. Определение эффективной нагрузки подстанций и фидеров для наиболее общего случая	217
§ 47. Определение средних и эффективных нагрузок подстанций с учетом изменения напряжения на их шинах	224
§ 48. Определение потерь мощности и потерь энергии в контактной сети	225
§ 49. Определение уровня напряжения в контактной сети	230
§ 50. Определение потерь напряжения в контактной сети	234
§ 51. Область применения различных методов расчета системы энергоснабжения	241

Глава IX

Защита от токов короткого замыкания контактной сети

§ 52. Общие положения	250
§ 53. Защита от токов короткого замыкания по установившемуся значению этого тока	254
§ 54. Расчет защиты от токов короткого замыкания по установившемуся значению тока	259
§ 55. Защита от токов короткого замыкания по уровню напряжения в контактной сети	264
§ 56. Защита от токов короткого замыкания по скорости нарастания или по броску тока	266
§ 57. Защита от коротких замыканий контактной сети на участках однофазного тока промышленной частоты	275

Константин Густавович Марквардт

«ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ»

Обложка художника И. А. Байтина

Технический редактор П. А. Хитрова

Корректор М. К. Некрасова

Сдано в набор 20/VIII 1958 г. Подписано к печати 21/XI 1958 г.
 Формат бумаги 70×108/16. Печатных листов 18 1/4 (1 вкл.) (условных 25), бум. листов 9,25
 Учетно-изд. листов 24,33. Тираж 7 000. Т12134. ЖДИЗ 51280. Заказ тип. 737.
 Цена 8 р. 50 к. Переплет 1 р. 50к.

ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ, Москва, Басманный туп., 6а.

1-я типография Трансжелдориздата МПС. Москва. В Переяславская, 46.

ОПЕЧАТКИ К КНИГЕ МАРКВАРДА К. Г. «ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ»

Страница	Строка или номер формулы	Напечатано	Должно быть
112	3 снизу	$\kappa_{\max} = 0$	$t_{\max} = 0$
128 129 130	5 и 8 снизу } 4 и 11 снизу } 2 сверху }	K_{yc}	K_{ys}
203	8 снизу	$\bar{m} = m \sum_{m=0}^n \dots$	$\bar{m} = \sum_{m=0}^n m \dots$
217	(171)	$\kappa_H = \frac{I_I}{I_H} = \frac{1,525}{\sqrt{1 + 0,45 \left[1 + \left(\frac{I_{II}}{I_I} \right)^2 + \left(\frac{I_{III}}{I_I} \right)^2 \right]}}$	$\kappa_H = \frac{I_I}{I_H} = \frac{1,525}{\sqrt{1 + 0,45 \left[1 + \left(\frac{I_{II}}{I_I} \right)^2 + \left(\frac{I_{III}}{I_I} \right)^2 \right]}}$
223	(182)	$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2}{T^2 U^2} \left[\dots \right]$	$I_{\text{эф}}^2 = \frac{A_T^2 \cdot 10^8}{4 T^2 U^2} \left[\dots \right]$
225	4 снизу	$\Delta U''_{it} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Delta U''_{ij}$	$\Delta U''_{it} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \Delta U''_{ji}$
229	(189) (189')	$\Delta A_T = \frac{rl \cdot 10^3}{12 T U^2} \left[2T \dots \right]$	$\Delta A_T = \frac{rl \cdot 10^3}{12 T U^2} \left[2,16 T \dots \right]$

Страница	Строка или номер формулы	Напечатано	Должно быть
238, 245	(194)	$\Delta U_i = \frac{r A_p 10^3}{U t} \left\{ l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_i}{t_{im}} + \frac{m-1}{2l} \times \right. \\ \left. \times \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + l_2^2 l_{oi} \right] \right\}$	$\Delta U_i = \frac{r A_p \cdot 10^3}{U t} \left\{ l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_i}{t_{im}} + \frac{m-1}{2l} \times \right. \\ \left. \times \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \frac{l_2^2}{l} l_{oi} \right] \right\}$
239 245	(198) (198')	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left(\frac{A_I}{t_I} \left\{ l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_{iI}}{t_{imI}} + \frac{m_I-1}{2l} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + l_2^2 l_{oi} \right] \right\} + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} \cdot l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \right) ,$	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left(\frac{A_I}{t_I} \left\{ l_{oi} \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \frac{t_{iI}}{t_{imI}} + \frac{m_I-1}{2l} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[l_1^2 \left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) + \frac{l_2^2 l_{oi}}{l} \right] \right\} + \right. \\ \left. + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} \left[\left(1 - \frac{l_{oi}}{l} \right) \left(\frac{l_1^2}{2l} + \frac{l_i l_{oi}}{l} \right) + \frac{l_2^2 l_{oi}}{2l} \right] \right)$
240, 244	(200)	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_I}{t_I} \left[l_{oi} \frac{t_{iI}}{t_{imI}} + \frac{m_I-1}{l} \left(\frac{l_1^2}{2} + l_2 l_{oi} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} \cdot l_{oi} \right\}$	$\Delta U_i = \frac{r \cdot 10^3}{U} \left\{ \frac{A_I}{t_I} \left[l_{oi} \frac{t_{iI}}{t_{imI}} + \frac{m_I-1}{l} \left(\frac{l_1^2}{2} + l_2 l_{oi} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{A_{II} m_{II}}{t_{II}} \left[\frac{l_1^2}{2l} + \frac{(l-l_1) l_{oi}}{l} \right] \right\}$
249	15 и 18 снизу	... от всех поездов от одного поезда ...
261	10 сверху	$A \frac{u_K \%}{100} + \frac{\Delta P_M \%}{100} \text{ и } \frac{\Delta P_A \%}{100} \cdot \frac{n}{n_u}$	$A \frac{u_K \%}{100} + \frac{\Delta P_M \%}{100} + \frac{\Delta P_A \%}{100} \cdot \frac{n}{n_p}$