

К. Г. Марквардт

**Электроснабжение электрифицированных
железных дорог**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
К11

К11 **К. Г. Марквардт**
Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт – М.: Книга по Требованию, 2024. – 529 с.

ISBN 978-5-458-38699-9

Рассмотрены системы электроснабжения электрифицированных железных дорог, приведены показатели работы устройств электроснабжения, режимы работы, расчеты систем и выбор основных параметров, входящих в них устройств, способы защиты тяговых сетей от токов коротких замыканий», показаны особенности эксплуатации. По сравнению с третьим изданием, вышедшим в 1965 г., настоящее издание дополнено материалами, относящимися к режимам напряжения в тяговой сети и его стабилизации, оценке количества избыточной энергии рекуперации, системе электроснабжения переменного тока 2Х25 кВ. Учебник предназначен для студентов высших учебных заведений по специальности «Электрификация железнодорожного транспорта». Может быть полезен инженерно-техническим работникам, связанным с проектированием, монтажом и эксплуатацией устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог.

ISBN 978-5-458-38699-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ И МЕТРОПОЛИТЕНОВ

1.1. Общие сведения

Электрические железные дороги и метрополитены получают электрическую энергию от энергосистем, объединяющих в себе несколько электростанций. Электрическая энергия от генераторов электростанций передается через электрические подстанции, линии электропередачи различного напряжения и тяговые подстанции. На последних электрическая энергия преобразуется к виду (по роду тока и напряжению), используемому в локомотивах, и по тяговой сети передается к ним.

Вся совокупность устройств, начиная от генератора электростанции и кончая тяговой сетью, составляет систему электроснабжения электрифицированных железных дорог. От этой системы питаются электрической энергией, помимо собственно электрической тяги (электровозы и электропоезда), также все нетяговые железнодорожные потребители и потребители прилегающих районов. Поэтому электрификация железных дорог решает не только транспортную проблему, но и способствует решению важнейшей народнохозяйственной проблемы — электрификации всей страны.

Главные преимущества электрической тяги перед автономной (имеющей генераторы энергии на самом локомотиве) определяются централизованным электроснабжением и сводятся к следующему.

1. Производство электрической энергии на крупных электростанциях приводит, как всякое массовое производство, к уменьшению ее стоимости, увеличению их к.п.д. и снижению расхода топлива.

2. На электростанциях могут использоваться любые виды топлива и, в частности, малокалорийные — нетранспортабельные (затраты на транспортировку которых не оправдываются). Электростанции могут сооружаться непосредственно у места добычи топлива, вследствие чего отпадает необходимость в его транспортировке.

3. Для электрической тяги может использоваться гидроэнергия и энергия атомных электростанций.

4. При электрической тяге возможна рекуперация (возврат) энергии при электрическом торможении.

5. При централизованном электроснабжении потребная для электрической тяги мощность практически не ограничена. Это дает возможность в отдельные периоды потреблять такие мощности, которые невозможно обеспечить на автономных локомотивах, что позволяет реализовать, например, значительно большие скорости движения на тяжелых подъемах при больших весах поездов.

6. Электрический локомотив (электровоз или электровагон) в отличие от автономных локомотивов не имеет собственных генераторов энергии. Поэтому он дешевле и надежнее автономного локомотива.

7. На электрическом локомотиве нет частей, работающих при высоких температурах и с возвратно-поступательным движением (как на паровозе, тепловозе, газотурбовозе), что определяет уменьшение расходов на ремонт локомотива.

Преимущества электрической тяги, создаваемые централизованным электроснабжением, для своей реализации требуют сооружения специальной системы электроснабжения, затраты на которую, как правило, значительно превышают затраты на электроподвижной состав. Надежность работы электрифицированных дорог зависит от надежности работы системы электроснабжения. Поэтому вопросы надежности и экономичности работы системы электроснабжения существенно влияют на надежность и экономичность всей электрической железной дороги в целом.

Основной задачей системы электроснабжения является обеспечение эксплуатационной работы железной дороги. Для этого необходимо, чтобы мощность всех элементов системы электроснабжения была достаточной для обеспечения потребной каждому локомотиву мощности при самых разнообразных условиях работы железнодорожной линии.

Эти задачи могут быть решены только при правильно выбранных параметрах системы электроснабжения, т. е. обеспечивающих работу оборудования в допустимых для него пределах по нагрузке и необходимому качеству электрической энергии (в первую очередь уровень напряжения), а также при обеспечении необходимого резерва. Рассмотрим несколько детальнее поставленные требования.

Известно, что недопустимое для данного элемента электрической установки увеличение нагрузки может привести к выходу его из строя. С другой стороны, увеличение номинальной мощности любого элемента и, следовательно, допустимой для него нагрузки связано с увеличением затрат. Поэтому необходимо уметь выбирать параметры всех устройств системы электроснабжения так, чтобы они бесперебойно работали в течение времени, определяемого их нормальным сроком службы, и вместе с тем требовали минимальных затрат.

Наряду с этим на электрифицированных железных дорогах неизбежны редко встречающиеся случайные сочетания нагрузок (расположения поездов), вызванные особыми условиями эксплуатации, например пропуск поездов с минимальными межпоездными интервалами после снежных заносов или не предусмотренных длительных перерывов движения и др. Такие сочетания нагрузок предъявляют к системе электроснабжения весьма высокие требования. Такие редко встречающиеся сочетания нагрузок при выборе параметров системы электроснабжения не всегда принимают во внимание, пропуск же поездов в этих случаях регулируется диспетчером с учетом возможностей системы электроснабжения.

Передача электрической энергии по проводам связана с некоторым понижением напряжения у потребителя, тем большим, чем больше потребляемая им мощность и чем дальше от питающего центра он распо-

ложеи. Вследствие этого поезда, удаляющиеся от подстанций, питаются электрической энергией при более низком напряжении, и если нельзя изменить режим ведения поезда, то снижается скорость его движения. На электрических локомотивах, кроме тяговых двигателей, приводящих в движение поезда, располагаются также и другие, так называемые вспомогательные машины, выполняющие различные функции (обеспечение торможения, охлаждение двигателей и др.). Производительность связанных с ними устройств зависит от уровня напряжения на зажимах этих машин. Поэтому вопрос поддержания определенного значения напряжения в сети у поезда является весьма важным для обеспечения нормальной работы электрифицированных железных дорог.

Способы поддержания напряжения на необходимом уровне определяются техническими и экономическими соображениями.

Бесперебойность и экономичность работы электрифицированной дороги зависят от резервирования различных элементов устройства. Учитывая важность надежной работы электрифицированной железной дороги для обеспечения перевозочного процесса при всех условиях и особенно то, что электрическая тяга, как правило, работает на наиболее грузонапряженных магистралях, большое значение приобретает система резервирования.

Питание различных железнодорожных стационарных потребителей, а также потребителей прилегающих к железной дороге районов осуществляется от одной и той же системы электроснабжения. Поэтому при ее проектировании и сооружении вопросам надежности и экономичности питания этих потребителей также уделяют необходимое внимание. При этом питание железнодорожных потребителей в большинстве случаев прямо или косвенно связано с надежностью работы данной железнодорожной линии и должно поэтому обеспечиваться с высокой надежностью. Систему резервирования в схемах питания нетяговых потребителей выбирают с учетом их характера и значимости.

Электрифицированные железные дороги оказывают различные мешающие влияния на смежные сооружения. Так, на дорогах переменного тока в питающей трехфазной системе нарушается симметрия токов и напряжений, что ведет к дополнительным потерям электрической энергии, к понижению мощности генераторов и двигателей или уменьшению срока их службы, уменьшению светового потока ламп накаливания или резкому сокращению срока их службы. Поэтому принимаются меры для ограничения несимметрии. Токи и напряжения в тяговой сети дорог переменного тока несинусоидальны, что усиливает электрическое и магнитное влияние на расположенные вблизи линии, нарушая их работу, а иногда и создавая опасность для персонала и оборудования.

На линиях постоянного тока в токе тяговой сети также имеются гармонические составляющие, мешающие нормальной работе устройств связи. Поэтому при проектировании системы электроснабжения приходится принимать специальные меры для ограничения этих влияний.

Локомотивы на электрифицированных железных дорогах питаются через тяговую сеть, где одним из проводов является контактная подвеска, а вторым — рельсовый путь. Последний же не изолирован от

земли, вследствие чего большая часть тока течет по земле как по проводнику, присоединенному параллельно к рельсам. Если вблизи от железной дороги (на расстоянии даже в несколько километров) в земле уложены металлические трубопроводы или кабели с металлической оболочкой, то токи протекают и по ним и приводят к вредным последствиям. На дорогах постоянного тока ответвление токов в подземные сооружения может привести к их разрушению, а кроме того, создает на них опасные потенциалы. Особая опасность разрушения от электролитической коррозии грозит транспортным сооружениям (фундаментам опор, арматуре железобетонных опор, искусственных сооружений и пр.). Поэтому для участков постоянного тока защита от электрокоррозии является одной из важных задач.

С точки зрения обеспечения надежной работы особое место в системе электроснабжения занимает контактная сеть. Эта часть системы электроснабжения не может иметь резерва, а ее обслуживание связано с затруднениями, особенно в условиях интенсивного движения. Большую часть работ ведут на сети под напряжением со специально устроенных изолирующих съёмных вышек или отключают поочередно небольшие участки сети.

Это создаст сложные условия для обслуживающего персонала и требует особого внимания к обеспечению безопасности работ. Все эти вопросы необходимо принимать во внимание, когда сравниваемые возможные технические решения не равноценны по условиям обслуживания контактной сети.

Все изложенные выше требования, предъявляемые к системе электроснабжения, могут быть удовлетворены при различных технических решениях. Окончательная оценка этих решений осуществляется сопоставлением технических и экономических их качеств, т. е. по степени надежности решения и по затратам. В затратах определяют как капитальные, так и ежегодные эксплуатационные расходы. Все эти задачи возникают не только при проектировании вновь электрифицируемой линии железной дороги, но и в процессе эксплуатации при развитии системы электроснабжения, когда рост грузопотоков приводит к увеличению размеров движения и весов поездов. Ни одно техническое решение не может быть достаточно обоснованным без соответствующей экономической оценки.

1.2. Схемы электроснабжения при различных системах тяги

Система электроснабжения электрифицированных железных дорог состоит из двух частей:

первичной (или внешней) части системы электроснабжения, включающей в себя все устройства от электрической станции до линии передачи (включительно), подводящих энергию к тяговым подстанциям;

тяговой части системы электроснабжения, состоящей из тяговых подстанций и тяговой сети. Тяговая сеть, в свою очередь, состоит из контактной сети, рельсового пути, питающих и отсасывающих линий (фидеров), а также других проводов и устройств, присоединяемых по

длине линии к контактной подвеске непосредственно или через специальные автотрансформаторы. Устройство тяговой подстанции зависит от системы электрической тяги, применяемой на железной дороге, т. е. определяется родом тока и напряжения, применяемого в контактной сети, а также напряжением и системой тока источника энергии **первичной** части схемы питания.

Как правило, электрифицированная железная дорога получает питание от энергосистемы, а не от одной электрической станции, как это показано на принципиальной схеме рис. 1.1.

Электроэнергетическое хозяйство всех стран мира строится по принципу концентрации производства электрической энергии на крупных электрических станциях, которые с помощью линий электропередачи соединяются в энергетические системы. В процессе развития энергетические системы охватывают все большее число электрических станций, а сами эти станции строятся на все возрастающие мощности. Соединение электростанций в одну систему приносит большие выгоды, перекрывающие затраты на сооружение специальных линий электропередачи, соединяющих между собой эти станции.

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 и характеризуются как общим количеством потребляемой ими энергии, так и максимумом требуемой мощности в отдельные отрезки времени. Максимумы мощности потребителей часто не совпадают по времени, поэтому максимум мощности, требуемой от электрических станций, как правило, меньше суммы максимумов мощностей потребителей. Использование электрических станций тем выше, чем больше к ним подключено потребителей. Еще больший эффект такого использования мощности электростанций достигается соединением нескольких станций в энергосистему. Соединение нескольких электрических станций между собой позволяет также сократить число резервных агрегатов, т. е. еще больше

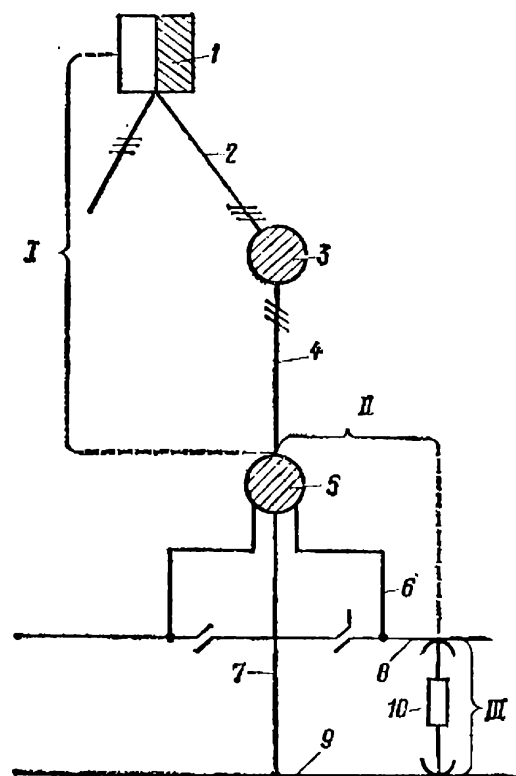


Рис. 1.1. Принципиальная схема питания электрифицированной железной дороги от электрической станции:

I — внешнее электроснабжение; II — тяговое электроснабжение; III — электроподвижной состав; 1 — тепловая электростанция; 2 — линия электропередачи энергосистемы; 3 — районная электрическая подстанция; 4 — линия электропередачи от районной подстанции к тяговой; 5 — тяговая подстанция; 6 — питающая линия; 7 — отсасывающая линия; 8 — контактная подвеска; 9 — рельсы; 10 — э. п. с.

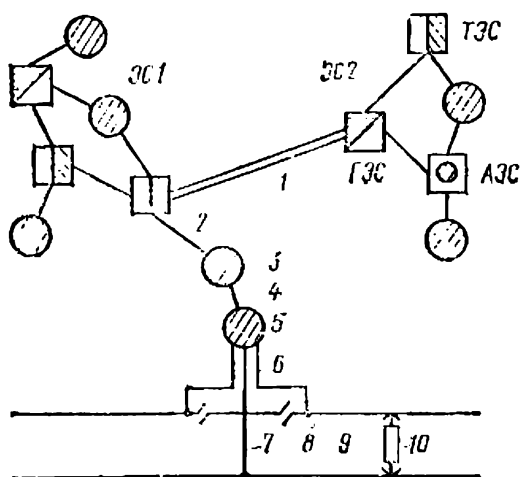


Рис. 1.2. Принципиальная схема двух энергосистем ЭС1 и ЭС2, соединенных линиями межсистемной связи:

ТЭС — тепловая, ГЭС — гидравлическая и АЭС — атомная электростанции; 1 — линии межсистемной связи (остальные обозначения те же, что на рис. 1.1)

так называемыми линиями межсистемной связи (рис. 1.2) дает, по существу, те же преимущества, что и соединение нескольких станций в одну энергосистему.

В реальных условиях электрическая энергия преобразовывается на ряде подстанций и питает ряд локомотивов. Схемы питания электрифицированных железных дорог от энергосистемы весьма разнообразны. Они в большей мере зависят от применяемой системы электрической тяги, а также и от конфигурации самой энергосистемы.

На рис. 1.3—1.6 показаны схемы питания при трех системах электрической тяги: постоянного тока, однофазного тока промышленной частоты и однофазного тока пониженной частоты для случаев, когда

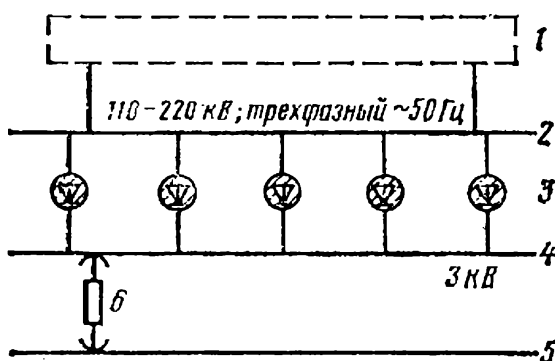


Рис. 1.3. Принципиальная схема питания железной дороги постоянного тока:

1 — энергосистема; 2 — линия электропередачи; 3 — тяговые подстанции с выпрямителями; 4 — контактная сеть; 5 — рельсы; 6 — электропровод

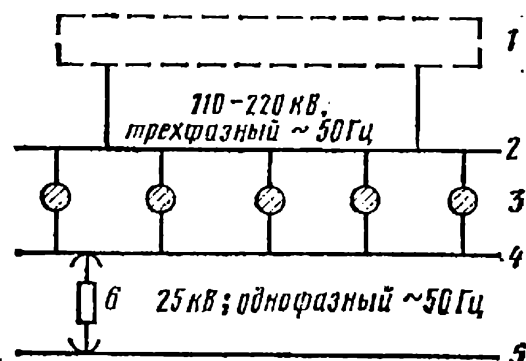


Рис. 1.4. Принципиальная схема питания железной дороги однофазного тока промышленной частоты:

1 — энергосистема; 2 — линия электропередачи; 3 — тяговые трансформаторные подстанции; 4 — контактная сеть; 5 — рельсы; 6 — электропровод

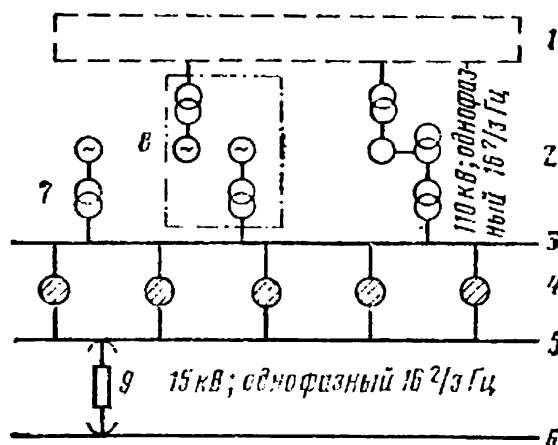


Рис. 1.5. Принципиальная схема питания дороги однофазного тока пониженной частоты:

1 — энергосистема; 2 — подстанция с вращающимися преобразователями частоты; 3 — линия электропередачи 16 2/3 Гц; 4 — тяговые трансформаторные подстанции пониженной частоты; 5 — контактная сеть; 6 — рельсы; 7 — «собственная» электрическая станция пониженной частоты; 8 — объединенная электрическая станция с генераторами промышленной и пониженной частоты; 9 — электровоз

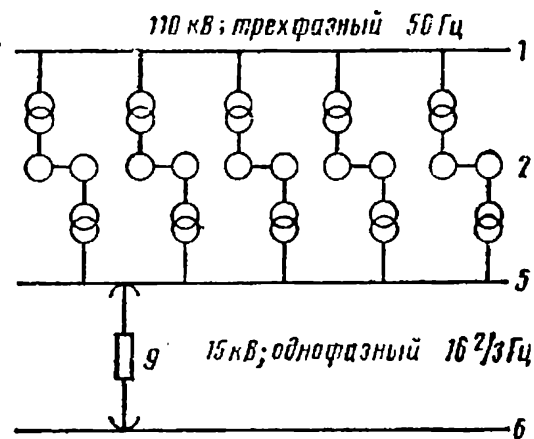


Рис. 1.6. Принципиальная схема питания дороги однофазного тока пониженной частоты с распределенным преобразованием энергии:

1 — энергосистема; 2 — тяговые подстанции с вращающимися преобразователями частоты (остальные обозначения 5, 6 и 9 те же, что приведенные на рис. 1.5)

вдоль железнодорожных линий идет линия передачи для питания тяговых подстанций. Линия электропередачи частотой 50 Гц (кроме схемы, показанной на рис. 1.6, где частота 16 2/3 Гц) получает питание от энергосистемы. Под напряжением системы электрической тяги понимают номинальное напряжение, на которое изготавливается электроподвижной состав (э. п. с.), оно же является номинальным напряжением в контактной сети. Напряжение на шинах подстанции обычно принимают на 10% выше этого значения. На всех схемах напряжение в тяговой сети показано равным номинальному напряжению э.п.с.

Система постоянного тока. Тяговые двигатели для электровозов и электропоездов постоянного тока в основном изготавливают на напряжение не выше 1500 В (редко — незначительно большее). Попарное последовательное соединение таких двигателей позволяет иметь в тяговой сети напряжение, равное 3000 В. При таком напряжении энергия тяговым двигателям передается без изменения уровня напряжения на электровозе. В этой системе электровозы получают наиболее простыми, что и составляет одно из главных ее преимуществ. При таких значениях напряжения расстояния между подстанциями на грузонапряженных дорогах принимают, как правило, около 15—20 км, а сечения проводов контактной сети по сравнению с другими системами тока и напряжения — в 2—3 раза большими. Во столько же раз больше получают потери энергии в проводах контактной сети.

В дальнейшем при увеличении грузопотоков приходится добавлять подстанции, и тогда расстояние между ними уменьшается вдвое. Большая площадь сечения проводов контактной сети и большое число тяговых подстанций, вызванное относительно невысоким напряжением в

тяговой сети, являются существенным недостатком системы постоянного тока. Все метрополитены мира применяют систему постоянного тока. Номинальное напряжение на метрополитенах в СССР и ряде других стран равно 750 В.

Недостатком системы постоянного тока являются также большие потери энергии в пусковых реостатах при разгоне поезда. Особенно при пригородном движении, где доля пусковых потерь достигает 12—15%, и на метрополитенах, где потери достигают 25% общего расхода энергии на движение поездов. В СССР и за рубежом уделяют большое внимание схемам безреостатного пуска (с использованием систем импульсного регулирования постоянного тока).

Влияние нагрузок тяговой сети на смежные линии при системе постоянного тока относительно невелико и легко устранимо, что можно отнести к существенным преимуществам этой системы. Иначе обстоит дело с электрокоррозией подземных сооружений, что как уже было отмечено, является особенностью и одним из существенных недостатков системы постоянного тока. Для борьбы с этими явлениями разработаны эффективные мероприятия, значительно уменьшающие опасность электрокоррозии подземных сооружений.

Участки дорог постоянного тока (см. рис. 1.3) питаются от энергосистемы, а энергия преобразуется с помощью полупроводниковых преобразователей. Ранее подстанции постоянного тока оборудовались в основном двигатель-генераторами. Появившиеся ртутные выпрямители более легкие и дешевые, имеющие высокий к.п. д., быстро вытеснили двигатель-генераторы. В настоящее время для преобразования переменного тока в постоянный применяют только полупроводниковые преобразователи.

В Советском Союзе в связи с переходом к электрификации по системе однофазного тока промышленной частоты электрификацию на постоянном токе используют в основном при продолжении электрификации существующих линий, ранее электрифицированных по системе постоянного тока.

Слабое влияние тяговой сети постоянного тока на смежные линии, являющееся существенным преимуществом этой системы, заставило искать решения по повышению напряжения в контактной сети. Но это определяло необходимость преобразования постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого более низкого напряжения. Велись различные исследования в этом направлении. Создание управляемых полупроводниковых преобразователей открыло возможность для разработок и экспериментальных исследований по внедрению системы импульсного преобразования постоянного тока на электровозе, что может позволить повысить напряжение в контактной сети до 6 кВ. Разрабатываются также системы с преобразованием постоянного тока контактной сети в трехфазный ток регулируемой частоты при асинхронных двигателях на электровозах.

На дорогах постоянного тока нетяговые потребители питаются через специальный трансформатор от шин тяговых подстанций.

Система однофазного тока промышленной частоты 50 Гц. Основным преимуществом этой системы по сравнению с системой постоянного

тока является возможность использования более высокого напряжения в контактной сети. В СССР принято напряжение 25 кВ. При этом тяговые подстанции превращаются в простые трансформаторные, а сечение контактной сети значительно уменьшается даже при больших расстояниях между подстанциями (40—60 км).

Наибольшее распространение получил э.п.с. с двигателями постоянного тока и преобразовательной установкой на локомотиве. Трансформаторы этой установки позволяют регулировать напряжение на двигателях под нагрузкой.

При питании однофазной нагрузки от трехфазной районной сети неизбежна различная нагрузка фаз первичной системы электроснабжения. Несимметрия нагрузки приводит к ухудшению работы первичной системы (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи, релейной защиты). При мощных энергосистемах обычно тяговая нагрузка составляет небольшую долю от всей нагрузки системы. В этих случаях несимметрия тяговой нагрузки не играет существенной роли в нагрузке, действующей на отдельные элементы системы. Однако она вызывает на шинах тяговых подстанций и в питающих их линиях передачи существенную несимметрию напряжения. Несимметрия напряжения оказывает неблагоприятные влияния на работу трехфазных потребителей, получающих питание от этих подстанций и линий электропередачи. Значительное влияние тягового тока на линии слабого тока и необходимость принятия дорогих мер защиты уменьшают эффективность системы переменного тока. Это соображение частично теряет силу, если линии связи были калиброваны до электрификации.

Принципиальная схема питания при электрической тяге на однофазном токе промышленной частоты (см. рис. 1.4) получает тот же вид, что и выше (см. рис. 1.3), с той, однако, разницей, что число подстанций уменьшается и сами подстанции упрощаются. Используются однофазные, трехфазные или трехфазно-двухфазные трансформаторы.

Система однофазного тока промышленной частоты принята как основная для дальнейшей электрификации железных дорог в СССР, а также во Франции, Японии (при частоте 60 Гц), Англии и других странах.

Система однофазного тока пониженной частоты $16\frac{2}{3}$ и 25 Гц. Преимущество этой системы по сравнению с системой постоянного тока то же, что и системы однофазного тока промышленной частоты: возможность иметь более высокое напряжение в контактной сети и, следовательно, допускать большее расстояние между подстанциями (до 40—60 км) при одновременном уменьшении сечения проводов контактной сети.

В качестве тяговых двигателей на дорогах однофазного тока пониженной частоты применяют коллекторные двигатели, имеющие тяговые характеристики, близкие к характеристикам двигателей постоянного тока. Как и при промышленной частоте, напряжение на зажимах тягового двигателя регулируется изменением коэффициента трансформации трансформатора, установленного на подвижном составе.

Коллекторные двигатели имеют коэффициент мощности 0,8—0,88, а при трогании с места еще ниже (0,3—0,4). В результате вся система

однофазного тока пониженной частоты имеет низкий коэффициент мощности (0,6). К недостаткам системы относится также заметное влияние на линии связи и сложность рекуперации энергии.

Питание районных и ветяговых железнодорожных потребителей от электрифицированных железных дорог пониженной частоты усложнено.

На дорогах однофазного тока пониженной частоты используют две схемы питания. В первой (см. рис. 1.5) 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. Те и другие работают параллельно на однофазную линию передачи высокого напряжения, от которой через трансформаторные подстанции питается тяговая сеть. При питании только от энергосистемы района из схемы рис. 1.5 исключаются специальные электростанции. Такую схему называют схемой с сосредоточенным преобразованием энергии.

Во второй схеме (распределенного преобразования энергии) каждая подстанция оборудуется преобразователями частоты и числа фаз (см. рис. 1.6).

Преобразователи к первичной и к тяговой сети присоединяют через трансформаторы.

На пониженной частоте работают многие электрифицированные дороги Европы (в основном $16\frac{2}{3}$ Гц) и Америки (в основном 25 Гц). Напряжение в тяговой сети на дорогах Европы от 11 до 16 кВ, на дорогах Америки 11 кВ.

Система трехфазного переменного тока. Основным преимуществом системы трехфазного переменного тока является простота питания тяговой сети и равномерная нагрузка фаз первичной сети. Главным недостатком системы является сложная двухпроводная контактная сеть (третьим проводом трехфазной тяговой сети являются рельсы), вызывающая особые затруднения на больших станциях. Система трехфазного тока на действующих линиях заменена системами с однопроводной сетью.

Схемы питания тяговых подстанций от энергосистемы. Согласно правилам устройства электроустановок [1] в СССР все приемники по степени их значимости и ответственности разделяются на три категории и соответственно этому обеспечивается необходимая степень надежности схем питания.

Электрифицированные железные дороги, т. е. дороги с электрической тягой, относятся к первой категории, поскольку перерыв в их работе приносит значительный ущерб народному хозяйству. Для таких потребителей должно быть предусмотрено питание от двух независимых источников электроэнергии. Таковыми считаются отдельные районные подстанции, разные секции шин одной и той же подстанции районной или тяговой. В соответствии с этим схема питания тяговых подстанций от энергосистемы на дорогах СССР во всех случаях должна быть такой, чтобы выход из работы одной из районных подстанций или