

**ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**



**Б. А. Аржанников**

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**



Федеральное агентство железнодорожного транспорта  
Уральский государственный университет путей сообщения

---

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

---

**Б. А. Аржанников**

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

*Монография*

— ❁ —

**B. A. Arzhannikov**

**BASIC PROVISIONS  
OF THE THREE-PHASE  
ELECTRIC TRACTION SYSTEM**

*Monograph*

Екатеринбург  
УрГУПС  
2023

УДК 621:331.621:316

ББК 39.15

А80

*Автор:* Б. А. Аржанников — профессор кафедры «Электроснабжение транспорта», д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, Уральский государственный университет путей сообщения

*Рецензенты:* В. Н. Ли — профессор кафедры «Системы электроснабжения», д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, Дальневосточный государственный университет путей сообщения

О. А. Сидоров — профессор кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», д-р техн. наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, Омский государственный университет путей сообщения

А. Н. Смердин — заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», д-р техн. наук, доцент, Омский государственный университет путей сообщения

### **Аржанников, Б. А.**

А80 Основные положения трехфазной системы электрической тяги : монография / Б. А. Аржанников. — Екатеринбург : УрГУПС, 2023. — 263, [1] с. — (Трехфазная система электрической тяги).

ISBN 978-5-94614-516-9

Среди систем электрической тяги постоянного и переменного тока рассмотрена трехфазная система переменного тока, экспериментальные исследования которой начались в конце XIX века и завершились ее применением в 1976 году.

В монографии представлены переработанные и дополненные материалы по эксплуатации трехфазной системы электрической тяги с учетом научных и технических достижений.

Издание предназначено для специалистов, научных работников, студентов и аспирантов, занимающихся разработкой, изучением и эксплуатацией устройств тягового электроснабжения и электроподвижного состава электрических железных дорог.

Among the systems of direct and alternating current electric traction, a three-phase alternating current system is considered, experimental studies of which began at the end of the XIX century and ended with its application in 1976.

The monograph presents revised and supplemented materials on the operation of the three-phase electric traction system, taking into consideration scientific and technological achievements.

This publication is intended for specialists, researchers, students and postgraduates engaged in the design, study and operation of traction power supply devices and electric railway rolling stock.

УДК 621:331.621:316

ББК 39.15

*Издано по решению  
редакционно-издательского совета УрГУПС*

ISBN 978-5-94614-516-9

© Аржанников Б. А., 2023

© Оформление. Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), 2023

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	9
<b>Глава 1. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ</b> .....	11
1.1. Система электрической тяги постоянного тока 3,0 кВ.....	11
1.1.1. Пути совершенствования системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ.....	11
1.1.2. Преобразовательные трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой РПН .....	14
1.1.3. Краткий обзор электронных схем управления тиристорными переключающими устройствами регулирования напряжения трансформаторов .....	23
1.1.4. Преобразовательные выпрямительный и выпрямительно-инверторный агрегаты с регулированием напряжения .....	27
1.1.5. Вольтодобавочные устройства ВДУ .....	32
1.1.6. Тяговый блок преобразования повышенного напряжения с питающей линией электропередачи переменного тока .....	37
1.1.7. Преобразовательные пункты повышенного напряжения ППН с питающей линией электропередачи постоянного тока.....	39
1.1.8. Буферная система тягового электроснабжения БСТЭ .....	42
1.1.9. Управляемая система тягового электроснабжения .....	46
1.1.10. Повышение напряжения в контактной сети постоянного тока до 6, 12, 24 кВ.....	46
1.1.11. Сравнительный анализ систем электрической тяги постоянного тока с напряжением холостого хода тяговых подстанций 6,6 кВ и 3,5 кВ.....	55
1.2. Система электрической тяги однофазного переменного тока .....	65

1.2.1. Краткие сведения о контактных подвесках электротяговой сети с токосъемом по нижней поверхности контактного провода (токосъем «понизу»).....	66
1.2.2. Пути усиления однофазной системы тягового электроснабжения .....	72
1.3. Основное направление повышения электрической мощности системы тягового электроснабжения.....	90
1.4. Оценка действующих систем электрической тяги постоянного 3,0 кВ и однофазного переменного тока 25 кВ 50 Гц .....	90
1.5. Выводы по первой главе.....	94
<b>Глава 2. ИСТОРИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СХЕМ И УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ .....</b>	<b>96</b>
2.1. Первые эксперименты использования электрической энергии для тяги .....	96
2.2. Состояние и разработка тяговых электрических двигателей.....	98
2.3. Начальные разработки системы трехфазного тягового электроснабжения переменного тока .....	100
2.4. Возникновение системы однофазного тягового электроснабжения переменного тока.....	106
2.5. Схемы и основные устройства трехфазной системы тягового электроснабжения «двухфазная воздушная линия — рельс».....	108
2.5.1. Электрическая схема питания и секционирования контактной сети .....	108
2.5.2. Контактная подвеска .....	111
2.6. Выводы по второй главе.....	119
<b>Глава 3. ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ .....</b>	<b>121</b>
3.1. Варианты организации схем токосъема трехфазной системы электрической тяги .....	121
3.2. Трехфазная система электрической тяги с горизонтальным расположением устройств токосъема «понизу» .....	121

3.3. Трехфазная система электрической тяги с вертикальным расположением устройств «бокового» токосъема .....	124
3.4. Варианты схем питания электровоза трехфазной системы электрической тяги .....	126
3.5. Предварительный выбор контактной подвески трехфазной системы электрической тяги .....	130
3.5.1. Краткие сведения о параметрах электрической контактной цепи системы однофазного переменного тока.....	130
3.5.2. Токи и потери мощности в тяговых сетях однофазной и трехфазной систем электрической тяги.....	135
3.5.3. Характеристики контактных подвесок и показатели серий электровозов, используемые при предварительном выборе контактной подвески трехфазной системы электрической тяги.....	138
3.6. Выводы по третьей главе.....	141

**Глава 4. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ В СИММЕТРИЧНОМ И НЕСИММЕТРИЧНОМ РЕЖИМАХ РАБОТЫ .....**

4.1. Электромагнитные процессы в трехфазной системе тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока .....	142
4.1.1. Общие замечания и постановка задачи .....	142
4.1.2. Симметричный режим работы трехфазной системы тягового электроснабжения .....	143
4.1.3. Несимметричный режим работы трехфазной системы тягового электроснабжения .....	148
4.2. Экспериментальная проверка режимов работы тягового трансформатора на физической модели преобразовательного агрегата.....	154
4.2.1. Токи и напряжения преобразовательного агрегата в трехфазном и в однофазном режимах работы тягового трансформатора .....	154

4.2.2. Мощность тягового трансформатора при разрыве провода питания одной фазы первичной обмотки.....	161
4.3. Выводы по четвертой главе.....	163

## **Глава 5. УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

<b>ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ .....</b>	<b>164</b>
5.1. Основные требования к созданию трехфазной системы электрической тяги.....	164
5.2. Схемы положения токоприемников и контактной подвески в условиях работы трехфазной системы электрической тяги на перегоне, на главном пути и на боковых путях станции электрифицированного участка .....	165
5.3. Устройство автоматического подъема и опускания токоприемников электровоза .....	169
5.4. Особенности организации движения поездов на электрифицированном участке трехфазной системы электрической тяги.....	172
5.4.1. Организация движения поездов на участке трехфазной системы электрической тяги с контактной сетью на боковых путях станции .....	172
5.4.2. Организация движения поездов на электрифицированном участке трехфазной системы электрической тяги без контактной сети на боковых путях станции.....	177
5.5. Устройства контактной сети трехфазной системы электрической тяги при «боковом» токосъеме.....	180
5.5.1. Схема питания контактной сети станции и поста секционирования.....	180
5.5.2. Секционирование контактной сети.....	182
5.5.3. Профиль сечения и особенности определения износа контактного провода в однофазной и в трехфазной системах электрической тяги.....	183
5.5.4. Выбор профиля контактного провода с зажимом для вертикального подвешивания к консоли опоры через гибкие или жесткие струнки .....	187

5.5.5. Жесткое и полужесткое крепление контактного провода к консоли опоры .....	192
5.5.6. Организация вертикального зигзага контактного провода при боковом токосяеме.....	196
5.5.7. Простая подвеска контактного провода с «боковым» токосяемом .....	201
5.5.8. Цепная несвязанная контактная подвеска двух фаз «a» и «b» контактных проводов с «боковым» токосяемом .....	203
5.5.9. Цепная связанная контактная подвеска бокового токосяема с жестким соединением контактных проводов фаз «a» и «b» между собой изоляционными жесткими стержнями с одним несущим тросом.....	204
5.5.10. Расчет параметров простой контактной подвески с боковым токосяемом контактного провода .....	208
5.5.11. Ветроустойчивость контактных подвесок с «боковым» токосяемом трехфазной системы и с токосяемом «понизу» однофазной системы электрической тяги .....	214
5.6. Устройство токосяема «понизу» контактного провода трехфазной системы электрической тяги .....	217
5.6.1. Общие положения .....	217
5.6.2. Влияние тока на электроэрозию, на износ контактного провода и токовые вставки полоза токоприемника электроподвижного состава.....	218
5.7. Тяговая подстанция трехфазной системы тягового электроснабжения .....	223
<b>Глава 6. ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ .....</b>	<b>227</b>
6.1. Основные положения для разработки структурной схемы силовой цепи и системы управления асинхронным тяговым электроприводом электровоза .....	227
6.2. Силовая электрическая схема электровоза трехфазной системы электрической тяги .....	234



6.2.1. Цепи первичной обмотки тягового трансформатора.....	235
6.2.2. Цепи вторичных обмоток тягового трансформатора.....	237
6.2.3. Тяговый преобразователь.....	238
6.2.4. Цепи питания вспомогательных машин .....	240
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>241</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>242</b>
Приложение 1. Тяговые расчеты. Результаты электрического расчета при пропуске поездов с составом массой 6235 т с электровозом 2ЭС6 с коллекторными тяговыми двигателями — расчет 1 и 2 и с электровозом 2ЭС6 с АД — расчет 3 с постоянной скоростью 9 км/ч на участках с уклоном‰ протяженностью 0,5; 1; 2 км с определением расхода электрической энергии на тягу.....	250
Приложение 2. Трехфазный электроподвижной состав (часть серий электровозов эксплуатационного парка до 1976 года).....	259
Приложение 3. Трехфазные системы электрической тяги в Италии, 1902–1976 гг. ....	261

# ВВЕДЕНИЕ

Историческая последовательность применения и смен видов энергии в системах устройств тяги на железнодорожном транспорте непосредственно связана с развитием научно-технического мировоззрения и на его базе — с реальными научными и техническими достижениями, откуда и происходит объективная неизбежность изменения вида энергии и, соответственно, совершенствование устройств тяги, направленные на повышение технико-экономической эффективности, надежности и простоты реализации этих устройств.

Сменившая тепловую энергию электрическая энергия, используемая в системе электрической тяги, состоит из систем постоянного и переменного тока.

Система постоянного тока напряжением 3000 В применяется на железнодорожных линиях России и в некоторых зарубежных странах (3000 В и реже 1500 В).

Система постоянного тока повышенного напряжения в контактной сети 6, 12, 24 кВ в течение длительного периода времени (с середины XX в.) является предметом исследования, завершившегося сообщением в журнале «Железнодорожный транспорт» № 3 2022 г. о нецелесообразности разработки системы электрической тяги повышенного напряжения постоянного тока в контактной сети 6 и более кВ.

Электрическая энергия переменного тока, как известно, подразделяется на однофазную систему и многофазную систему, из которой наиболее реальной для целей тяги рассматривается трехфазная система.

Однофазная система переменного тока напряжением в контактной сети 20–25 кВ частотой 16  $\frac{2}{3}$ , 50 и 60 Гц является распространенной системой в мире, а в России — 25 кВ 50 Гц. Отмечено применение в контактной сети однофазного переменного тока напряжением 50 кВ 50 Гц на тысячекилометровом угольном маршруте в ЮАР и на угольной линии (125 км) в США напряжением 50 кВ 60 Гц.

Начало использования электрической энергии трехфазного тока в тяге рельсового транспорта пришлось на конец XIX — начало XX в. в странах Западной Европы и в Бразилии. В настоящее время трехфазная система переменного тока ~3 x (10–25) кВ 50 Гц находится в стадии возрождения.

Основываясь на работах ученых и производителей конца XIX века, опираясь на мировой опыт, на современные достижения науки и техники, и учитывая достоинства применяемых в различных технических сферах трехфазных электрических систем и устройств, а также преимущество системы электрической тяги на переменном токе, в монографии в дополнение к ранее опубликованным материалам рассматриваются уточненные и новые предложения развития трехфазной системы электрической тяги.

Учитывая направление развития регионов Сибири и Дальнего Востока и роль железных дорог при освоении месторождений сибирского и восточного регионов России, а также затруднения существующей однофазной системы тяги переменного тока в реализации растущего объема тяжеловесного движения на российских железных дорогах, возникает реальная необходимость возрождения трехфазной системы электрической тяги, обладающей наилучшими показателями по сравнению с однофазной системой переменного тока.

Автор считает своим долгом поблагодарить сотрудников кафедр «Электроснабжение транспорта» и «Электрическая тяга», кандидата технических наук, профессора А. П. Сухогузова, кандидатов технических наук, доцентов А. В. Паранина, Ю. А. Кочунова, И. А. Юшкову и Т. С. Тарасовского, принимавших участие в подготовке материалов для этой монографии.

# СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

## 1.1. СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА 3,0 кВ

### Общие положения

К 2001 году в электрифицированных железных дорогах России [1] соотношение систем тяги близко к мировому и европейскому и составляло: 53,3 % переменный ток (25 кВ 50 Гц) и 46,7 % постоянный 3 кВ.

При электрификации новых участков системе переменного тока 25 кВ 50 Гц отдается предпочтение, но «многие существующие системы [2] постоянного тока все еще используются — например: Южная Африка и Соединенное Королевство (750 В и 1500 В); Нидерланды, Япония, Мумбаи, Ирландия (1500 В); Словения, Бельгия, Италия, Польша, Россия, Испания (3000 В) и г. Вашингтон (750 В).

Первые железные дороги в России в начале XX в. были электрифицированы на постоянном токе с напряжением в контактной сети 1,2 кВ с дальнейшим увеличением напряжения с 1920-х гг. до 1,5 кВ и в 1930-е гг. до 3,0 кВ с увеличением расчетного напряжения на двигатель с 750 В до нормированного 1500 В.

Рост мощностей, потребляемых электровозами при введении скоростных поездов и поездов повышенной массы, вызвал увеличение потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения со снижением напряжения на электровозах и потребовал, соответственно, повышения напряжения в контактной сети выше 3000 В, а на шинах тяговых подстанций возможного повышения до допустимого напряжения 3600 В [3] и 3700 В [4].

### 1.1.1. Пути совершенствования системы тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ

Электроснабжение постоянного тока 3,0 кВ на электрифицированных участках осуществляется пассивными и активными способами и соответствующими устройствами усиления системы постоянного тока.

Основными вариантами пассивного (неуправляемого по ЭДС источником напряжения) усиления действующих электрифицированных участков на постоянном токе, применяемых в условиях эксплуатации, являются: увеличение сечения контактной подвески до экономического значения, в том числе устройства электропитания электроподвижного состава по контактной сети постоянного тока и по линии электропередачи переменного тока, строительство постов секционирования и пунктов параллельного соединения, а также сооружение посередине между существующими тяговыми подстанциями дополнительной типовой двухагрегатной подстанции с питанием по ЛЭП 110 кВ, что связано со значительными капитальными вложениями.

Наиболее простым решением повышения напряжения в контактной сети является повышение напряжения холостого хода вентильных преобразователей с помощью переключения числа витков (анцапф) силовых и тяговых трансформаторов. Однако повышение напряжения холостого хода преобразователей ограничивает применение электрического рекуперативного торможения и, как следствие, снижение безопасности движения поездов.

Другим техническим решением, широко применяемым в тяговых подстанциях и позволившим без увеличения напряжения холостого хода повысить номинальное напряжение преобразовательного агрегата, явилась замена нулевых и мостовых шестипульсовых схем выпрямления на двенадцатипульсовую схему (рис. 1.1). Но и в этом случае повышение номинального напряжения преобразовательного агрегата на 100–120 В оказалось недостаточным для обеспечения существенного повышения пропускной и провозной способности электрифицированных участков постоянного тока.

Опыт разработок и исследования научных и учебных институтов, ряда железных дорог, зарубежных организаций и фирм показывает, что устранение ограничений по напряжению и токовым нагрузкам в контактной сети системы электротяги 3,0 кВ может быть решено с помощью активных (управляемых ЭДС источников напряжения) технических устройств усиления системы тягового электроснабжения постоянного тока:

1. Применение преобразовательных трансформаторов с автоматическим регулированием напряжения [5–20].
2. Установка на тяговых подстанциях преобразовательных агрегатов с регулируемыми выпрямительными блоками [21–29].
3. Установка в межподстанционной зоне вольтодобавочных устройств (ВДУ), включаемых в рассечку контактной сети [30].

4. Установка на существующих тяговых подстанциях ВДУ с регулированием напряжения [24, 31–33].

5. Установка в межподстанционной зоне тягового блока преобразования повышенного напряжения от питающей линии электропередачи 10,5 кВ (35 кВ):

— с использованием преобразовательного трансформатора (одноагрегатный тяговый блок (ОТБ) [1, 34];

— без использования преобразовательного трансформатора (блок преобразования повышенного напряжения БППН-10,5/3,3) [36].

6. Установка в межподстанционной зоне пунктов повышенного напряжения ППН-6,6/3,3 с питающим фидером постоянного тока 6,6 кВ [32, 37, 38].

7. Повышение напряжения до 6, 12, 24 кВ в контактной сети постоянного тока [1, 51–55].

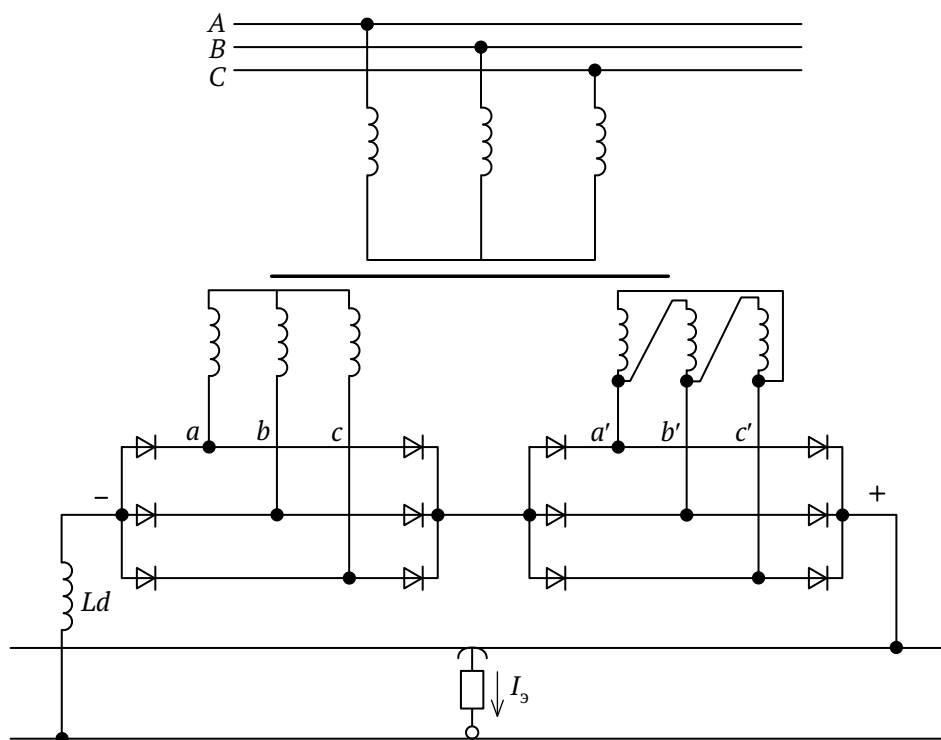


Рис. 1.1. Принципиальная электрическая схема системы тягового электроснабжения постоянного тока

### 1.1.2. Преобразовательные трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой РПН

Известные в настоящее время способы регулирования напряжения трансформаторов можно разделить на три основные группы: ступенчатое РПН (контактное и бесконтактное); плавное бесконтактное РПН; плавно-ступенчатое РПН.

#### Контактное ступенчатое РПН с токоограничивающим сопротивлением

Вторичное напряжение  $U_2$  трансформатора изменяется при значительных отклонениях первичного напряжения  $U_1$  и изменении тока нагрузки от нуля до номинальной величины.

Регулирование напряжения осуществляется изменением ступенями числа витков первичной или вторичной обмоток. У силовых трансформаторов на тяговых подстанциях переменного тока, у головных понижительных трансформаторов на тяговых подстанциях постоянного тока и у преобразовательных трансформаторов ответвления делают на первичной обмотке. При переключении ответвлений обмотки под нагрузкой недопустим разрыв цепи тока трансформатора.

Схема переключения ответвлений обмотки под нагрузкой [5] с применением токоограничивающего сопротивления (реактора  $LR$ ) показана на рис. 1.2.

Переход с одного ответвления ( $x_1$ ) на соседнее ( $x_2$ ) осуществляется в порядке позиций 1–2–3–4–5–6–7. Перед размыканием контактов переключателя В1 и В2 производится отключение их от питающей сети или от нагрузки выключателями К1 и К2. В крайних позициях (1 и 7) индуктивное сопротивление реактора близко к нулю, так как рабочий ток, протекая по параллельным цепям реактора в противоположных направлениях, не создает магнитного потока в магнитопроводе реактора. В промежуточной позиции (4) циркулирующий ток  $I_{Ц}$  ограничен увеличившимся сопротивлением реактора  $LR$ .

При переключении с ответвления  $x_1$  до  $x_5$ , т.е. с уменьшением числа витков  $w_1$  первичной обмотки, напряжение холостого хода вторичной обмотки  $U_{20}$  увеличивается

$$U_{20} = \frac{U_{10}}{K} = \frac{U_{10}}{w_1} \cdot w_2,$$

где  $w_2$  — число витков вторичной обмотки.

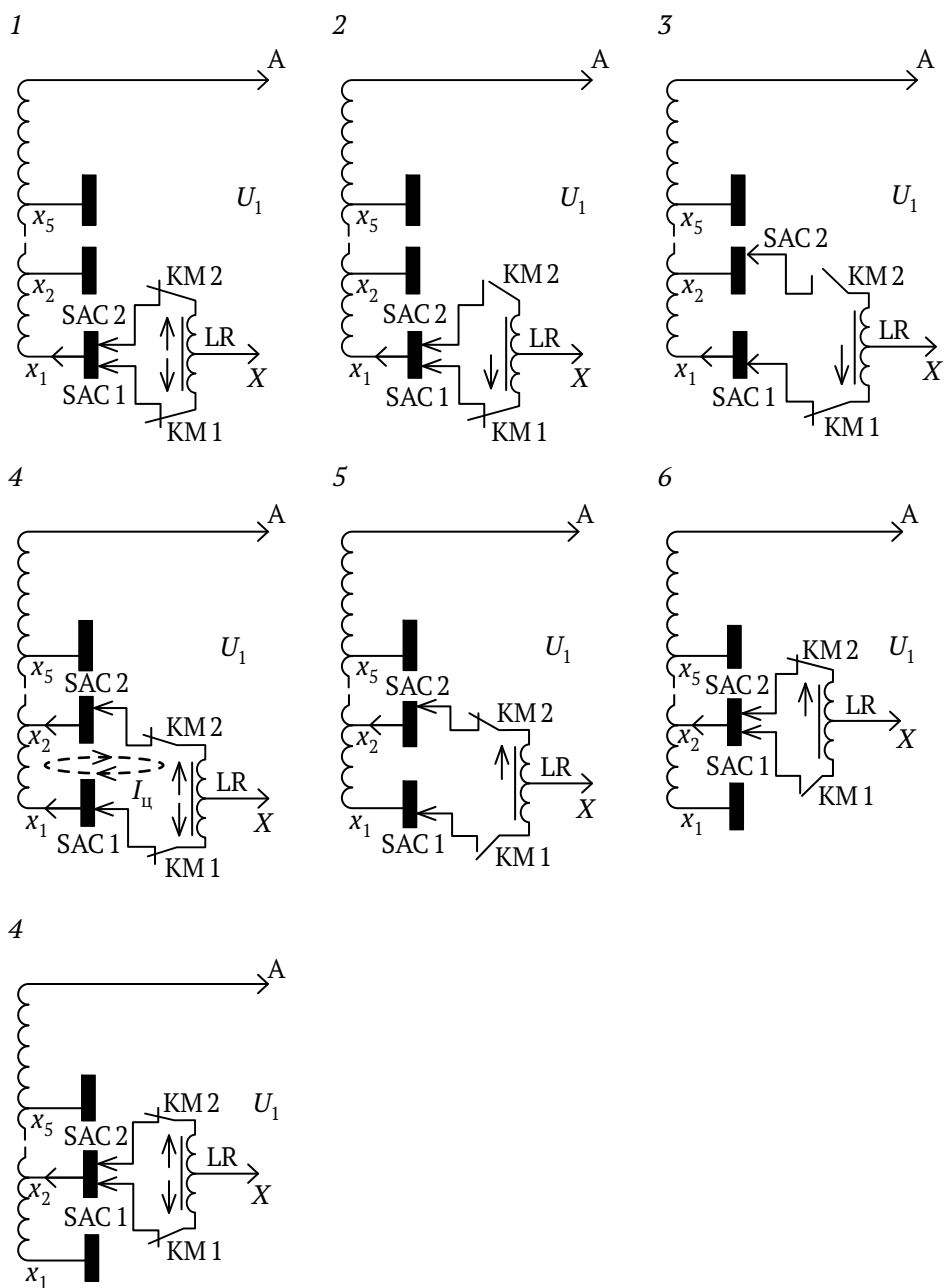


Рис. 1.2. Процесс переключения под нагрузкой  
стоктоограничивающим реактором



Внешние характеристики трансформатора с РПН по схеме рис. 1.2 представлены на рис. 1.3.

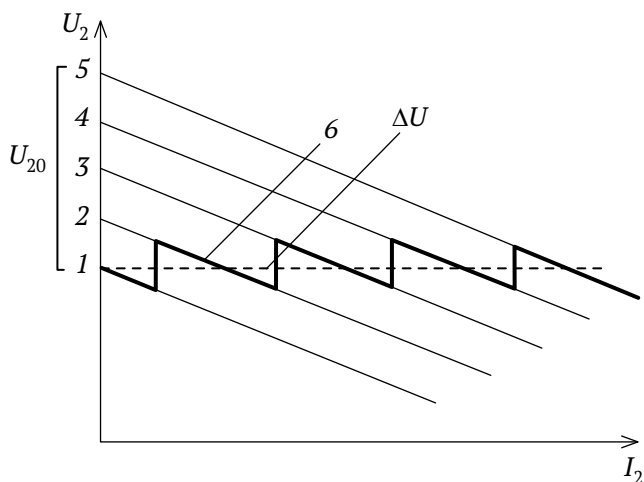


Рис. 1.3. Внешние характеристики трансформатора: 1, 2, 3, 4, 5 — естественные; 6 — автоматическая

Диапазон регулирования преобразовательного трансформатора ТДРУНГ-20000/110Ж с переключающим устройством РНТ-13 составляет  $\pm 4 \times 2,5$  % при ступени регулирования, равной  $\Delta U\% = 2,5$  % [6, 7].

#### **Бесконтактное плавное регулирование напряжения с реакторами, управляемыми УР1 и УР2 и с неуправляемым НР1 и УР2**

На электрифицированных участках железных дорог используется бесконтактное регулирование выпрямленного напряжения<sup>1</sup>, основанное на плавном изменении коэффициента трансформации [8, 9] по схеме на рис. 1.4.

По этой схеме разработаны и испытаны в составе системы автоматического регулирования напряжения преобразовательные трансформаторы ТДПУ (ТДРУ)-20000/35(10), ТДП-16000/10, ТРДП-16000/10 мощностью 20000 и 16000 кВА на напряжение питающей сети 35 и 10 кВ для

<sup>1</sup>В современных трехфазных трансформаторах магнитная несимметрия магнитной системы практически невелика. Так как сечение ярм берется на 0,5–10 % больше сечения стержней, то при исследовании электромагнитных процессов трехфазного трансформатора можно использовать дифференциальные уравнения, векторные диаграммы и схемы замещения однофазного трансформатора [5].

схем выпрямления «две обратные звезды с уравнительным реактором», трехфазных мостовых (шестипульсовой и двенадцатипульсовой) [10, 11], разработан 3-диапазонный трансформатор с расположением реакторов в одном баке с трансформатором [12] ТРДНПА-16000/35(10) ЖУ1 и трансформатор с изоляцией в сухом исполнении меньшей мощности [13] ТРСЗПА-6300/10 Ж УХЛ2.

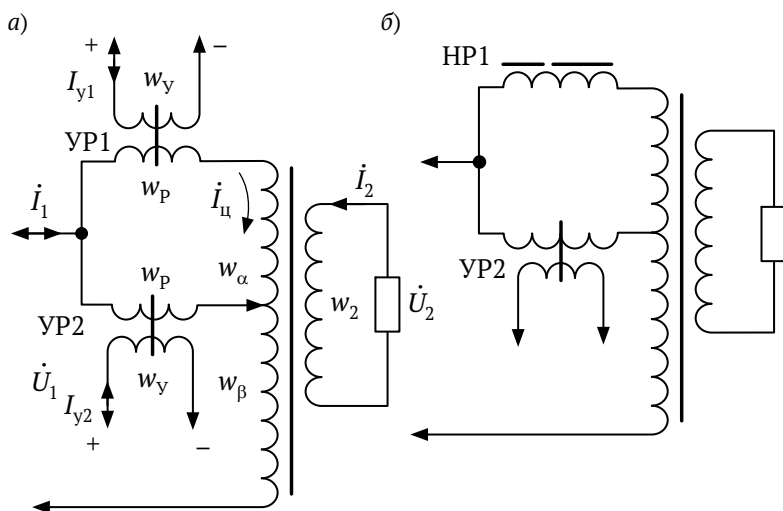


Рис. 1.4. Принципиальные электрические схемы бесконтактного РПН с управляемыми УР1, УР2 (а) и с неуправляемыми и управляемыми НР1, УР2 (б) реакторами

Введение в 60-х гг. XX в. на тяговых подстанциях устройств бесконтактного автоматического регулирования напряжения (БАРН) обеспечило повышение напряжения в контактной сети со стабилизацией напряжения на тяговых подстанциях на уровнях 3500–3700 В [14–18]. На 932-километровом направлении Балезино — Пермь — Екатеринбург — Тюмень с существующими 54-мя тяговыми подстанциями это привело к сокращению необходимости строительства дополнительных тяговых подстанций с 17-ти до 2-х, т.е. произошло существенное увеличение КПД системы тягового электроснабжения.

Управляемый преобразовательный трансформатор (см. рис. 1.4) состоит из собственно трансформатора и реактора (неуправляемый реактор НР1 и управляемый реактор УР2). Такое регулирование может осуществляться и со стороны вторичной обмотки. В процессе автоматического регулирования производят подмагничивание реактора УР2.

На рис. 1.5 представлены внешние характеристики регулируемого преобразовательного агрегата с одним диапазоном регулирования, равным  $\frac{3900 - 3500}{3900} \cdot 100\% = 13\%$ .

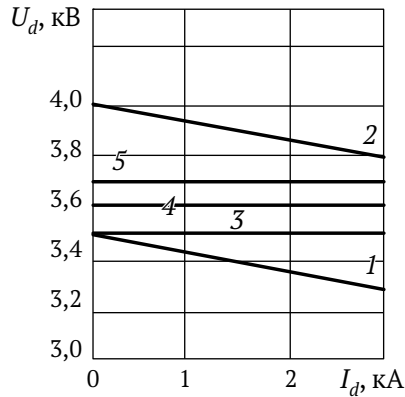


Рис. 1.5. Внешние характеристики регулируемого преобразователя:  
1, 2 — естественные; 3–5 — автоматические

Сопротивление реактора НР1 с воздушным зазором магнитопровода имеет постоянную малую величину. Если УР2 размагничен, то напряжение питающей сети приложено к виткам  $w_\alpha + w_\beta$  обмотки трансформатора и вторичное напряжение минимально. При намагничивании УР2 вторичное напряжение увеличивается и достигает наибольшего значения, так как в этом случае напряжение питающей сети прикладывается к наименьшему числу витков первичной обмотки  $w_\beta$ .

Особенностью такого трансформатора является плавное изменение коэффициента трансформации по закону

$$K_\rho = K_\beta + \rho K_\alpha, \quad (1.1)$$

где  $K_\beta = \frac{w_\beta}{w_2}$ ;  $K_\alpha = \frac{w_\alpha}{w_2}$ ;  $\rho$  — параметр, зависящий от состояния подмагничивания (сопротивления) УР2;

$$\rho = \frac{Z_{\text{УР2}}}{Z_\alpha + Z_{\text{НР}} + Z_{\text{УР2}}}, \quad (1.2)$$

где  $Z_\alpha$ ,  $Z_{\text{НР}}$ ,  $Z_{\text{УР2}}$  — полные сопротивления обмоток трансформатора  $w_\alpha$ , реакторов НР1 и УР2.

Вторичное напряжение холостого хода трансформатора изменяется в соответствии с отношением

$$U_{20} = \frac{1}{K_p} U_1. \tag{1.3}$$

Повышение технико-энергетических показателей регулируемого преобразовательного агрегата произведено заменой в схеме на рис. 1.4 управляемого реактора УР2 на тиристорный ключ ТК2. Принципиальная электрическая схема бесконтактного РПН с тиристорно-реакторным переключающим устройством [19] приведена на рис. 1.6. При регулировании напряжения изменение коэффициента трансформации соответствует формуле (1.1:  $K_p = K_\beta + \rho K_\alpha$ ), в котором параметр  $\rho$  зависит от состояния тиристорного ключа ТК2 (открыт или закрыт);

$$\rho = \frac{R_{ТК}}{Z_\alpha + Z_{HP} + R_{ТК}}. \tag{1.4}$$

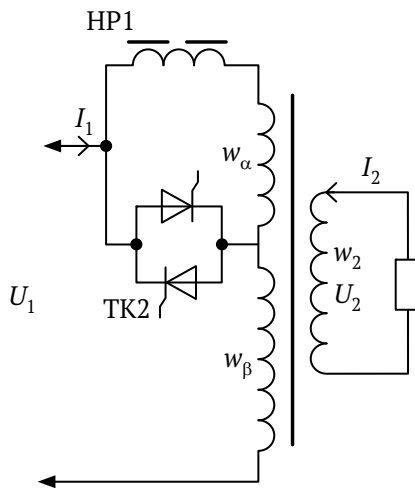


Рис. 1.6. Принципиальная электрическая схема бесконтактного РПН с тиристорно-реакторным переключающим устройством

## Бесконтактное ступенчатое РПН с тиристорными отводами обмоток трансформатора

В мировой практике работы по созданию тиристорных регуляторов ведутся в двух направлениях: использование в коммутирующем контуре токоограничивающих элементов и разработка сложных схем управления переключением тиристорных ключей в ответвлениях обмотки трансформатора с целью недопущения разрыва цепи рабочего тока трансформатора.

### Схемы тиристорных переключающих устройств с токоограничивающим реактором

Схемы переключающего устройства с токоограничивающим реактором  $LR$  показаны на рис. 1.7–1.9.

В устройстве (рис. 1.7) в качестве выключателей  $K1$  и  $K2$  (см. рис. 1.2) используются тиристорные ключи  $VT1$  и  $VT2$ . Переключение ступеней происходит так же, как и в устройстве, показанном на рис. 1.2. Переключатель  $B$  имеет два подвижных контакта  $B1$  и  $B2$ , подключенных каждый к своему тиристорному ключу. При этом переключается тот подвижный контакт, в цепи которого тиристорный ключ закрыт, и ток не протекает.

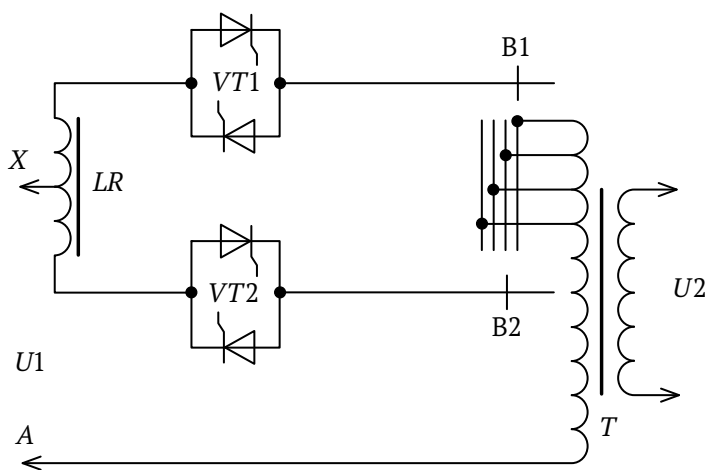


Рис. 1.7. Схема ступенчатого РПН трансформатора с тиристорными ключами

Для исключения разрыва цепи тока импульсы управления на вступающий в работу тиристорный ключ подаются до закрытия выходящего из работы тиристорного ключа.

В схеме на рис. 1.8 при длительно открытом  $VT2$  из работы выводится токоограничивающий реактор. Устройство [17] состоит из двух тиристорных

ключей  $VT1$  и  $VT2$ . Каждый ключ образован двумя тиристорами, включенными встречно-параллельно. Тиристорные ключи подключаются к ответвлениям  $x_1$  и  $x_2$  регулировочной обмотки трансформатора.

Пусть в исходном состоянии открыт тиристорный ключ  $VT2$ , а ключ  $VT1$  закрыт. На выходе трансформатора напряжение холостого хода  $U_{20}$  максимальное. Для понижения напряжения подают импульсы управления на тиристорный ключ  $VT1$  и снимают с тиристорного ключа  $VT2$ . Ток первичной обмотки трансформатора переходит с тиристорного ключа  $VT2$  на тиристорный ключ  $VT1$ .

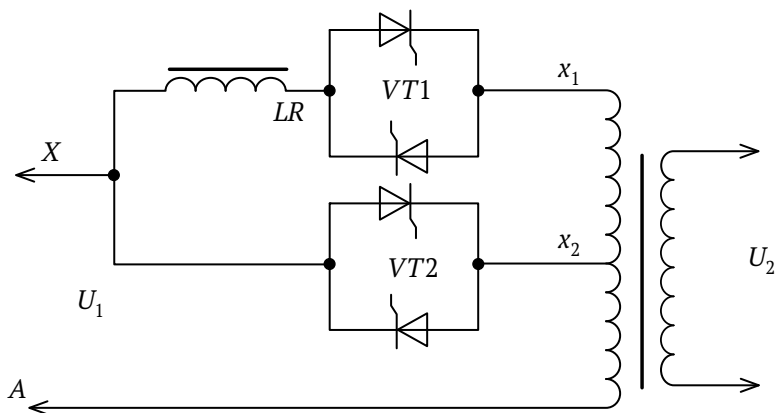


Рис. 1.8. Принципиальная схема тиристорного РПН трансформатора с одной ступенью регулирования

За время переключения оба тиристорных ключа открыты, и в контуре, образованном тиристорными ключами и регулировочной обмоткой трансформатора, протекает циркулирующий ток  $I_{ц}$ , ограниченный индуктивным сопротивлением реактора.

К недостаткам этой схемы следует отнести увеличение сопротивления трансформаторного агрегата за счет подключенного к трансформатору индуктивного сопротивления реактора при открытом тиристорном ключе  $VT1$ , а также ограниченный диапазон регулирования. При увеличении диапазона снижается плавность регулирования напряжения.

Снижение сопротивления агрегата за счет уменьшения индуктивного сопротивления реактора в два раза по сравнению с сопротивлением реактора в схеме рис. 1.8 может быть получено в схеме рис. 1.9 (ранее рассмотрено на рис. 1.7).

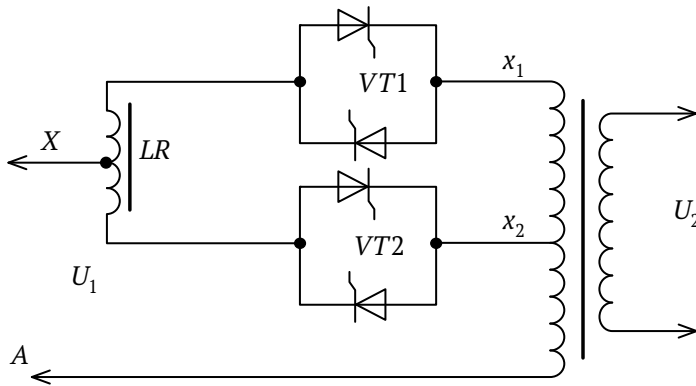


Рис. 1.9. Принципиальная схема тиристорного РПН трансформатора с включением реактора в контур ступени регулировочной обмотки и тиристорных ключей

При открытом одном из двух (см. рис. 1.9) тиристорном ключе добавочное сопротивление реактора за счет конструктивного выполнения обмоток равно минимальному значению.

В тиристорных переключающих устройствах РПН, приведенных на рис. 1.8 и 1.9, обмотки реакторов рассчитаны на длительное протекание номинального рабочего тока первичной обмотки трансформатора.

С целью упрощения схемы управления тиристорными ключами и снижения мощности реактора на рис. 1.10 приведена схема тиристорного переключающего устройства РПН с параллельным подключением токоограничивающего реактора к одному из тиристорных ключей [19].

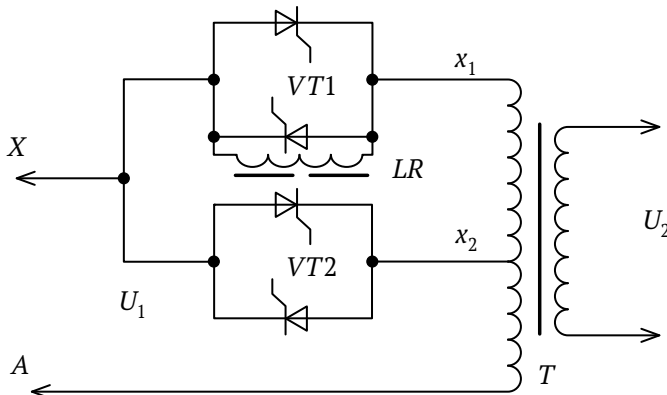


Рис. 1.10. Принципиальная схема тиристорного РПН трансформатора с включением реактора в контур ступени регулировочной обмотки параллельно одному тиристорному ключу

В схеме токоограничивающий реактор включен параллельно тиристорному ключу  $VT1$ . Если необходимо переключиться с ответвления  $x_1$  трансформатора на  $x_2$ , то сначала снимаются импульсы управления с тиристорного ключа  $VT1$ . После закрытия тиристорного ключа  $VT1$  ток протекает по реактору  $LR$ . Далее импульсы управления подаются на тиристорный ключ  $VT2$ . При обратном переключении сначала импульсы управления снимаются с тиристорного ключа  $VT2$ . После его закрытия рабочий ток протекает через реактор  $LR$ . Далее импульсы управления подаются на тиристорный ключ  $VT1$ , который шунтирует реактор.

Недостаток данного устройства заключается в том, что при работе на ответвлении  $x_2$  в регулировочной обмотке трансформатора протекает циркулирующий ток, ограниченный сопротивлениями регулировочной обмотки и реактора.

В рассмотренных ранее тиристорных РПН трансформаторах (см. рис. 1.8–1.10) сигналы управления подаются на тиристоры вне зависимости от направления тока и полярности напряжения. В результате появляются моменты времени, когда открыты оба тиристорных ключа (вступающий в работу и выходящий из работы) и появляется ток циркуляции, для ограничения которого в схему включен токоограничивающий реактор. Однако выбором определенной последовательности подачи импульсов управления на тиристоры можно избежать этого.

### **1.1.3. Краткий обзор электронных схем управления тиристорными переключающими устройствами регулирования напряжения трансформаторов**

При создании тиристорных переключающих устройств ТПУ решаются две основные задачи: технико-энергетические расчеты выбора тиристоров по напряжению, по току нагрузки с разработкой надежной их защиты и разработка схемы управления ключевого режима работы тиристоров.

Известно значительное количество вариантов электронных схем управления тиристорными ключами устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН) трансформатора, опубликованных в авторских свидетельствах и патентах на способ переключения отводов ступеней регулировочной обмотки (РО) трансформатора [20–26] и направленных на создание наиболее надежной схемы управления тиристорными ключами.



Сложность создания такой схемы заключается в выборе моментов подачи сигналов управления на тиристорные ключи, не допускающих одновременного открытия тиристорных ключей двух соседних отводов ступени РО и вызывающих ток короткого замыкания в контуре ступени. Другой сложностью создания схемы является недопущение разрыва рабочего тока, т.е. появления бестоковой паузы при одновременном закрытии тиристорных ключей и вызывающей перенапряжения в обмотках трансформатора.

На рис. 1.11 представлена функциональная схема устройства РПН [25] с тиристорными ключами, подключенными к выводам регулировочной обмотки (РО), соединенной последовательно с сетевой обмоткой (СО) трансформатора.

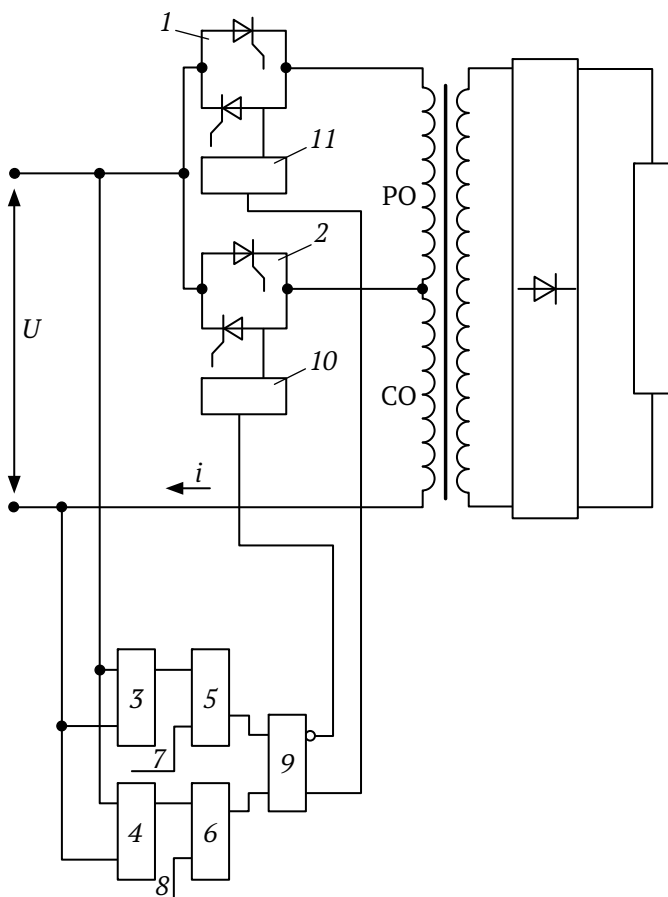


Рис. 1.11. Функциональная схема устройства тиристорного РПН трансформатора

Система управления тиристорными ключами 1, 2 содержит датчики напряжения 3, 4, соединенные с первыми входами логических элементов И (5, 6), вторые входы которых соединены с блоками управления «выше» 7, «ниже» 8 (на схеме не показаны). Выходы схем И соединены с триггером 9, выходы которого через согласующие цепи 10, 11 соединены с тиристорами. Датчики напряжения на базе выпрямителя с нуль-органом имеют выходные сигналы в виде прямоугольных импульсов. Задний фронт этих сигналов опережает переход напряжения через нуль на расчетные регулируемые углы.

На рис. 1.12 представлена функциональная схема устройства управления тиристорными ключами [26], содержащая два тиристорных ключа с тиристорами 1, 2 и 3, 4, подключенные к РО 6, соединенной последовательно с СО (7) трансформатора 5, нагрузку 8, систему управления 9 и не показанные на схеме датчик напряжения (сигнал  $U_c$ ) и датчик тока (сигнал  $i_c$ ).

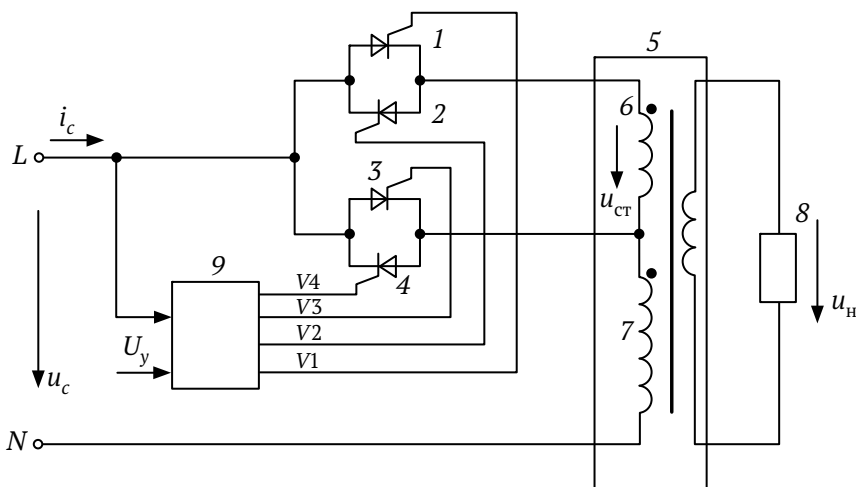


Рис. 1.12. Функциональная схема управления тиристорным РПН трансформатора с поочередным регулированием напряжения в зонах совпадения и несовпадения знаков тока и напряжения

Регулирование напряжения заключается в следующем. Система управления 9 по сигналу  $U_c$  формирует синхроимпульсы, опережающие момент перехода сетевого напряжения через нулевое значение на угол  $\Theta_k$ , величина которого выбирается из условия нормального завершения процессов коммутации тиристорov. В зависимости от величины  $U_y$ , выполняется фазовая задержка относительно синхроимпульсов и регулировка углов переключения на повышение  $\alpha_B$  и понижение  $\alpha_H$  напряжения. Причем

регулирование напряжения выполняется поочередно в зонах совпадения знаков напряжения и тока. Понижение напряжения производится в первую очередь в зонах совпадения знаков путем увеличения угла переключения, а во вторую очередь — в зонах несовпадения знаков путем уменьшения угла переключения. Повышение напряжения производится в обратной последовательности.

В основе указанных [20–26] способов переключения тиристорных ключей отводов лежит задача определения момента времени переключения тиристорных ключей отводов, зависящих: от фазового сдвига синусоидального тока от напряжения [21]; от фазового сдвига относительно одной из полуволн напряжения [22]; от момента времени, опережающего переход напряжения через нулевое значение на время, равное времени выключения тиристорных ключей [23]; от установки расчетного момента времени, опережающего переход напряжения ступени регулировочной обмотки через нулевое напряжение [25]; при импульсно-фазовом управлении тиристорами от соответствия знакам тока и напряжения [20]; от формирования синхроимпульсов на каждом полупериоде сетевого напряжения, опережающего по фазе момент перехода сетевого напряжения через нуль, осуществляя фазовую задержку относительно синхроимпульсов, регулируют угол переключения на повышение  $\alpha_{\text{в}}$  напряжения в соответствии со знаком сетевого напряжения, а переключение на понижение напряжения выполняют в моменты формирования синхроимпульсов [24]; от совпадения или несовпадения знаков напряжения и тока, с введением очередности регулирования напряжения. Так, понижение напряжения производится в первую очередь при совпадении знаков путем увеличения угла переключения, во вторую очередь — при несовпадении знаков путем уменьшения угла переключения, а повышение напряжения производится в обратной последовательности [26], при этом вне зависимости от характера нагрузки (индуктивной, емкостной или смешанной).

Указанные способы с теоретической точки зрения интересны, но неизвестны возможности их практической реализации в трансформаторах большой и средней мощности.

На рис. 1.13 приведено устройство, в котором в схему управления тиристорами поступают сигналы от датчиков тока и от датчика напряжения [27]. Датчики тока фиксируют моменты перехода тока через ноль и подают сигнал в схему (на рис. 1.13 не показана) определения направления тока.

Датчик напряжения предназначен для определения полярности приложенного напряжения. Переключение ответвлений трансформатора

всегда начинается при переходе тока через ноль, за счет чего достигается плавность переключений.

Такой способ подачи зависимой от токов и напряжения последовательности импульсов управления тиристорами исключает появление токов короткого замыкания в контуре коммутации и не допускает разрыва цепи тока нагрузки.

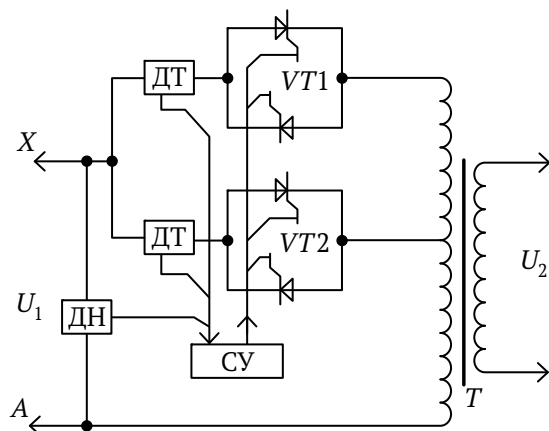


Рис. 1.13. Принципиальная схема тиристорного РПН трансформатора с зависимым от токов и напряжения способом переключения тиристоров

Рассмотренное на рис. 1.13 устройство РПН трансформатора реализовано в однофазном и может быть реализовано в трехфазном исполнении.

#### 1.1.4. Преобразовательные выпрямительный и выпрямительно-инверторный агрегаты с регулированием напряжения

Длительное время на тяговых подстанциях электрических железных дорог России использовались преобразовательные агрегаты с шестипульсовой нулевой схемой выпрямления параллельного типа (схема Кюблера) с соединением сетевой и вентильной обмоток трансформатора «звезда – две обратные звезды с разделяющим реактором».

В конце 1960-х гг. [29–31] (в связи с переходом на полупроводниковые вентили) стали применять шестипульсовые 3-фазные мостовые схемы выпрямления (схема Ларионова).

Шестипульсовые схемы имеют существенные недостатки: низкий коэффициент мощности, искаженную форму кривой первичного тока,

низкое качество электрической энергии и значительное влияние тяговых токов на линии связи.

Двенадцатипульсовые схемы обеспечивают: повышение коэффициента мощности до 0,97–0,98; за счет снижения гармонических составляющих улучшается форма кривой первичного тока, повышая качество электрической энергии; улучшение формы кривой выпрямленного напряжения со снижением влияния тяговой сети на систему железнодорожной связи, автоматики и на смежные устройства; незначительное повышение, порядка на 100 В, номинального выходного напряжения относительно напряжения шестипульсовых схем выпрямителя. При этом для двенадцатипульсовых схем выпрямления тяговых подстанций железных дорог выходное напряжение при номинальной нагрузке составляет 3,3 кВ, напряжение при регулировании не должно превышать 3,7 кВ, а максимальное напряжение в контактной сети от рекуперирующего электровоза при электрическом торможении — не более 4,0 кВ.

С 1975 г. по разработкам и предложению ОмГУПСа и Западно-Сибирской железной дороги (ЗСЖД) началось внедрение двенадцатипульсовых выпрямителей [32].

С декабря 1988 г. на тяговой подстанции ЗСЖД эксплуатируется опытный образец двенадцатипульсового выпрямителя [33].

В преобразовательных агрегатах при этом использовались неуправляемые выпрямительные блоки, отличающиеся простотой и надежностью в эксплуатации.

На тяговых подстанциях железных дорог России эксплуатировалось и эксплуатируется значительное количество и типов вентильных конструкций (выпрямительных блоков) для шестипульсовых нулевых и 3-фазных мостовых; двенадцатипульсовых последовательного и ограниченное количество параллельного типа.

К 2000 году типы и количество конструкций составляли [28]:

УВКЭ-1 — установка, выпрямительная на кремниевых вентилях, для электрифицированных железных дорог, номер разработки; с шестипульсовой нулевой схемой;

УВКЭ-1М — то же для мостовой схемы выпрямителя (обе установки с принудительным воздушным охлаждением, внутренней установки — 100 шт);

ПВЭ-3, ПВЭ-3М — преобразователь, выпрямительный, для электрифицированных ж.д., модификация, принудительное воздушное охлаждение, внутренняя установка;

ПВЭ-5АУ1 — преобразователь, выпрямительный, для электрифицированных ж.д., модификация, климатическое исполнение — умеренный климат, наружная установка (совместно с ПВЭ-3, ПВЭ-3М — 1240 шт.);

ТПЕД-3150-3,3к-У1 — трехфазный на входе, постоянный ток на выходе, естественное воздушное охлаждение, диоды полупроводниковые, номинальные входные: ток 3150 А и напряжение 3,3 кВ, У1 — умеренный климат наружной установки — 359 шт.;

ВТПЕД-3,15к-3,3-2-У1 — выпрямитель трехфазный на входе, постоянный ток на выходе, естественное воздушное охлаждение, диоды полупроводниковые, номинальные выходные ток 3,15 кА и напряжение 3,3 кВ, модификация (1 — двенадцатипульсовая последовательная, 2 — трехфазная мостовая шестипульсовая), У1 — умеренный климат наружной установки — 108 шт.

В период с 1992 по 2000 г. заводом ВЭИ изготовлено 115 комплектов силовых диодных блоков БСЕ, предназначенных для модернизации ранее выпущенных вентильных конструкций:

БСЕ1-4ВДВ-22(24) — блок силовой полупроводниковый; естественное воздушное охлаждение; 1 — двустороннее охлаждение вентиля таблеточной конструкции; УВД — четыре выпрямительных диода; 5,8 — диаметр полупроводниковой структуры (50,80 мм), 22 (24) класс приборов по повторяющемуся напряжению.

Разработке типов вентильных конструкций сопутствовало улучшение характеристик и, соответственно, количество вентиляей, например:

УВКЭ-1(1М) — 720 шт.;

ПВЭ-3(3М) — 540 шт. (после модернизации ПВЭ-3 — 480 шт.);

ПВЭ-5 — 420 шт.;

ТПЕД — 288 шт.;

ВТПЕД — 48 шт.;

БСЕ — 48 шт.

Значительные работы по разработке вентильных конструкций и их испытаниям проведены совместно с заводами, железными дорогами, научными и учебными заведениями, среди них ЦНИИ МПС (ВНИИЖТ) [29–31, 34], ОМИИТ (ОмГУПС) [32, 33]. Выпуск вентильных конструкций и их модернизируемых элементов обеспечили следующие заводы:

Таллинский электротехнический завод с 1974 г. начал выпускать вентильные конструкции ПВЭ-5А У1.

В 1983 г. Саранским заводом «Электровыпрямитель» при участии ОмГУПС разработаны вентильные конструкции ТПЕД-3150-3,3к-У1; силовые блоки БСЕ, выпускаемые опытным заводом ВЭИ, предназначены

для модернизации ранее выпущенных вентильных конструкций с заменой морально и физически устаревших штыревых вентилей.

В 1991 г. заводом «Электротехника» на основе унифицированных тиристорных секций с мощными таблеточными тиристорами, с воздушным принудительным охлаждением, с теплоотводом на основе тепловых труб разработан двенадцатипульсовый выпрямительный управляемый блок с последовательным соединением мостов В-ТПП-2,4к-Ук-3/12-У3 (В — выпрямитель; Т — трехфазный; П — постоянный ток на выходе; принудительная система охлаждения; 2,4к — номинальный ток, кА; 4к — номинальное напряжение, кВ; 3/12 — код модификации  $m_1 = 3, m = 12, У3$  — климатическое исполнение и категория внутреннего размещения. Принципиальная электрическая схема управляемого выпрямителя В-ТПП-2,4к-4к-3/12-У3 приведена на рис. 1.14.

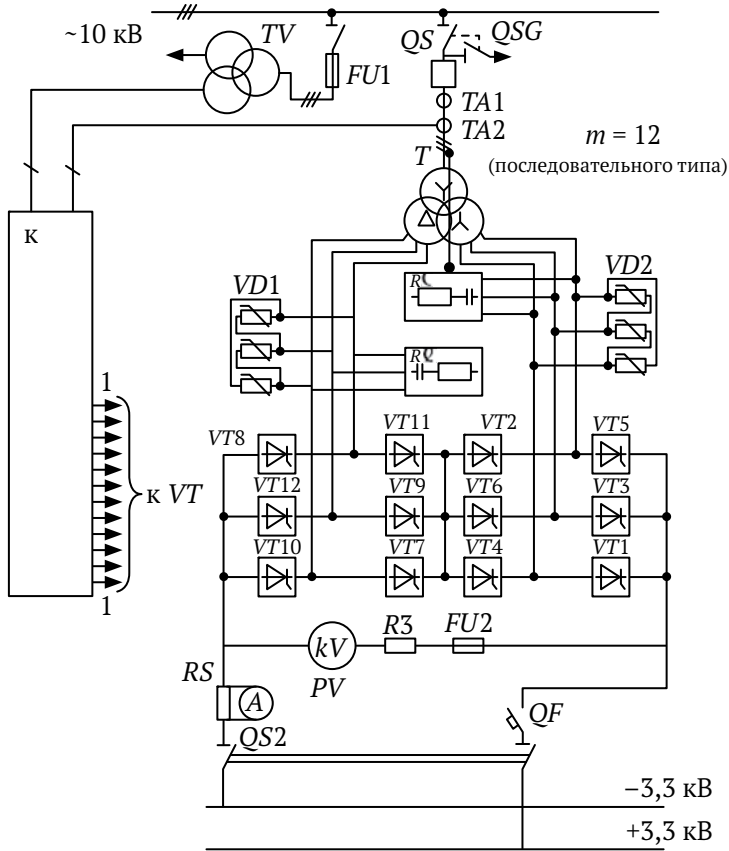


Рис. 1.14. Принципиальная электрическая схема управляемого двенадцатипульсового выпрямителя последовательного типа В-ТПП-2,4к-4к-3/12-У3

В 1999–2000 гг. на линии Москва — Санкт-Петербург на ряде тяговых подстанций установлены выпрямительно-инверторные агрегаты, преобразовательные секции которых выполнены на тиристорах В-ПТЭ-3,3к-4,0к-12-УЗ, разработанные в 1998 г., и изготовлены Научно-исследовательским институтом электрофизической аппаратуры им. Ефремова (НИИЭФА). Преобразовательный трансформатор по техническому заданию ВНИИЖТа изготовлен ОАО «Уралэлектротяжмаш» (рис. 1.15). Трансформатор выполнен с одноступенчатой трансформацией, имеет четыре обмотки: сетевую, соединенную в звезду; среднего напряжения 10,5 кВ, соединенную в треугольник, для питания районных потребителей и цепей собственных нужд подстанции; две вентильные обмотки, соединенные в звезду и треугольник с отпайками для регулирования выходного напряжения 12-пульсового преобразователя с параллельным соединением мостов в выпрямительном режиме и возможностью работы в выпрямительно-инверторном режимах [31, 35, 36].

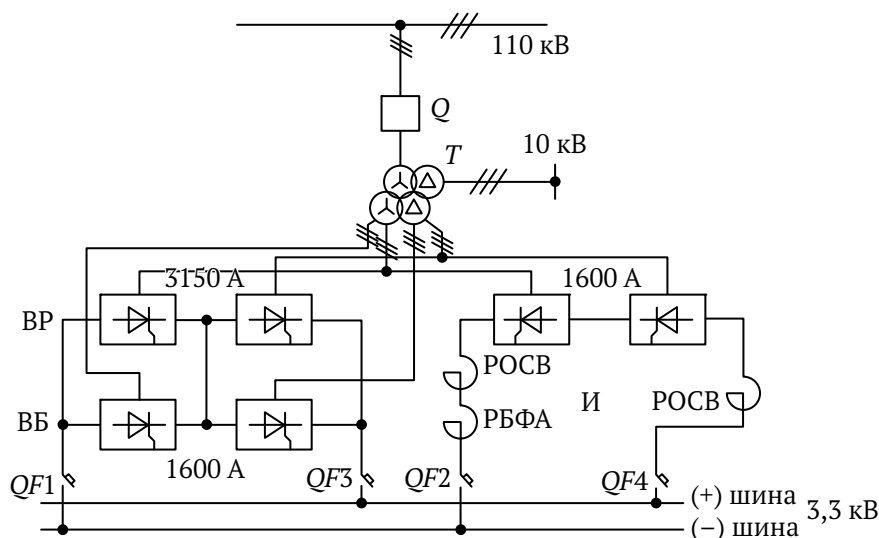


Рис. 1.15. Принципиальная электрическая схема 12-пульсового выпрямительно-инверторного агрегата с регулированием напряжения:  
 Q — выключатель; Т — преобразовательный трансформатор;  
 ВР и ВБ — параллельно включенные выпрямительные секции; РОСВ, РБФА — реакторы;  
 QF1–QF4 — быстродействующие выключатели; И — инвертор

Испытания подтвердили возможность стабилизации выходного напряжения на шинах подстанции в заданных пределах 3400–3900 В с требуемой точностью  $\pm 2\%$ , что особенно важно для скоростных направлений железных дорог.



Для приема избыточной энергии при рекуперативном торможении электроподвижного состава на тяговых подстанциях применяют [28] шестипульсовую нулевую схему параллельного типа ВИПЭ-1 (в выпрямительном и инверторном режимах, внутренней установки с принудительным воздушным охлаждением). Силовая схема преобразователя ВИПЭ-2 (взамен ВИПЭ-1) выполнена в виде двух включенных встречно-параллельных трехфазных мостов — тиристорного моста инвертора и диодного моста выпрямителя, постоянно подключенных к отводам вентильных обмоток преобразовательного трансформатора ТДП-12500/0ИУ1.

В 1987 г. на Кемеровской ж.д. включен в эксплуатацию первый на сети железных дорог России четырехмостовой выпрямительно-инверторный агрегат, собранный по двенадцатипульсовой схеме параллельного типа (ВИП-12).

Дальнейшим развитием инверторов для тяговых подстанций явилось создание агрегата по двухмостовой схеме последовательного типа на основе инверторной секции для инвертора и также по двухмостовой схеме последовательного типа на основе серийного выпрямителя ТПЕД-3150-3,3 для выпрямителя — агрегата И-ПТП-2,4к-4к-3/12-У3.

Для всех преобразовательных конструкций, выпрямительных и выпрямительно-инверторных, преобразовательные трансформаторы изготовлены на (ОАО) «Уралэлектротяжмаш». Так, для двенадцатипульсового выпрямительно-инверторного преобразователя В-ПТЭ-3,3к-4,0к-12-У3 (см. рис. 1.15) был изготовлен преобразовательный трансформатор с одноступенчатой трансформацией ТРДТНП-20000/110 ИУ1.

### 1.1.5. Вольтодобавочные устройства ВДУ

**Вольтодобавочное устройство, включаемое в рассечку контактной сети**

Схема питания ВДУ и принципиальная электрическая схема его включения в рассечку контактной сети [37] представлена на рис. 1.16 и 1.17.

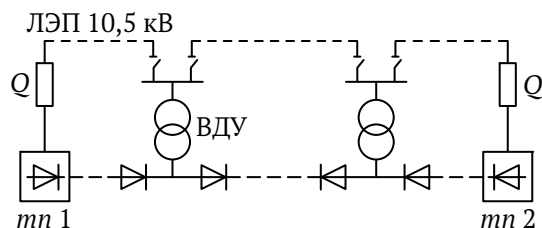


Рис. 1.16. Схема двустороннего питания ВДУ от линии продольного электроснабжения

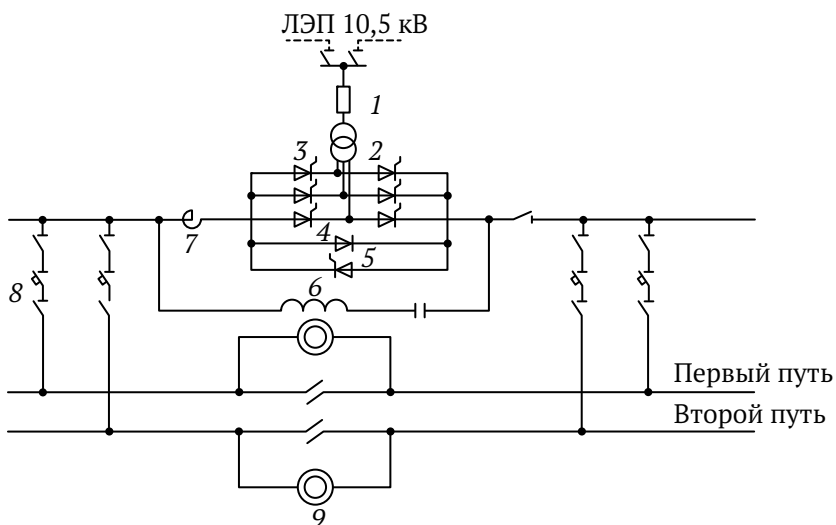


Рис. 1.17. Принципиальная электрическая схема ВДУ:  
 1 — выключатель; 2 — трансформатор; 3 — тиристорный блок;  
 4 — шунтирующие диоды; 5 — шунтирующие тиристоры;  
 6 — однозвенное фильтрующее устройство; 7 — реактор;  
 8 — быстродействующие выключатели; 9 — секционные разъединители

Для питания ВДУ используются линии продольного электроснабжения 10,5 кВ, подвешенные на опорах контактной сети. На межподстанционной зоне могут быть установлены одно или два ВДУ. Питание ВДУ осуществляется от ближайшей тяговой подстанции.

Выпрямленное напряжение ВДУ с помощью тиристоров 3 автоматически регулируется в зависимости от уровня напряжения в контактной сети. Для обеспечения двустороннего питания средней части межподстанционной зоны при нулевом значении выпрямленного напряжения ВДУ и пропуска тока, превышающего допустимый ток бустерной установки, тиристоры 3 шунтируются диодами 4.

Тиристоры 5 предусматриваются для осуществления двустороннего питания поездов в зоне между ВДУ и тяговой подстанцией, а также для передачи электроэнергии при рекуперативном торможении. Присоединение трансформатора 2 к шинам 10,5 кВ предусмотрено через выключатель 1, а питание контактной сети от ВДУ — через быстродействующие выключатели 8. Однозвенное фильтрующее устройство 6, присоединяемое через реактор 7, служит для сглаживания пульсаций выходного напряжения ВДУ.

## Вольтодобавочное устройство для преобразовательных агрегатов с шестипульсовой нулевой схемой выпрямления

Изготовленное и испытанное на Свердловской железной дороге вольтодобавочное устройство ТДМВА-8000/10ЖУ1 производства «Уралэлектротяжмаш» [38] предназначено для преобразовательных агрегатов с преобразовательными трансформаторами старых образцов типа ТМРУ со схемой соединения сетевой и вентильных обмоток «звезда две обратные звезды с разделяющей катушкой».

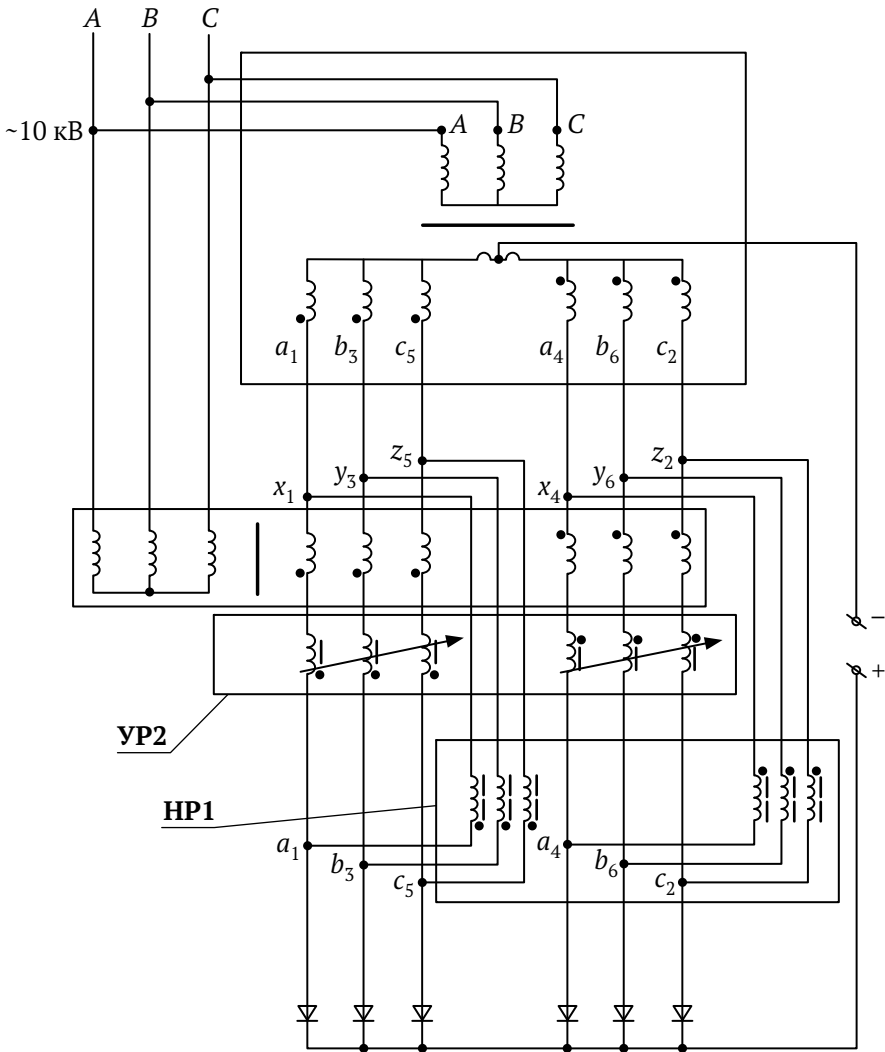


Рис. 1.18. Электрическая схема соединений в преобразовательном агрегате с ТДМВА-8000/10ЖУ1

## Вольтодобавочное устройство для двенадцатипульсовых преобразовательных агрегатов

Внедрение на тяговых подстанциях двенадцатипульсовых преобразовательных агрегатов с трансформаторами ТРДП-12500/10 ЖУ1 взамен шестипульсовых позволило увеличить номинальное напряжение на выходе агрегата на 100 В, повысить КПД и коэффициент мощности, снизить гармонический состав выпрямленного напряжения и эквивалентное мешающее напряжение, что дало возможность существенно упростить схемы сглаживающего устройства.

Однако при введении скоростного пассажирского и грузового тяжеловесного движения увеличиваются потери напряжения в контактной сети. Для повышения напряжения в контактной сети, так же как и для шестипульсовых преобразователей, потребуется использование агрегатных или общеподстанционных ВДУ.

Рассмотрим схемы включения ВДУ с регулированием напряжения для двенадцатипульсового нерегулируемого преобразовательного агрегата.

Для двенадцатипульсового преобразовательного агрегата с преобразовательным трансформатором ТРДП-12500/10 ЖУ1 возможно применение ВДУ с тиристорным двенадцатипульсовым выпрямителем с параллельным соединением мостов (рис. 1.19).

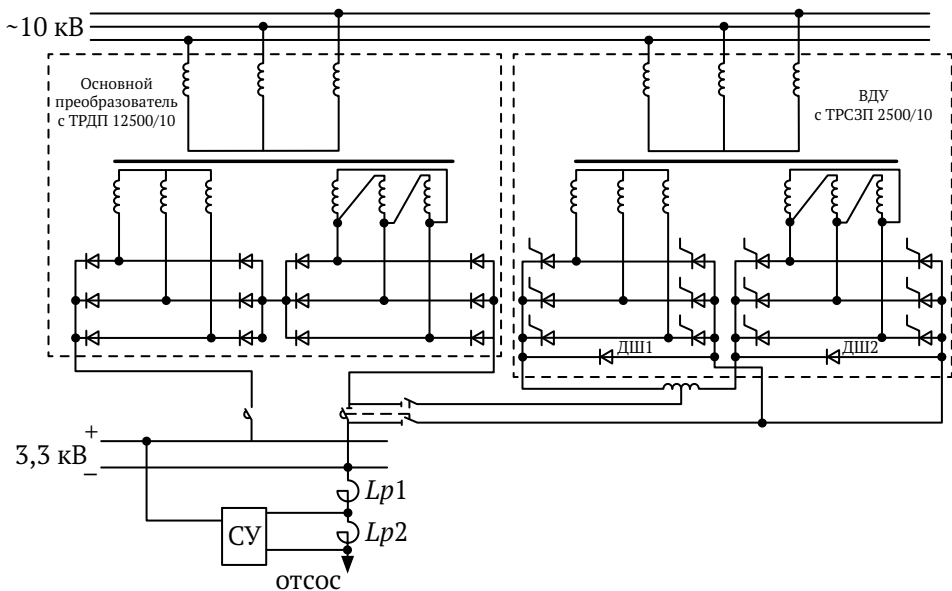


Рис. 1.19. Принципиальная электрическая схема двенадцатипульсового преобразовательного агрегата с двенадцатипульсовым ВДУ

Другим вариантом ВДУ является регулируемое вольтодобавочное устройство ТАСЗВ-5000/10ЖУХЛ1 с вольтодобавочным трансформатором ТРСЗП-2000/10ЖУХЛ1, вторичные обмотки которого включаются в выводы между вторичными обмотками основного трансформатора ТРСЗП-12500/10ЖУХЛ1 и выпрямительными трехфазными мостами (рис. 1.20). Регулирование напряжения осуществляется управляемыми УР и неуправляемыми НР реакторами или с помощью тиристорных устройств, которые будут рассмотрены в разделе 1.3.

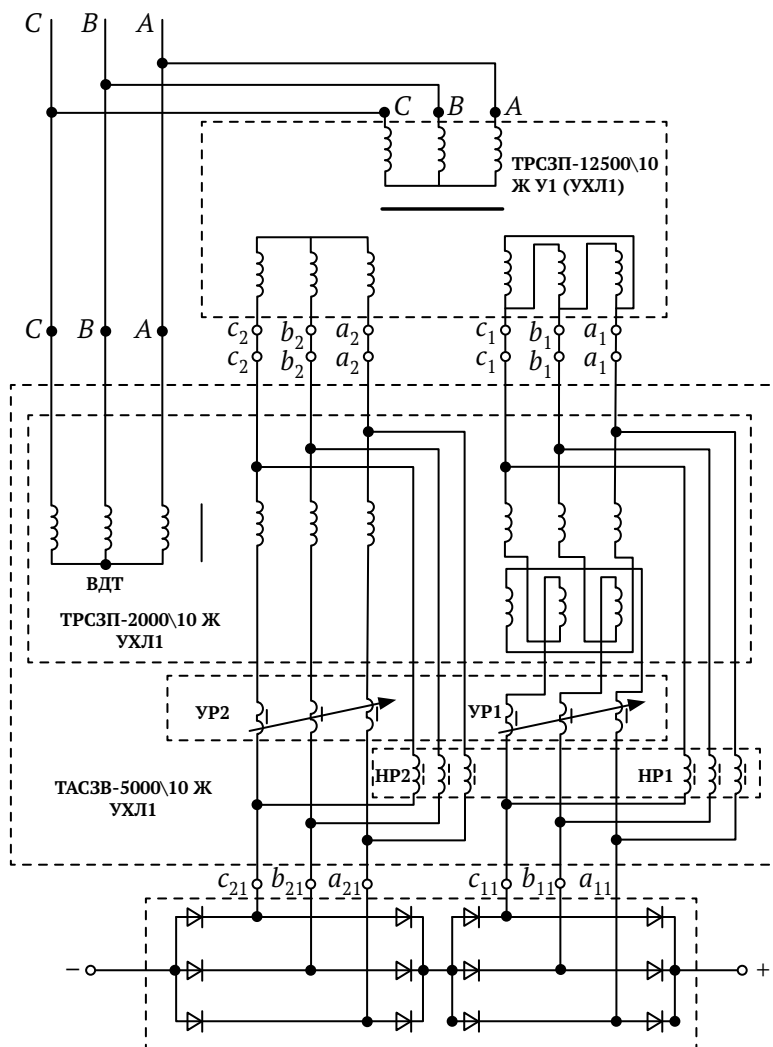


Рис. 1.20. Принципиальная электрическая схема вольтодобавочного агрегата ТАСЗВ-5000/10 Ж УХЛ1 с трансформатором ТРСЗП-12500/10 Ж УХЛ

Известны реализованные и предлагаемые схемные решения ВДУ для включения их в питающие фидера тяговой подстанции [39]. Так, установка вольтодобавочного устройства на японских ж.д. [40] в питающий фидер между выходной шиной преобразовательного агрегата и контактной сетью предусматривает компенсацию потери напряжения в контактной сети изменением напряжения ВДУ в зависимости от тока нагрузки фидера.

Предложением ВНИИЖТа [31] также предусматривается включение ВДУ в цепь питающего фидера. За счет установки на тяговой подстанции преобразовательного агрегата со стабилизацией выходного напряжения и подключенного к выходной шине агрегата вспомогательного провода, соединенного диодами связи в различных точках контактной сети, предусматривается стабилизация напряжения на токоприемнике, находящегося на зоне питания электровоза.

### **1.1.6. Тяговый блок преобразования повышенного напряжения с питающей линией электропередачи переменного тока**

#### **Одноагрегатный тяговый блок (ОТБ) с преобразовательным трансформатором**

Одноагрегатный тяговый блок представляет собой преобразователь напряжения переменного тока повышенного напряжения 10,5 (35) кВ в напряжение контактной сети 3,3 кВ постоянного тока с использованием преобразовательного трансформатора [41, 42]. На рис. 1.21 представлена принципиальная однолинейная схема одноагрегатного тягового блока. Напряжение 10 (35) кВ подается в ЛЭП от распределительного устройства РУ10 (ОРУ-35) соседней тяговой подстанции. В одноагрегатном тяговом блоке используется типовое серийное оборудование. В качестве преобразовательного трансформатора могут использоваться трансформаторы с изоляцией в масляном исполнении (ТРДП-16000/10(35) или ТРДП-12500/10(35) и с изоляцией в сухом исполнении (ТРСЗП-12500/10 ЖУХЛ1 или ТРСЗПА-6300/10 ЖУХЛ1). Трансформаторы могут быть использованы без регулирования или с регулированием выходного напряжения.

#### **Блок преобразования повышенного напряжения БППН-10,5/3,3 без преобразовательного трансформатора**

Блок БППН-10,5/3,3 предназначен для установки на межподстанционной зоне, требующей усиления.

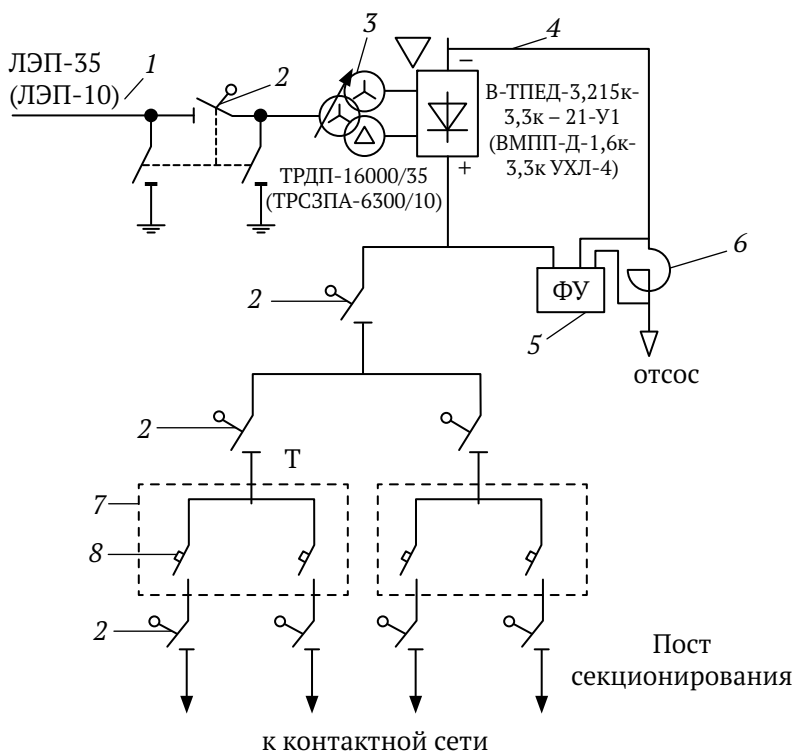


Рис. 1.21. Принципиальная однолинейная схема одноагрегатного тягового блока:  
 1 — питающая ЛЭП; 2 — разъединитель; 3 — преобразовательный трансформатор;  
 4 — выпрямительный блок; 5 — фильтрующее устройство; 6 — бетонный реактор;  
 7 — пост секционирования; 8 — быстродействующие выключатели

Блок БППН-10,5/3,3 производит преобразование высокого напряжения переменного тока (10,5 кВ) в напряжение контактной сети в месте установки БППН. Для этого передача электрической энергии трехфазного напряжения 10,5 кВ от соседней тяговой подстанции производится с использованием существующей линии электропередачи продольного электроснабжения ПЭС-10 или по отдельно стоящим опорам.

На рис. 1.22 представлена схема питания электрифицированной железной дороги постоянного тока от тяговой подстанции и одновременно от блока БППН-10,5/3,3 [43].

В качестве преобразователя 10 (см. рис. 1.22) может быть использована схема ППН-6,6 (см. рис. 1.24 в разделе 1.1.7) с усилением и совершенствованием элементов.

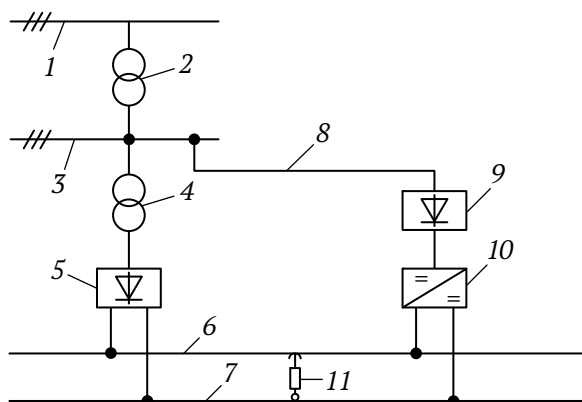


Рис. 1.22. Принципиальная электрическая схема питания контактной сети от тяговой подстанции и блока БППН — 10,5/3,3:  
 1 — высоковольтная ЛЭП энергосистемы; 2 — головной понижающий трансформатор;  
 3 — распредустройство РУ — 10 кВ; 4 — преобразовательный трансформатор;  
 5 — выпрямительный блок на 3,3 кВ; 6 — контактная сеть; 7 — тяговый рельс;  
 8 — ЛЭП 10; 9 — выпрямительный блок на 14 кВ; 10 — преобразователь напряжения постоянного тока 14 кВ в напряжение постоянного тока 3,3 кВ; 11 — электровоз

### 1.1.7. Преобразовательные пункты повышенного напряжения ППН с питающей линией электропередачи постоянного тока

#### Преобразовательный пункт повышенного напряжения с трансформаторной связью

В 1970-е гг. была организована передача электрической энергии напряжением 6 кВ постоянного тока по отдельному фидеру на перегон от тяговой подстанции к преобразователю 6/3 кВ и далее в контактную сеть (автор — кандидат технических наук Т. П. Третьяк).

Функциональная схема системы с пунктом повышенного напряжения [44] представлена на рис. 1.23.

На протяженных межподстанционных зонах, требующих усиления электроснабжения, устанавливают один-два пункта повышенного напряжения (ППН), состоящего из инверторного и выпрямительного блоков. Выпрямительный блок подключен к контактной сети и к тяговому рельсу. На тяговой подстанции от отдельного преобразовательного агрегата повышенного напряжения 6,6 кВ или от двух последовательно включенных преобразовательных агрегатов (на рис. 1.23 соединены пунктирной линией) питание подается в дополнительный провод повышенного напряжения. На ППН инвертор преобразует высокое напряжение постоянного



тока в высокое напряжение переменного тока, понижается трансформатором и через выпрямительный блок напряжение 3,3 кВ постоянного тока подается в контактную сеть.

Принципиальная схема преобразователя напряжения постоянного тока в постоянный с трансформаторной связью приведена на рис. 1.24.

Автономный тиристорный инвертор работает на повышенной частоте 800 Гц.

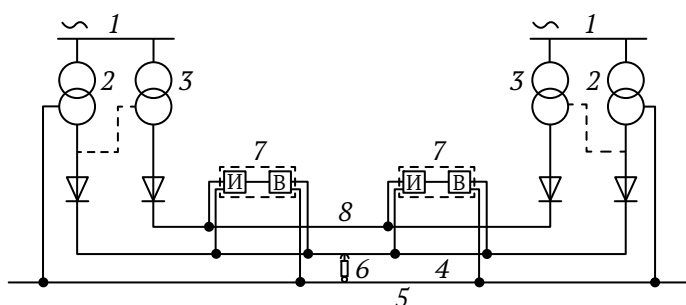


Рис. 1.23. Функциональная схема системы электроснабжения электрических железных дорог постоянного тока:

- 1 — тяговая подстанция; 2 — преобразовательный агрегат питания контактной сети;
- 3 — преобразовательный агрегат повышенного напряжения; 4 — контактная сеть;
- 5 — тяговый рельс; 6 — электровоз; 7 — пункт повышенного напряжения;
- 8 — дополнительный провод повышенного напряжения

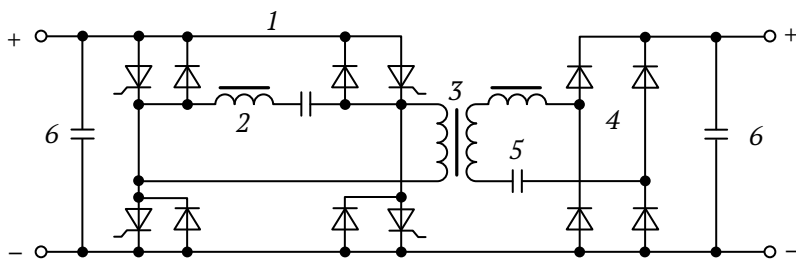


Рис. 1.24. Принципиальная схема преобразователя напряжения постоянного тока в постоянный с трансформаторной связью:

- 1 — автономный тиристорный мостовой инвертор напряжения с обратными диодами;
- 2 — коммутационная LC-цепь; 3 — трансформатор; 4 — выпрямительный блок;
- 5 — дополнительный LC-контур снижения пульсаций выходного напряжения;
- 6 — конденсаторы фильтров входного и выходного напряжений

### Преобразовательный пункт повышенного напряжения без трансформаторной связи

Преобразователь постоянного тока повышенного входного напряжения в постоянный ток напряжением контактной сети 3,3 кВ представляет собой [45] многофазный преобразователь постоянного тока, выполненный

по схеме с широтно-импульсным регулированием напряжения на накопительных дросселях, что позволяет обеспечить более высокое качество электроснабжения контактной сети. Применение современных IGBT-тиристоров позволяет повысить надежность преобразователя и упростить его схему.

Преобразователь выполнен по бестрансформаторной схеме и включает в себя шесть IGBT-тиристорных ключей, три диодных ключа, два накопительных дросселя и фильтровое оборудование. Упрощенная принципиальная схема представлена на рис. 1.25.

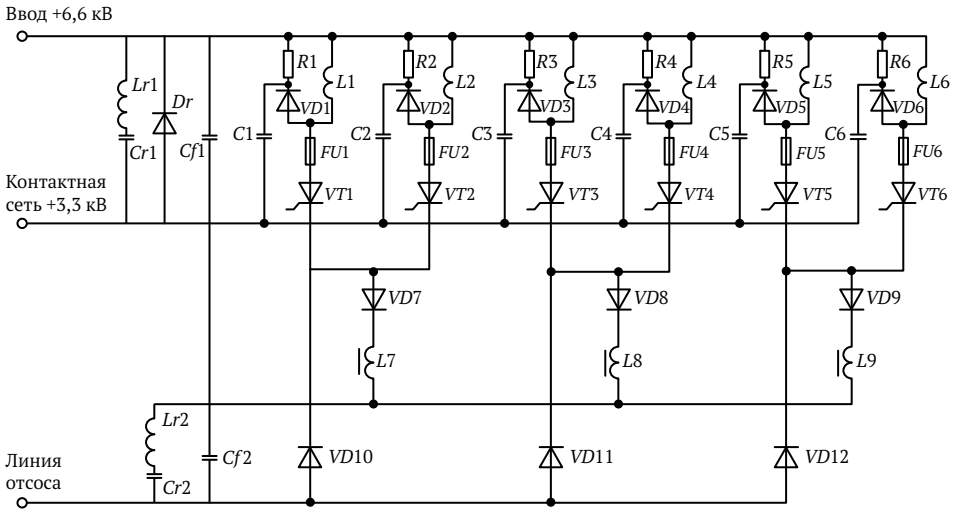


Рис. 1.25. Принципиальная схема импульсного преобразователя постоянного тока

Тактовая частота работы преобразователя составляет 1000 Гц. Соответственно каждый из тиристорных ключей работает на частоте 167 Гц. Охлаждение силовых приборов осуществлено с помощью радиаторов на тепловых трубах с принудительным воздушным охлаждением. Выполнение преобразователя по шестиканальной схеме обеспечивает сохранение его работоспособности при отказе одного или нескольких каналов с соответствующим снижением выходной мощности.

Преобразователь обеспечивает стабилизацию выходного напряжения и ограничение выходного тока при перегрузках. Для этого электронная защита преобразовательного оборудования по управлению IGBT-тиристоров построена с использованием измерительных датчиков тока в каждом из шести каналов. Возможные короткие замыкания в высоковольтном

оборудовании отключаются специальными быстродействующими предохранителями, включенными последовательно с каждым из силовых тиристорных ключей. Исчезновение входного напряжения может привести к появлению недопустимых напряжений обратного знака на IGBT-тиристорах. Для блокирования обратного напряжения используются шунтирующие диоды, соединяющие контактную сеть 3,3 кВ с входной сетью повышенного напряжения. При коротких замыканиях на выходе преобразователя отключается быстродействующий выключатель и одновременно блокируются импульсы управления IGBT-тиристорами. При внутренних коротких замыканиях импульсы управления также блокируются и одновременно выдается команда на выключение питания входной сети. С этой же целью последовательно с каждым из IGBT-тириستоров включен быстродействующий предохранитель. Для повышения быстродействия снятия вредного воздействия перегрузок с полупроводниковых приборов используется (на рис. 1.25 не показан) быстродействующий короткозамыкатель, соединяющий входную сеть с тяговым рельсом. Он включается по команде электронных защит микроконтроллера. При этом одновременно на тяговый рельс через шунтирующие диоды замыкается контактная сеть.

Система из-за сложности схем и в дальнейшем из-за несовершенства преобразователя 6/3 кВ не нашла применения, тем более при известном [1, 41] и более эффективном способе передачи энергии от тяговой подстанции на перегон напряжением переменного тока 35 кВ к одноагрегатному тяговому блоку (трансформаторно-полупроводниковому преобразователю) с выходным напряжением постоянного тока, обеспечивающим не менее допустимого напряжения в контактной сети и не допускающего перегрузку по току преобразовательного агрегата тягового блока (буферная система тягового электроснабжения) [46].

### **1.1.8. Буферная система тягового электроснабжения БСТЭ**

Основой буферной системы тягового электроснабжения БСТЭ с системой БАРН (см. разд. 1.1.2) на тяговых подстанциях является одноагрегатная тяговая подстанция ОТП, устанавливаемая на «непроходимой» межподстанционной зоне с задачей обеспечения пропуска по участку грузовых поездов повышенной массы или скоростных пассажирских поездов [46].

Первоначально электрическим расчетом СТЭ с системой БАРН на тяговых подстанциях участка с реальными или удлинненными межподстанционными

зонами производится определение величины уровня стабилизации напряжения, обеспечивающего пропуск скоростных пассажирских поездов или грузовых поездов повышенной массы. При этом производится выявление «непроходимых» межподстанционных зон, возможных даже при максимальном уровне стабилизации напряжения 3700 В.

Применение только одной системы БАРН на протяженных (24–26 км) межподстанционных зонах (МПЗ) при пропуске грузовых поездов повышенной массы в пакете 6300 т — 9000 т — 6300 т или 6000 т — (6000 т + 6000 т) — 6000 т (соединенные поезда 2×6200 т) со встречным движением поездов массой 4500 т (5000 т) обеспечивает пропуск поездов, но с повышенными межпоездными интервалами (более 10 минут).

В электрических расчетах СТЭ на направлении от ст. Войновка до ст. Балезино Свердловской железной дороги установлено, что для пропуска таких протяженных МПЗ указанных поездов при стабилизации напряжения на тяговых подстанциях в диапазоне 3600–3700 В потребуются строительство дополнительных тяговых подстанций.

Строительство промежуточных (дополнительных) двухагрегатных тяговых подстанций с системой БАРН ведет к значительному завышению установленной мощности и является нерациональным решением. Длина межподстанционных зон уменьшается до 9–13 км.

Строительство промежуточных (дополнительных) одноагрегатных тяговых подстанций (см. разд. 1.1.6, одноагрегатный тяговый блок) с системой БАРН приведет к значительной токовой перегрузке преобразовательного агрегата и, как следствие, к его отключению.

В этих случаях на «непроходимых» межподстанционных зонах естественно напрашивается применение новой схемы питания тягового электроснабжения, объединяющей регулируемую и нерегулируемую системы тягового электроснабжения. Такой является схема, содержащая две двух-, трехагрегатные тяговые подстанции с БАРН и питающие «непроходимую» межподстанционную зону, на которой устанавливается одноагрегатная нерегулируемая без БАРН тяговая подстанция ОТП с питанием от соседних тяговых подстанций по ЛЭП-10 (35) кВ [41, 42].

Отличительной особенностью такой ОТП является то, что тяговая подстанция имеет меньшую мощность, так как является одноагрегатной. Кроме того, мощность преобразовательного трансформатора может быть снижена с 12500 до 6300 кВА (определяется расчетом) и, что основное, — преобразовательный трансформатор и выпрямительный блок предусматриваются без регулирования выпрямленного напряжения.

Задачей одноагрегатной тяговой подстанции является «оказание помощи» двух-, трехагрегатным тяговым подстанциям с БАРН при пропуске скоростных пассажирских или грузовых поездов повышенной массы, то есть одноагрегатная тяговая подстанция выполняет как бы роль «буфера», не позволяя снизиться напряжению в контактной сети ниже, например, 2700 В с отдачей в контактную сеть мощности, не превышающей мощности подстанции.

Учитывая назначение и роль одноагрегатной тяговой подстанции как «буфера», объединенную схему питания тягового электроснабжения с регулируемой и нерегулируемой системами тягового электроснабжения можно назвать буферной системой тягового электроснабжения БСТЭ.

Алгоритм электрического расчета работы ОТП в системе БСТЭ должен предусматривать расчет напряжения холостого хода и одновременно статического коэффициента наклона внешней характеристики преобразовательного агрегата при обеспечении напряжения в контактной сети не ниже уровня 2700 В и ограничения тока нагрузки агрегата более допустимой величины с учетом коэффициентов перегрузки.

Напряжение холостого хода  $U_{xx}$  преобразовательного агрегата ОТП, используемое в электрическом расчете БСТЭ участка, может быть принято равным напряжению в диапазоне 3600–3300 В.

Наклон падающей внешней характеристики может быть изменен применением шести- или двенадцатипульсовой схемы выпрямления или изменением сопротивления питающей сети (марки проводов питающей ЛЭП-10 (35) кВ).

В табл. 1.1 представлены значения потерь напряжения в питающей ЛЭП для номинального режима работы преобразовательных трансформаторов буферной одноагрегатной тяговой подстанции в зависимости от длины и марки проводов питающей ЛЭП-10 (35) кВ. Изменяя марку проводов и используя переключение анцапф (ПБВ) трансформатора ТРСЗП-6300/10, устанавливается требуемое значение напряжения холостого хода буферной ОТП.

Таким образом, ограничение тока ОТП достигается перераспределением тока нагрузки электровозов скоростного поезда или грузового поезда повышенной массы между питающими «непроходимую» зону тяговыми подстанциями с повышенным стабилизированным напряжением  $U_{ст} = 3700$  В и ОТП со снижающимся напряжением по естественной падающей внешней характеристике преобразовательного агрегата.

## Потери напряжения в проводах ЛЭП-10 и ЛЭП-35

Преобразовательный трансформатор			Марка провода	$\Delta U$ , кВ /%			
Тип	$P_1$ , МВт	$I_1$ , А		Длина, км			
				5	7,5	10	13,2
ТРСЗПА-6300/10	5,74	314	АС-50	1,17/11,1	1,75/16,7	2,34/22,3	3,1/29,5
			АС-70	0,83/7,9	1,24/11,8	1,66/15,8	2,19/20,8
			АС-95	0,638/6	0,968/9,1	1,28/12,2	1,69/16
			АС-120	0,55/5,58	0,83/7,9	1,1/10,5	1,45/13,8
			АС-150	0,41/4,4	0,69/6,6	0,92/8,1	1,21/11,6
ТРДП-12500/10	12,31	678	АС-150	0,97/9,2	1,45/13,8	1,94/18,5	2,56/24,4
ТРСЗПА-6300/35	5,45	94	АС-35	0,42/1,2	0,63/1,8	0,84/2,4	1,1/3,14
			АС-50	0,33/0,95	0,497/1,42	0,497/1,89	0,91/2,5
			АС-70	0,249/0,71	0,373/1,07	0,492/1,42	0,657/1,88
			АС-95	0,193/0,55	0,287/0,82	0,384/1,1	0,506/1,44
			АС-120	0,165/0,47	0,248/0,71	0,33/0,94	0,436/1,28
			АС-150	0,14/0,4	0,21/0,6	0,276/0,8	0,366/1,06
ТРДП-12500/35	11,455	204	АС-35	1,03/2,95	1,55/4,4	2,06/5,9	2,7/8,8
			АС-50	0,7/2	1,06/3	1,42/4	1,87/5,3
			АС-70	0,51/1,5	0,81/2,3	0,108/3,1	1,42/4,1
			АС-95	0,42/1,2	0,63/1,8	0,84/2,4	1,11/3,2
			АС-120	0,36/1,01	0,55/1,6	0,73/2,1	0,97/2,8
			АС-150	0,31/0,9	0,47/1,3	0,69/1,8	0,82/2,3

Второй задачей электрических расчетов БСТЭ с системой БАРН на тяговых подстанциях действующих участков является улучшение условий и возможности введения машинистом электровоза рекуперативного режима за счет снижения напряжения в контактной сети. Это достигается установкой системой БАРН тяговых подстанций напряжения стабилизации на уровне, меньшего, чем уровень стабилизации напряжения, обеспечивающий пропуск поездов по межподстанционным зонам участка. В этом случае определяющим условием введения на участке БСТЭ являются технико-экономические расчеты по соотношению стоимости рекуперированной ЭЭ, увеличенной от снижения уровня стабилизации напряжения, и стоимости одноагрегатных тяговых подстанций. Немаловажным фактором и, возможно, определяющим является при этом повышение безопасности движения поездов.

Третья задача может быть поставлена при проектировании электрификации новых участков (или при проверке действующих) с применением БСТЭ с системой БАРН. Решением этой задачи при проектировании предусматривается увеличение длины межподстанционных зон, то есть сокращение числа тяговых подстанций. Примером этому служат электрические расчеты при проектировании участка Богданович — Тюмень (Войновка). В начальном проекте электрификации участка проектным институтом Уралгипротранс было определено на участке 18 тяговых подстанций при естественных падающих внешних характеристиках тяговых подстанций с  $U_{xx} = 3500$  В. При введении стабилизации напряжения на тяговых подстанциях с помощью системы БАРН на уровне  $U_{dct} = 3700$  В, количество тяговых подстанций при втором проектном расчете составило 14 единиц.

При введении на участке БСТЭ при электрическом расчете с допустимым, по требованию рекуперативного режима электровозов, уровнем стабилизации напряжения  $U_{dct} = 3700$  В производится электрический расчет системы тягового электроснабжения с увеличением длин межподстанционных зон [46, 47].

### **1.1.9. Управляемая система тягового электроснабжения**

Внедренные в настоящее время на сети дорог страны устройства и системы автоматического регулирования напряжения, рассмотренные в разделах 1.1.2–1.1.7, не обеспечивали одновременного участия устройств регулирования 2-, 3-тяговых подстанций в процессе электроснабжения тяжеловесных или высокоскоростных поездов. Для выполнения этой задачи потребовалось создать управляемую [48–51] систему электроснабжения, при которой три тяговые подстанции с устройствами регулирования напряжения участвуют в пропуске указанной категории поездов, включая и буферную систему БСТЭ, рассмотренную в разделе 1.1.8.

### **1.1.10. Повышение напряжения в контактной сети постоянного тока до 6, 12, 24 кВ**

При повышении веса и скорости движения поездов на электрифицированных участках железных дорог существующая система электрической тяги постоянного тока 3,0 кВ ограничивает увеличение скоростей и возросших размеров движения поездов.

С целью устранения этих ограничений при повышении эффективности электрифицированных участков рассмотрим возможность применения электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения для движения грузовых, в том числе тяжеловесных поездов и для скоростного движения пассажирских поездов.

Одновременно с существующей системой электрической тяги однофазного переменного тока  $2 \times 25$  кВ 50 Гц предпринимаются попытки повышения напряжения в системе электрической тяги постоянного тока за счет повышения напряжения до 6, 12, 24 кВ при передаче электрической энергии от источника к потребителю в контактной сети или по дополнительному фидеру, параллельному контактной подвеске.

С середины XIX в. ведутся предложения, расчеты и обоснования повышения напряжения в контактной сети постоянного тока с 3 кВ до 6, 12, 24 кВ. Однако и к началу XXI в. не создан действующий электровоз с повышенным напряжением постоянного тока в контактной сети хотя бы до 6 кВ, но уже ставится задача о повышении напряжения до 35 кВ, что говорит о важности задачи повышения технико-энергетической эффективности системы электрической тяги постоянного тока 3,0 кВ.

Ниже приводятся краткие исторические сведения о ходе и о результатах работ по повышению напряжения в контактной сети постоянного тока.

В газете «Евразия Вести» Безопасность железнодорожного транспорта» в статье «Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока при введении тяжеловесного и скоростного движения поездов» был приведен материал, отражающий состояние системы постоянного тока повышенного напряжения от 6 кВ до 24 кВ.

На необходимость повышения напряжения в контактной сети постоянного тока указывалось еще в 1931 году. Проведенные расчеты [Рывкин Ю. Е. Краткая характеристика систем тока электрических железных дорог. «Выбор системы тока для электрических железных дорог», изд-во Академии наук СССР, 1937] показали, что потери напряжения в тяговой сети переменного тока 20 кВ соответствуют системе постоянного тока напряжением 6 кВ.

«В послевоенный пятилетний план восстановления и развития народного хозяйства СССР (1946–1951 гг.) А. Е. Алексеев (с 1953 г. член-корреспондент Академии наук СССР) предлагает... исследовать возможность создания новых систем электрической тяги на постоянном токе напряжением 20–25 кВ» [В кн. Инженеры-электрификаторы старейшего института путей сообщения России / под ред. А. Т. Буркова. — СПб.: ПГУПС, 2008. — 285 с].



В 1960-е гг. по разработкам Московского энергетического института (МЭИ) под руководством доктора технических наук профессора В. Е. Розенфельда в Закавказье была предпринята попытка создания системы электрической тяги постоянного тока 6 кВ [52]. Попытка закончилась неудачно [53]. Было установлено, что пониженный КПД электровозов постоянного тока 6 кВ вызывает увеличение расхода электрической энергии на тягу поездов по сравнению с системой 3 кВ (несмотря на снижение потерь в тяговой сети), что возможно и послужило прекращению дальнейших исследований.

В 1970 г. в Уральском электромеханическом институте путей сообщения (УрЭМИИТ – УрГУПС) под руководством кандидата технических наук А. М. Дядькова проведены расчеты по электрификации железных дорог на постоянном токе повышенного напряжения 12 кВ [54]. Показано, что система переменного тока 25 кВ по потерям электроэнергии, напряжению и экономическим расстояниям между подстанциями соответствует системе постоянного тока напряжением 11–16 кВ. В расчетах не были учтены потери электрической энергии в преобразователях напряжения 12/3 кВ.

На Втором международном конгрессе ж.-д транспорта, состоявшемся в Турине (журнал «Инженерия Ферровьяра», октябрь, 1973) был поднят вопрос о возможности внедрения системы электрической тяги постоянного тока напряжением 6 кВ. В феврале 1974 г. в этом же журнале авторами из Администрации железнодорожной сети (Ф.С.) дается изучение перспектив применения этой системы на сети Ф.Т., уже электрифицированной при напряжении 3 кВ. В 1980 г. группа специалистов фирмы *Ansaldo* совместно с итальянскими железными дорогами начала проработки системы тяги постоянного тока повышенного напряжения — 12 кВ [55]. Ими теоретически была доказана эквивалентность этой системы по энергетическим показателям системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ, 50 Гц. Но практически система 12 кВ не была реализована. «Попытки итальянских железных дорог создать систему электрической тяги 12–18 кВ постоянного тока не имели успеха» [56, 1].

Дальнейшие разработки системы электрической тяги постоянного тока с высоким напряжением в электротяговой сети были продолжены под руководством профессора А. Т. Буркова в 1980–1990 гг. на Октябрьской магистрали под Ленинградом (12 кВ). Однако их пришлось приостановить из-за прекращения финансирования МПС [57–59].

Как отмечалось ранее, совершенствование системы электрической тяги постоянного тока связано с повышением напряжения до 6–24 кВ при передаче электрической энергии от источника к потребителю.

Но существует применяемый на практике и «традиционный способ усиления участков постоянного тока — установка на перегоне дополнительных одноагрегатных тяговых подстанций [41], питание к которым подводится прокладываемой по опорам контактной сети линией электропередачи, например ЛЭП 35 кВ: эти подстанции осуществляют одноступенчатую трансформацию напряжения» [1].

Проблемой технико-энергетической эффективности системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения в контактной сети занимались ряд учебных заведений, научных коллективов, отечественных и зарубежных железных дорог. Определенный вклад в решение этой проблемы также внесли доктора технических наук Тихменев Б. Н., Котельников А. В., Бурков А. Т., Курбасов А. С., Кучумов В. А., Бадер М. П., Пупынин В. Н., Марикин А. Н. Обзор результатов работ по повышению напряжения в контактной сети до 6–24 кВ подробно рассмотрен докторами технических наук Б. Н. Тихменевым [53] и А. В. Котельниковым [1].

Исследованиями А. В. Котельникова установлено что «применение электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения с современных позиций представляется целесообразным рассматривать не при новой электрификации, а только на существующих участках постоянного тока напряжением 3 кВ для соответствующего усиления их системы электроснабжения в случае необходимости повышения провозной способности или же в случае модернизации при предельном износе оборудования системы электроснабжения».

Исследования Б. Н. Тихменева затрагивают не только систему постоянного тока повышенного напряжения, но и систему постоянного тока 3,0 кВ с коллекторным приводом и с асинхронным приводом.

Коллекторные тяговые двигатели постоянного тока, разработанные учениками и конструкторами, воспитанными на трудах А. Е. Алексева, «доведенные до высокого уровня надежности» применены на действующих электровозах постоянного тока напряжением 3,0 кВ.

По исследованию Б. Н. Тихменева [53], «асинхронный привод не облегчает решение проблемы создания электровоза, предназначенного для усиления действующих железных дорог постоянного тока 3,0 кВ. Наоборот, такой привод существенно усложняет систему преобразователей электровоза и создает большие трудности в конструктивном осуществлении такого электровоза».

«Более реальным [53] представляется создание электровоза постоянного тока повышенного напряжения с коллекторными двигателями,

обеспечивающим полноценный по мощности режим работы в системе 3,0 кВ. В разработке такого электровоза следует ориентироваться на применение преобразователей с широтно-импульсным регулированием и ограничиться повышением напряжения до 6,0 кВ». «Для усиления действующих участков с напряжением 3,0 кВ... повышение напряжения до 6,0 кВ, как правило, будет достаточным. Вместе с тем проведенный анализ показывает, что электровоз повышенного напряжения будет много сложнее электровоза с импульсным регулированием на 3,0 кВ», т.е. с преобразователем импульсного регулирования, или электровоза с асинхронным приводом с выпрямительно-инверторным преобразователем с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) для регулирования напряжения и частоты трехфазного тока на выходе преобразователя, т.е. на входе асинхронного двигателя.

Доктор технических наук А. С. Курбасов в 1988 г. [60] отмечает, что «опыт эксплуатации системы электрической тяги с напряжением контактной сети 3 кВ выявил определенные преимущества перед электрической тягой переменного тока 25 кВ, в частности по расходу электроэнергии, капитальным и эксплуатационным затратам» и что «радикальным средством [60] модернизации системы электрической тяги постоянного тока с напряжением 3 кВ в контактной сети является значительное его повышение, например до 12 кВ».

В работах [60, 61] А. С. Курбасова показаны главные преимущества тяговых асинхронных двигателей. Асинхронные двигатели могут развивать большие скорости движения, чем коллекторные постоянного тока, и «для коллекторных тяговых двигателей предел мощности по надежности составляет 750–800 кВт; при асинхронном тяговом двигателе в тех же габаритах (и даже меньших) реализуется мощность 1200–1400 кВт».

В [60] говорится, что «опыт создания электровозов с асинхронным приводом в основном относится к системе переменного тока в контактной сети».

В любом случае для электровоза повышенного напряжения с коллекторными тяговыми двигателями постоянного тока с импульсным регулированием напряжения или с асинхронными тяговыми двигателями с преобразованием регулирования напряжения и частоты потребуется входной инверторно-выпрямительный преобразователь  $= U_{\text{вх}} / = U_{\text{вых}}$ .

Повышение напряжения в контактной сети постоянного тока до 6, 12, 24 кВ осуществимо по техническим устройствам тяговых подстанций, но затруднено по прямой электрической связи высокого напряжения

контактной сети с допустимым напряжением тягового двигателя постоянного тока 1500 В, определяемым его габаритными размерами. Необходима разработка высоковольтного преобразователя электрической энергии (ЭЭ) постоянно-постоянного тока и высоковольтного коммутирующего выключателя с защитными функциями.

На каждой секции ЭПС повышенного напряжения 6–24 кВ должен устанавливаться (рис. 1.26) выключатель постоянного тока на напряжения 6–24 кВ (обозначение 5 на рис. 1.26) и входной преобразователь = 6–24/ = 3 кВ.

Если на высоковольтном ЭПС 6–24 кВ применить коллекторные тяговые двигатели постоянного тока ТЭД напряжением 1,5 кВ, то на каждой секции ЭПС необходимо установить трехступенчатый преобразователь: инвертор, трансформатор и выпрямительный блок (рис. 1.26, а).

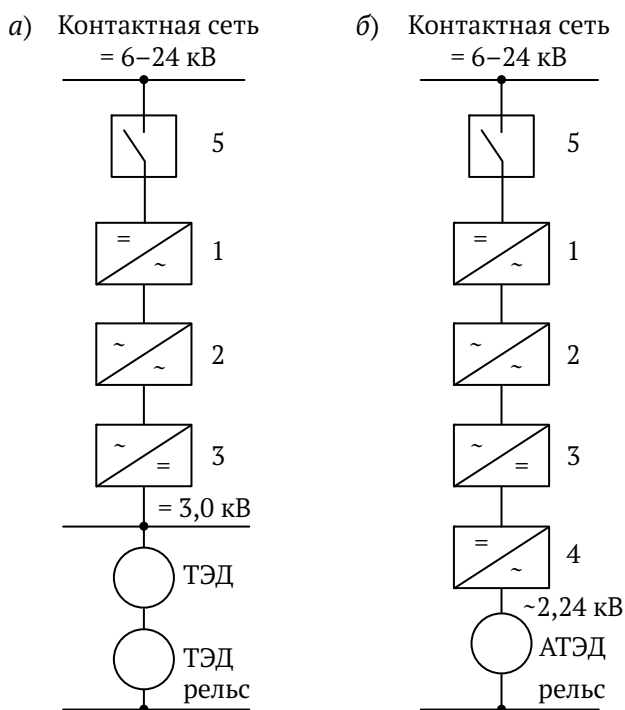


Рис. 1.26. Функциональные схемы преобразования электрической энергии постоянного тока повышенного напряжения в контактной сети к тяговым двигателям электровоза: а — коллекторные постоянного тока ТЭД; б — асинхронный с короткозамкнутым ротором АТЭД; 1 — инвертор; 2 — трансформатор; 3 — выпрямитель; 4 — автономный инвертор напряжения АИН; 5 — высоковольтный выключатель

Если на ЭПС применить асинхронный электропривод, то на каждой секции ЭПС к общему для секции трехступенчатому преобразователю (рис. 1.26, а) дополнительно и отдельно для каждого из четырех асинхронных тяговых двигателей — АТЭД с короткозамкнутым ротором устанавливается автономный инвертор напряжения АИН (рис. 1.26, б), обеспечивающий регулирование частоты напряжения статора 2240 В и, соответственно, скорости вращения ротора тягового двигателя.

Естественно, входной преобразователь будет обладать определенными потерями мощности, влияющими на КПД системы электрической тяги и стоимостью, существенно влияющей на стоимость ЭПС.

В мировой практике такие преобразователи на входное напряжение постоянного тока 6–24 кВ отсутствуют [58, 59]. Имеются только схемные решения на преобразовательные модули с входным напряжением 8 кВ для преобразователя напряжения  $= 24/3 = 8$  кВ, например с тремя преобразовательными модулями.

Схема преобразовательного модуля преобразователя 24/3,0 кВ для системы тягового электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения (предложенная профессором А. Т. Бурковым) предусматривает выполнение на основе блочно-модульного принципа [59].

На основе этого принципа кафедрой «Электроснабжение железных дорог» Петербургского государственного университета путей сообщения (ПГУПС) [62] и независимо ОКБ Автоматика г. Екатеринбург [63] выполнен расчет преобразовательного модуля преобразователя напряжения 24/3,0 кВ для одной секции электровоза. Преобразователь состоит из трех одинаковых преобразовательных модулей, соединенных по входу последовательно ( $3 \times 8 = 24$  кВ) и параллельно по выходу (3 кВ). Каждый модуль выполняется из двух однофазных мостовых четырехквadrатных преобразователей (одного на входе, другого на выходе), подключенных к высокочастотному трансформатору.

Преобразовательный модуль ПГУПС [62] на входное напряжение 8 кВ с расчетной выходной мощностью 1666 кВт имеет потерю мощности 179 кВт и КПД 0,903 о.е.

Преобразователь с тремя преобразовательными модулями на 8 кВ ОКБ Автоматика [63] с входным напряжением 24 кВ и с выходной мощностью 5000 кВт имеет потерю мощности 208 кВт и КПД 0,96 о.е.

В начале 1970 гг. была организована от тяговой подстанции Рудянка Свердловской железной дороги передача электрической энергии по проводам 2А-185 дополнительной ЛЭП с отдельно стоящими опорами

на расстоянии 13,5 км к преобразователю напряжения = 6,0/3,0 кВ и далее в контактную сеть (автор — кандидат технических наук Т. П. Третьяк). На тяговой подстанции от преобразовательного агрегата с дополнительным вольтодобавочным агрегатом выходное напряжение и ток составили 6600 В и 1000 А. За счет падения напряжения преобразователя при токе 1000 А выходное напряжение снизилось до 5300 В. При этом потеря мощности в преобразователе при передаче энергии в контактную сеть составила 120 кВт.

Разработка «НПП «Горизонт» представляет преобразователь на входное напряжение 6,0 кВ, входную мощность 3600 кВт, входной ток 600 А, выходную мощность 3480 кВт и при существующем уровне расчета и развития схем и состояния полупроводниковой техники обеспечивает потерю мощности, равной 120 кВт.

Применение в системе электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения 6, 12, 24 кВ с включением в схему электровоза преобразователя напряжения естественно увеличивает потерю мощности электровоза и его стоимость.

Так, например, «... в России [1] построен электропоезд постоянного тока ЭД6 с асинхронным приводом, преобразователь которого с напряжением 3 кВ на входе создан японской фирмой *Hitachi* на базе *IGBT*-транзисторов...». По опубликованным данным, стоимость ЭД6 близка к стоимости трех традиционных электровозов ЭД4. «Преобразователь на напряжение 6 или 12 кВ будет стоить еще дороже: стоимость возрастает примерно пропорционально повышению напряжения на его входе» [1].

Кроме того, в [64] указано, что преобразователи на высокое входное напряжение 6–35 кВ могут внести проблемы в обеспечение электромагнитной совместимости с системами железнодорожной связи и автоматики.

«Есть еще одно обстоятельство, заставляющее усомниться в перспективности развития систем электротяги постоянного тока повышенного напряжения, связанное опять же с входными преобразователями ЭПС. Это широкий спектр гармоник, содержащихся в токе, потребляемом ЭПС, наличие которых крайне осложняет обеспечение электромагнитной совместимости ЭПС с рельсовыми цепями СЦБ (особенно в области низких частот — 25, 50 и 75 Гц) и другими частотными средствами управления объектами железнодорожного транспорта. Порой при введении ЭПС нового поколения даже на напряжение 3 кВ приходится заменять на участках его обращения рельсовые цепи СЦБ (например, РЦ 25 Гц на скоростной линии Санкт-Петербург — Москва). С этим же столкнулись при

испытаниях и доводке двухсистемного электровоза ЭП10, электропоездов ЭД6 и «Сокол».

Преобразователи на более высокое входное напряжение (6, 12, 24 кВ) могут создать гораздо бóльшие трудности в обеспечении электромагнитной совместимости со смежными системами железнодорожной автоматики» [1].

«Повышение напряжения в контактной сети постоянного тока, например до 12 (24) кВ, приводит к серьезному усложнению силовой схемы ЭПС, требует применения значительного числа дорогостоящих управляемых полупроводниковых модулей, повышает массогабаритные показатели, ухудшает энергетiku ЭПС (снижает его КПД). Так, у ЭПС на 24 кВ КПД на 7,4 % ниже, чем у ЭПС на 12 кВ. Иначе говоря, основная цель создания системы тяги повышенного напряжения постоянного тока — передача энергии по контактной сети к ЭПС с меньшими потерями энергии, чем при переменном токе, — не достигается из-за потерь энергии на ЭПС» [1], что согласуется с выводами [52].

Доктором технических наук А. В. Котельниковым даны [1] четкие и ясные условия о возможности применения электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения: «не при новой электрификации, а только на существующих участках постоянного тока 3,0 кВ»; с другой стороны, «обстоятельство, заставляющее усомниться в перспективности развития систем электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения, — это широкий спектр гармоник, содержащихся в токе, потребляемом ЭПС» с входным преобразователем; а также стоимостные показатели входных преобразователей и неизбежные потери электрической энергии в преобразователях, которые «сведут на нет выгоду от передачи энергии к поездам на постоянном токе».

Предлагаемый способ повышения эффективности системы электрической тяги постоянного тока за счет увеличения напряжения в контактной сети до 6,0 кВ может быть связан с желанием дальнейшей разработки и возможным снижением стоимости силовой управляемой полупроводниковой техники. Но на современном расчетном этапе преобразователь с тремя модулями [62], рассчитанный каждый на входное напряжение постоянного тока 8,0 кВ, уже имеет в одном плече один запираемый (*GCT*) тиристор с предельным током 500 А, с напряжением не ниже 65-го класса.

Стремление уменьшить потери мощности и массу модуля за счет повышения частоты процесса переключения входного преобразователя вызовет увеличение гармонического состава, для снижения величины

которых потребуются высокочастотные фильтры и, главное, для силовой части — применение высокочастотных тиристорных значительных токов и напряжений.

Но в любом случае потеря мощности преобразователя и его электромагнитная несовместимость с рельсовыми цепями и с другими смежными системами железнодорожной автоматики из-за гармонического состава и величины гармоник тока ЭПС, вызванных работой входного преобразователя, сохраняются.

### **1.1.11. Сравнительный анализ систем электрической тяги постоянного тока с напряжением холостого хода тяговых подстанций 6,6 кВ и 3,5 кВ**

Технико-энергетическое сравнение приведено на межподстанционной зоне (МПЗ) однопутного участка протяженностью 20 км, равной средней протяженности зон электрифицированной системы постоянного тока 3,0 кВ.

На участке в каждом варианте расчета устанавливаются поезда с электровозами, сравниваемые по мощности с электровозом 2ЭС6, и поезда с высоковольтными электровозами с двумя (по одному на секцию) преобразователями напряжения 6,0/3,0 кВ, потери мощности каждого из которых приняты из расчета «НПП «Горизонт» и равными 120 кВт (при входной мощности преобразователя одной секции электровоза 3600 кВт). Потеря мощности преобразователя, рассчитанного [62] ПГУПС, составляет  $3 \times 175 = 525$  кВт при входной мощности преобразователя «из трех элементарных модулей»  $3 \times 1845 = 5535$  кВт.

Для сравнения удельная потеря мощности (отношение потерь мощности к мощности преобразователя) преобразователя ПГУПС (0,0949 о.е.) значительно превышает удельные потери преобразователя «Горизонт» — 0,0333 о.е.

Основным требованием при сравнительном анализе систем электрической тяги постоянного повышенного напряжения 6,0 кВ и напряжение 3,0 кВ является обеспечение напряжения на токоприемнике электровоза в соответствующей системе не менее 6,0 кВ и 3,0 кВ. При выборе состава контактной подвески, имеющейся в эксплуатации, в расчетах возможно допущение незначительного увеличения напряжения на токоприемнике электровоза в пределах 3–5 %.



Варианты расположения поездов на МПЗ без учета скорости движения  $V$  (км/ч), времени межпоездного интервала  $\Theta$  (мин), но с учетом длины пути межпоездного интервала  $\Delta l = 10$  км представлены на 20-километровой МПЗ (рис. 1.27).

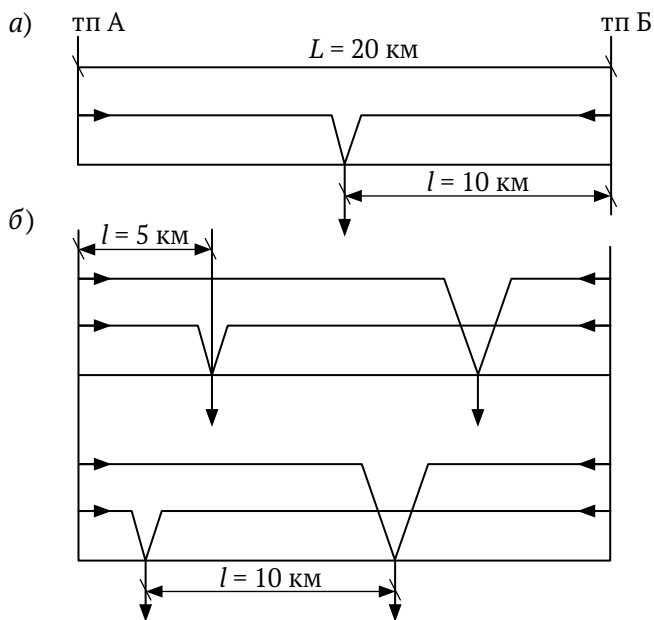


Рис. 1.27. Варианты расположения поездов на участке:  
 а — один поезд; б — два поезда с симметричным и с несимметричным расположением относительно центра МПЗ

К расчету потерь мощности с одним поездом в середине МПЗ

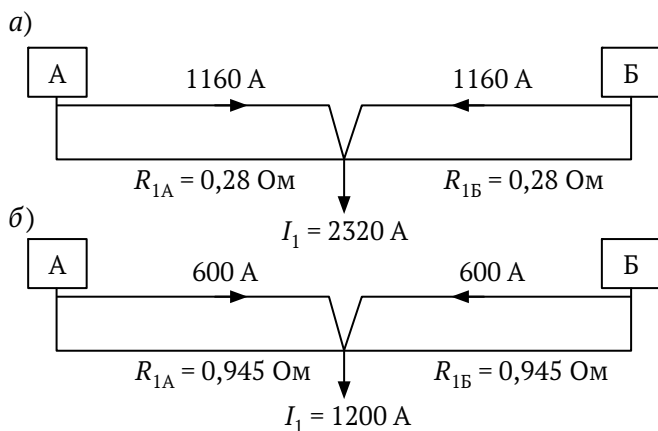


Рис. 1.28. Распределение токов электровозов в проводах контактной сети

Таблица потерь мощности

Наименование параметра	Зона электрической тяги	
	6,0 кВ	3,5 кВ
Распределение токов ЭПС в контактной сети (см. рис. 1,28, а, б)		
$I_{1A}, A$	600	1160
$I_{1B}, A$	600	1160
Состав контактной подвески	М-95+МФ-100; $I_{доп} = 1200A$ ; $r_0 = 0,0945 Ом/км$	М-120+2МФ-100+3А-185; $I_{доп} = 3940 A$ ; $r_0 = 0,028 Ом/км$
Потери мощности в контактной сети $\Delta P_{КС} = I^2 R$		
А-1, кВт	$600^2 \cdot 0,945 = 340,200$	$1160^2 \cdot 0,28 = 376,768$
Б-1, кВт	$600^2 \cdot 0,945 = 340,200$	$1160^2 \cdot 0,28 = 376,768$
Всего $\Delta P_{КС}$ , кВт	680,400	753,536
Потери мощности в одном преобразователе электровоза, кВт	120,0	—
Итого потери мощности в электровозе, кВт	$2 \cdot 120 = 240,0$	—
Суммарные потери мощности, кВт	920,400	753,536

При повышении напряжения в контактной сети до 6,0 кВ понизились потери мощности в контактной сети на 9,7 % и повысились суммарные потери мощности на 22,1 %.

К расчету потерь мощности при расположении поезда между серединой МПЗ и тяговой подстанцией

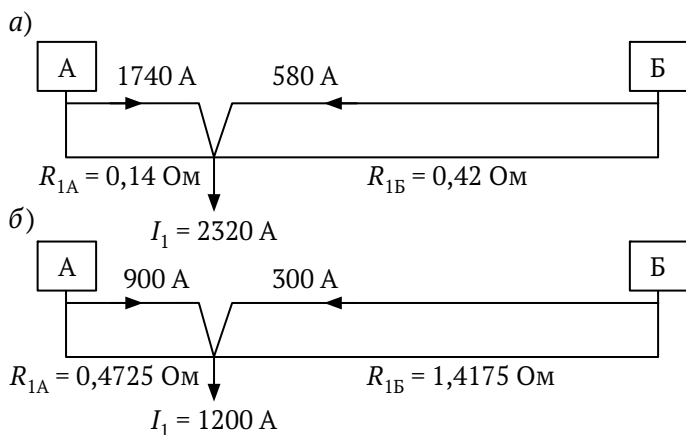


Рис. 1.29. Распределение токов электровозов в проводах контактной сети

Таблица 1.3

Таблица потерь мощности

Наименование параметра	Зона электрической тяги	
	6,0 кВ	3,5 кВ
Распределение токов ЭПС в контактной сети (см. рис. 1.29, а, б)		
$I_{1A}, A$	900	1740
$I_{1B}, A$	300	580
Состав контактной подвески	М-95+МФ-100; $I_{доп} = 1200A$ ; $r_0 = 0,0945 \text{ Ом/км}$	М-120+2МФ-100+3А-185; $I_{доп} = 3940 A$ ; $r_0 = 0,028 \text{ Ом/км}$
Потери мощности в контактной сети $\Delta P_{КС} = I^2 R$		
А-1, кВт	$900^2 \cdot 0,4725 = 3382,725$	$1740^2 \cdot 0,14 = 423,864$
Б-1, кВт	$300^2 \cdot 1,4175 = 127,575$	$580^2 \cdot 0,42 = 141,288$
Всего $\Delta P_{КС}, \text{ кВт}$	510,300	565,152
Потери мощности в одном преобразователе электровоза, кВт	120,0	—
Итого потери мощности в электровозе, кВт	$2 \cdot 120 = 240,0$	—
Суммарные потери мощности, кВт	750,300	565,152

При повышении напряжения в контактной сети до 6,0 кВ понизились потери мощности в контактной сети на 9,7 % и повысились суммарные потери мощности на 32,76 %.

К расчету потерь мощности при расположении поезда ближе к тяговой подстанции:

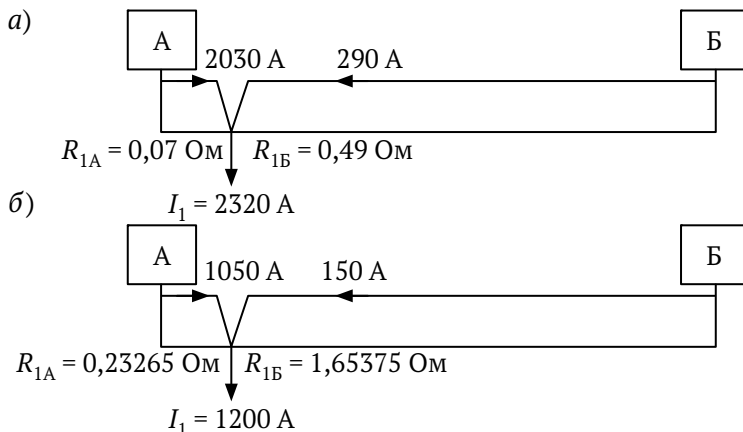


Рис. 1.30. Распределение токов электровозов в проводах контактной сети

Таблица 1.4

Таблица потерь мощности

Наименование Параметра	Зона электрической тяги	
	6,0 кВ	3,5 кВ
Распределение токов ЭПС в контактной сети (см. рис. 1.30, а, б)		
$I_{1A}, \text{ A}$	1050	2030
$I_{1B}, \text{ A}$	150	290
Состав контактной подвески	М-95+МФ-100; $I_{\text{доп}} = 1200\text{A}$ ; $r_0 = 0,0945 \text{ Ом/км}$	М-120+2МФ-100+3А-185; $I_{\text{доп}} = 3940\text{A}$ ; $r_0 = 0,028 \text{ Ом/км}$
Потери мощности в контактной сети $\Delta P_{\text{КС}} = I^2 R$		
А-1, кВт	$1050^2 \cdot 0,23265 = 256,5$	$2030^2 \cdot 0,07 = 288,463$
Б-1, кВт	$150^2 \cdot 1,65375 = 37,2$	$290^2 \cdot 0,49 = 41,209$
Всего $\Delta P_{\text{КС}}$ , кВт	293,7	329,669
Потери мощности в одном преобразователе электровоза, кВт	120,0	—
Итого потери мощности в электровозе, кВт	$2 \cdot 120 = 240,0$	—
Суммарные потери мощности, кВт	533,7	363,4

При повышении напряжения в контактной сети до 6,0 кВ понизились потери мощности в контактной сети на 10,9 % и повысились суммарные потери мощности на 62 %.

При приближении поезда от центра МПЗ к подстанции увеличиваются суммарные потери мощности: поезд в центре МПЗ (см. рис. 1.28) увеличение суммарных потерь мощность на 22,1 %; поезд между центром МПЗ и подстанцией (см. рис. 1.29) — на 32,76 %; поезд вблизи подстанции (см. рис. 1.30) — на 62 %.

К расчету потерь мощности с двумя симметрично расположенными относительно центра МПЗ поездами:

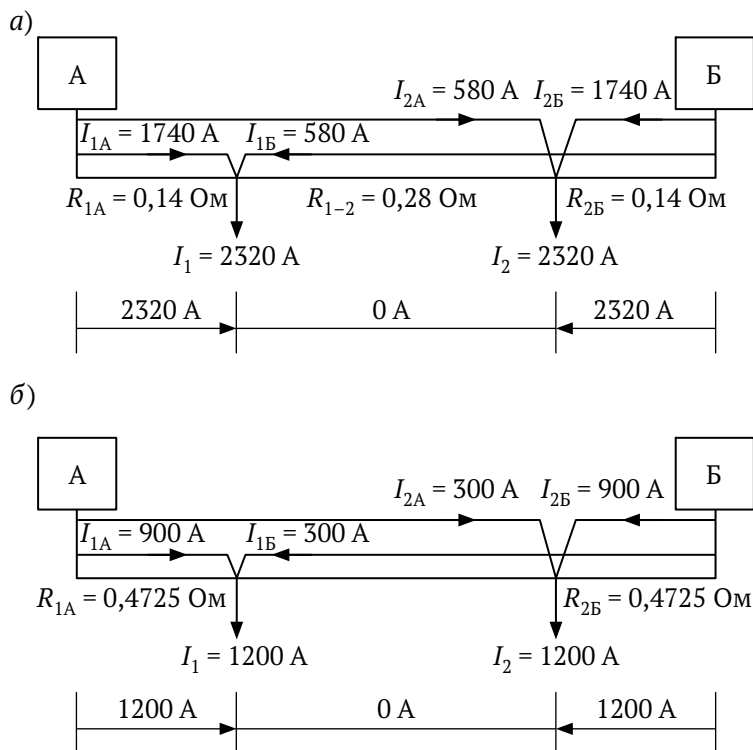


Рис. 1.31. Распределение токов электровозов в контактной сети с напряжением холостого хода тяговых подстанций:  
а — 3,5 кВ; б — 6,6 кВ

Таблица потерь мощности

Наименование параметра	Зона электрической тяги	
	6,0 кВ	3,5 кВ
Токи ЭПС, А		
Распределение токов ЭПС в контактной сети (см. рис. 1.31, а, б)		
$I_{1А} = I_{2Б}, А$	900	
$I_{1Б} = I_{2А}, А$	300	
Состав контактной подвески	М-95+МФ-100; $I_{доп} = 1200А$ ; $r_0 = 0,0945 Ом/км$	М-120+2МФ-100+3А-185; $I_{доп} = 3940 А$ ; $r_0 = 0,028 Ом/км$
Потери мощности в контактной сети $\Delta P_{КС} = I^2 R$		
А-1, кВт	$1200^2 * 0,4725 = 680,400$	$2030^2 * 0,07 = 753,536$
1-2, кВт	0	0
2-Б, кВт	$1200^2 * 0,4725 = 680,400$	$2320^2 * 0,14 = 753,536$
Всего $\Delta P_{КС}$ , кВт	1360,800	1507,072
Потери мощности в двух преобразователях электровоза, кВт	$2 * 120,0 = 240,0$	—
Итого потери мощности в электровозах на МПЗ, кВт	$2 * 240 = 480,0$	—
Суммарные потери мощности, кВт	1840,800	1507,072

При повышении напряжения в контактной сети до 6,0 кВ понизились потери мощности в контактной сети на 9,7 % и повысились суммарные потери мощности на 22,1 %.

Расчет варианта с двумя несимметрично расположенными относительно центра МПЗ поездами:

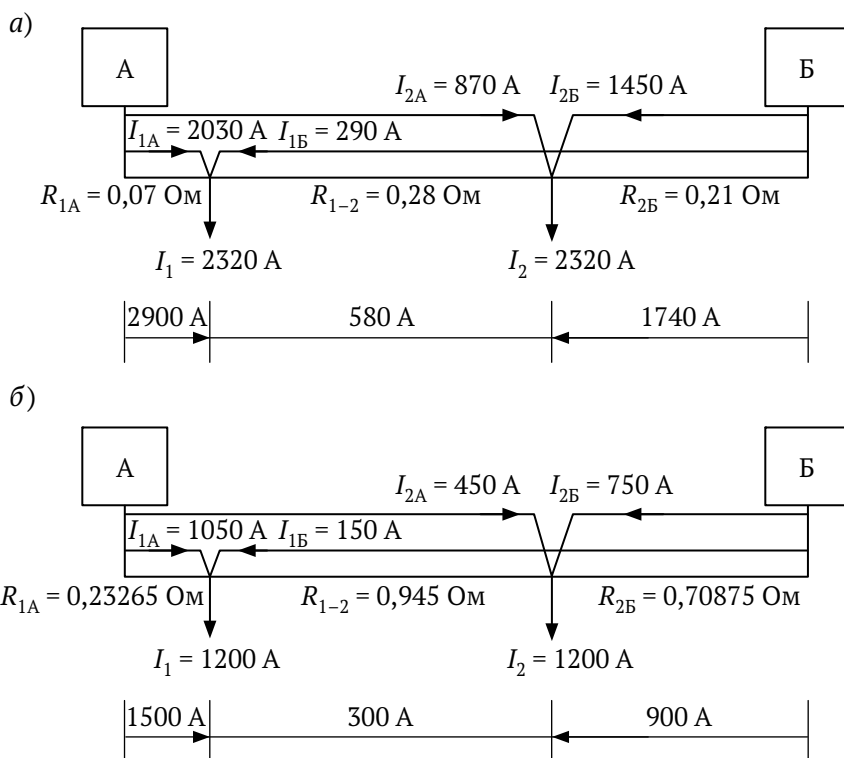


Рис. 1.32. Распределение токов электровозов в контактной сети с напряжением холостого хода тяговых подстанций:  
а — 3,5 кВ; б — 6,6 кВ

Таблица 1.6

Таблица потерь мощности

Наименование параметра	Зона электрической тяги	
	6,0 кВ	3,5 кВ
Токи ЭПС, А	1666	2676
Распределение токов ЭПС в контактной сети (см. рис. 1.32, а, б)		
$I_{1A}$ , А	1050	2030
$I_{2B}$ , А	750	1450
$I_{2A} - I_{1B}$ , А	$450 - 150 = 300$	$870 - 290 = 580$

Наименование параметра	Зона электрической тяги	
	6,0 кВ	3,5 кВ
Состав контактной подвески	М-95+МФ-100; $I_{\text{доп}} = 1200\text{А};$ $r_0 = 0,0945 \text{ Ом/км}$	М-120+2МФ-100+3А-185; $I_{\text{доп}} = 3940 \text{ А};$ $r_0 = 0,028 \text{ Ом/км}$
Потери мощности в контактной сети $\Delta P_{\text{КС}} = I^2 R$		
А-1, кВт	$1500^2 \cdot 0,23265 = 523,463$	$2900^2 \cdot 0,07 = 588,700$
1–2, кВт	$300^2 \cdot 0,945 = 85,050$	$580^2 \cdot 0,28 = 94,192$
2-Б, кВт	$750^2 \cdot 0,70875 = 398,672$	$1740^2 \cdot 0,21 = 635,796$
Всего $\Delta P_{\text{КС}}$ , кВт	1007,185	1318,688
Потери мощности в двух преобразователях электровоза, кВт	$2 \cdot 120,0 = 240,0$	—
Итого потери мощности в 2-х электровозах на МПЗ, кВт	$2 \cdot 240 = 480,0$	—
Суммарные потери мощности, кВт	1487,185	1318,688

При повышении напряжения в контактной сети до 6,0 кВ понизились потери мощности в контактной сети на 23,6 % и повысились суммарные потери мощности на 12,8 %.

Произведенные расчеты потерь мощности в контактной сети и суммарные потери мощности с учетом потерь мощности преобразователей =6,0/3,0 кВ, устанавливаемых на электровозах при повышении напряжения в контактной сети до 6,0 кВ, показывают, что происходит снижение потерь мощности в контактной сети на 9,7 %–10,9 %, но происходит и повышение суммарных потерь мощности на 22,1–46,7 % при нахождении одного поезда на МПЗ или двух поездов, симметрично расположенных относительно центра МПЗ. При нахождении одного поезда на МПЗ суммарные потери возрастают с 22,1 % (центр МПЗ) до 46,7 % (между МПЗ и подстанцией) и 62 % (около подстанции).

При несимметричном расположении поездов относительно центра МПЗ, соответствующих реальному движению поездов, также происходит снижение потерь мощности в контактной сети на 23,6 % при повышении суммарных потерь мощности на 12,8 %, (см. рис. 1.32), величины которых зависят от расположения поездов на МПЗ.



При повышении напряжения в контактной сети до 12, 24 кВ, естественно, будут снижаться потери мощности в контактной сети, но также будут повышаться потери в преобразователях, которые «сведут на нет выгоду от передачи энергии к поездам на постоянном токе» [1].

Кроме этого, происходит увеличение стоимости электровозов повышенного напряжения 6,0 кВ за счет стоимости в каждом электровозе двух преобразователей 6,0/3,0 кВ и стоимости объема монтажных работ преобразователя. По данным [62], только в одной из двух секций электровоза масса преобразователя мощностью 5000 кВт с входным напряжением 24 кВ «составляет не более 3000 кг, а рабочий объем не превышает 8,5 м<sup>3</sup>».

Таким образом, разработке и применению системы постоянного тока повышенного напряжения препятствуют следующие условия (факты [65]):

- преобразователи напряжения постоянно-постоянного тока с условием обеспечения электромагнитной совместимости с рельсовыми цепями, железнодорожной связи и автоматики;

- наличие значительных потерь электрической энергии преобразователей, которые совместно с потерями электрической энергии в контактной сети превышают потери электрической энергии в контактной сети системы электрической тяги 3,0 кВ. Превышение потерь электрической энергии приведет к увеличению расхода электрической энергии на тягу поездов, что противоречит поставленной задаче;

- отсутствие разработок и практического создания малогабаритных (в сравнении с переменным током) и надежных высоковольтных выключателей постоянного тока фидеров тяговых подстанций и особенно электровозов;

- повышение напряжения в контактной сети постоянного тока на более высокое напряжение до 12, 24, 36 кВ вызовет более значительное понижение КПД электровозов и «гораздо бóльшие трудности в обеспечении электромагнитной совместимости со смежными «системами железнодорожной автоматики [1]».

Стремление повышения эффективности электрифицированных железных дорог за счет повышения напряжения в контактной сети постоянного тока, несомненно, должно быть сопоставимо с существующей системой однофазного переменного тока 25 кВ 50 Гц.

Исследования ВНИИЖТа, выполненные в 70-е гг. доктором технических наук Б. Н. Тихменевым, показали, что однофазной системе электрической тяги 25 кВ 50 Гц «конкурентоспособной система тяги на постоянном токе может стать лишь при напряжении в контактной сети 24 кВ и более».

Последующие исследования и расчеты показывают, что система электрической тяги на переменном токе превосходит систему электрической тяги постоянного тока 3–24 кВ.

Для сведения, «Экспертным советом ВСМ» 19.06.2018 г. предусмотрено при проектировании, строительстве и эксплуатации высокоскоростных железных магистралей в Российской Федерации на направлении Москва — Казань (на участке Ногинск — Казань) использование однофазной системы электрической тяги переменного тока 2×25 кВ 50 Гц. Осуществляется дальнейшее продление ВСМ на участке Казань — Екатеринбург.

Определяющей системой электрической тяги на современном этапе является однофазная система электрической тяги 25 кВ 50 Гц (ее вариант 2×25 кВ 50 Гц) с дальнейшей разработкой более эффективной модификации (например, 50 кВ 50 Гц) однофазной или другой новой системы электрической тяги переменного тока.

## **1.2. СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

### **Общие положения**

Существующая однофазная система электрической тяги<sup>2</sup> железных дорог переменного тока 25 кВ 50 Гц (рис. 1.33) содержит электротяговую сеть с контактным проводом КС, тяговые подстанции с трехфазными трансформаторами, тяговый рельс (тяговые рельсы) ТР, соединенные с одной из фаз трехфазного трансформатора, электроподвижной состав с тяговыми электродвигателями и с устройством токосъема (токоприемник), сообщаемым с контактным проводом.

В современных условиях введение на железнодорожном транспорте скоростного и высокоскоростного движения, сопровождающегося, как и при грузовом движении поездов повышенной массы, повышенными требованиями к устройствам системы электроснабжения по условиям токосъема при высоких скоростях и по уровню напряжения на токоприемнике электровозов.

---

<sup>2</sup>Система электрической тяги состоит из системы тягового электроснабжения СТЭ и системы электроподвижного состава ЭПС.

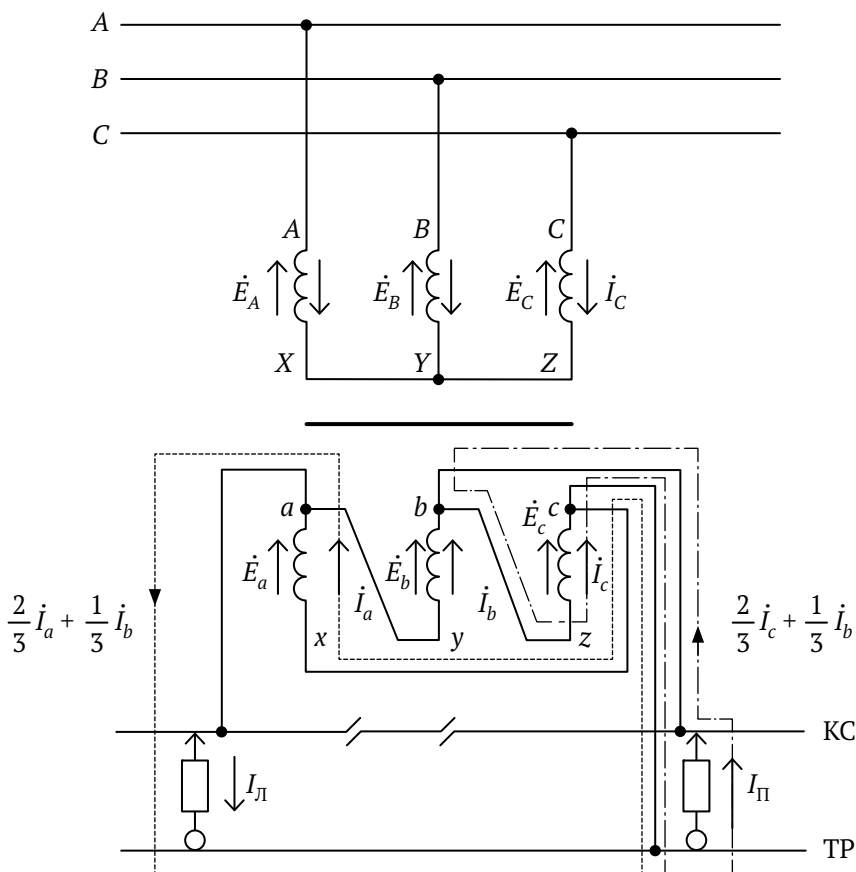


Рис. 1.33. Принципиальная электрическая схема однофазной системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ 50 Гц

В системе электрической тяги однофазного переменного тока особое значение занимает электротяговая сеть по сложности устройства, по объему передаваемой электрической энергии, по надежности работы в системе при отсутствии резервирования элементов.

### 1.2.1. Краткие сведения о контактных подвесках электротяговой сети с токосъемом по нижней поверхности контактного провода (токосъем «понизу»)

Гибкие контактные подвески по конструкции разделяются на простые (без несущего троса) и цепные (с несущим тросом).

Простая подвеска состоит из одного контактного провода, закрепленного на поддерживающих конструкциях опор с однократным подвешиванием и с двукратным подвешиванием (петлевые) контактного провода (рис. 1.34).

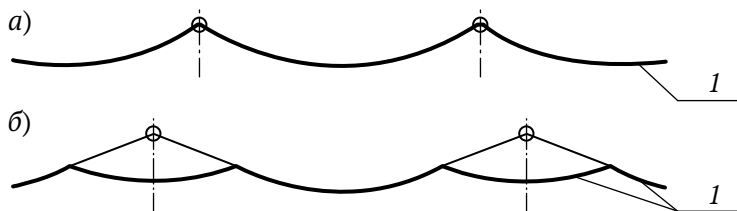


Рис. 1.34. Схема простой контактной подвески:  
а — однократным подвешиванием; б — с двукратным подвешиванием (петлевая)

На работу простой контактной подвески (рис. 1.35) оказывает влияние натяжение и стрела провеса  $f$ , устанавливаемые нормами монтажа в соответствии с температурой окружающей среды. При повышении температуры  $t_{\max}$  происходит удлинение провода, в результате увеличивается стрела провеса и уменьшается натяжение. При понижении температуры  $t_{\min}$  происходит укорочение провода с уменьшением стрелы провеса и увеличением натяжения провода. Кроме изменения температуры появление гололедной и ветровой нагрузок вызывает увеличение стрелы провеса и натяжения контактного провода.

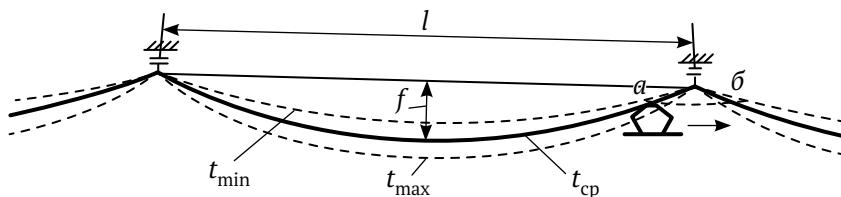


Рис. 1.35. Схема простой подвески взаимодействия контактного провода у опоры с токоприемником и зависимости стрелы провеса провода от температуры

При наличии стрелы провеса контактного провода (с токосъемом «понижу») в точке подвеса происходит по ходу движения токоприемника вначале его отрыв от контактного провода (рис. 1.35, а) и после прохода точки подвеса — соприкосновение (удар) с контактным проводом (рис. 1.35, б). В результате возникает электрическая дуга (искрение), повреждается поверхность с уменьшением сечения провода и происходит более быстрый его износ по сравнению с износом провода ближе к середине пролета.

Простая контактная подвеска допускает удовлетворительное качество токосъема только при скоростях 35–40 км/ч и длине пролета не более 35–40 м, но позволяет развивать скорость движения не более 70 км/ч.

Простые контактные подвески используются на электрифицированных железных дорогах крайне ограниченно и в основном в депо.

### Цепные подвески системы электрической тяги

Для цепных подвесок может быть один или несколько несущих тросов (рис. 1.36) и различная схема подвешивания контактного провода у опорного узла (рис. 1.37).

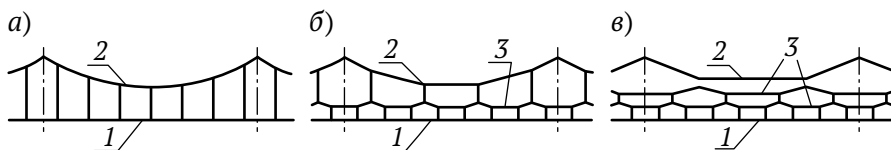


Рис. 1.36. Классификация по количеству несущих тросов цепных подвесок:  
а — одинарные; б — двойные; в — сложные;  
1 — контактный провод; 2 — несущий трос; 3 — вспомогательные провода

Наиболее широко распространены в России и других странах с развитой сетью электрических железных дорог одинарные (с одним несущим тросом рис. 1.36, а) цепные контактные подвески. Для пролетов с большими длинами используется вариант опорного узла с рессорным тросом, для более коротких пролетов — с разнесенными струнами (рис. 1.37).

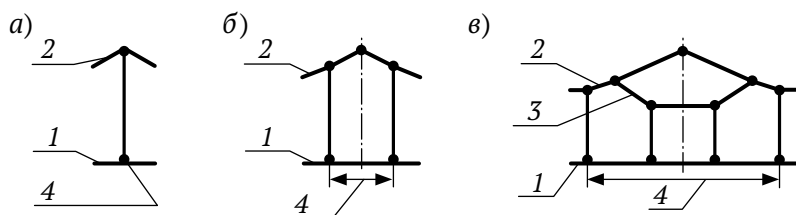


Рис. 1.37. Классификация цепных подвесок по конструкции опорного узла:  
а — с одиночной струной; б — с разнесенными струнами; в — с рессорным тросом;  
1 — контактный провод; 2 — несущий трос; 3 — рессорный трос; 4 — опорный узел

Одинарная цепная подвеска бывает компенсированной, полукомпенсированной и некомпенсированной.

В некомпенсированной цепной подвеске несущий трос НТ и подвешенный к нему медными гибкими струнками контактный провод КП жестко анкеруют (закрепляют) на конечных (анкерных) опорах. Подвеска разбита

на отдельные механически не связанные между собой анкерные участки длиной до 1600 м. Расстояние между струнками в цепных подвесках однофазной системы электрической тяги ОСЭТ принимается равным 8–12 м (рис. 1.38, а).

«Некомпенсированная цепная подвеска допускает скорости движения до 60 км/ч при длинах пролета до 55 м и на электрифицированных линиях СССР ее не применяют» [104].

В *полукомпенсированной цепной подвеске* несущий трос жестко закрепляется на анкерных опорах, а контактный провод имеет на одном конце анкерного участка (односторонняя компенсация) или на двух концах анкерного участка (двусторонняя компенсация) грузовые или пружинные (ретракторы) компенсаторы (рис. 1.38, б). Таким образом, в контактном проводе поддерживается при различных температурах практически постоянное натяжение. При двусторонней компенсации и различных характеристиках натяжения компенсаторов возможно перетягивание контактного провода в ту или иную стороны. Для исключения этого в средней части пролета контактный провод жестко соединен с несущим тросом вспомогательным тросом длиной 15–20 м с названием устройства «средняя анкеровка».

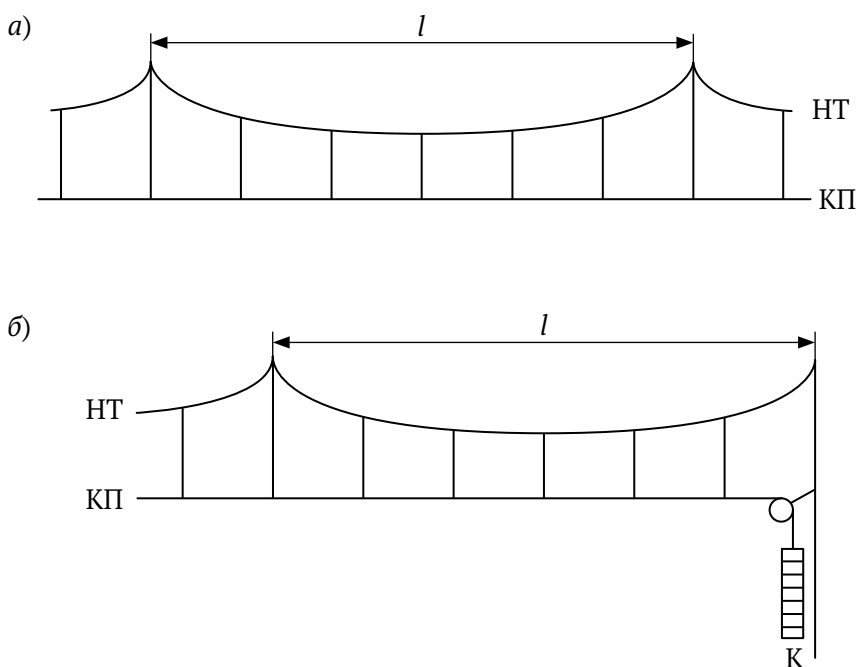


Рис. 1.38. Некомпенсированная (а) и полукомпенсированная (б) цепные подвески

Полукомпенсированная подвеска проста по конструкции и обеспечивает качественный токосъем при скоростях до 100 км/ч с длиной пролетов между опорами 60–70 м [104]. Недостатком такой подвески является значительное изменение стрелы провеса несущего троса и ухудшение эластичности контактного провода около опор, вызванных организацией горизонтального зигзага контактного провода, необходимого при токосъеме «понизу».

Улучшение эластичности контактного провода около опор достигается установкой в подвеске у опор рессорных струн, схематично показанных на рис. 1.37, в и 1.39.

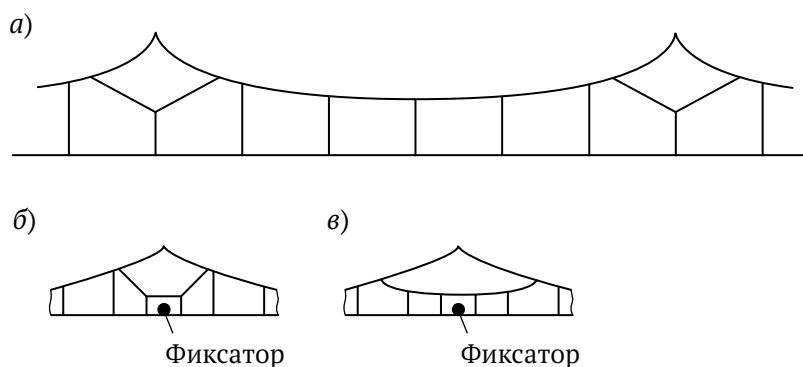


Рис. 1.39. Полукомпенсированная подвеска с рессорными струнами (а) и схема рессорных струн (б) и (в)

Полукомпенсированная рессорная подвеска допускает скорость движения до 130 км/ч и получила широкое распространение.

#### *Компенсированная цепная подвеска*

При полукомпенсированной цепной подвеске уменьшение стрелы провеса несущего троса, улучшающего горизонтальное положение контактного провода, происходит при введении компенсированной цепной подвески, в которой несущий трос и контактный провод имеют компенсаторы (рис. 1.40). На каждом конце анкерного участка на несущем тросе и на контактном проводе устанавливаются отдельно по одному компенсатору (рис. 1.40, а) или — один общий компенсатор для обоих проводов (рис. 1.40, б).

Стрела провеса несущего троса при изменении температуры остается неизменной, а контактный провод сохраняет заданное ему положение. При изменении температуры струны сохраняют вертикальное положение, смещаясь вправо или влево.

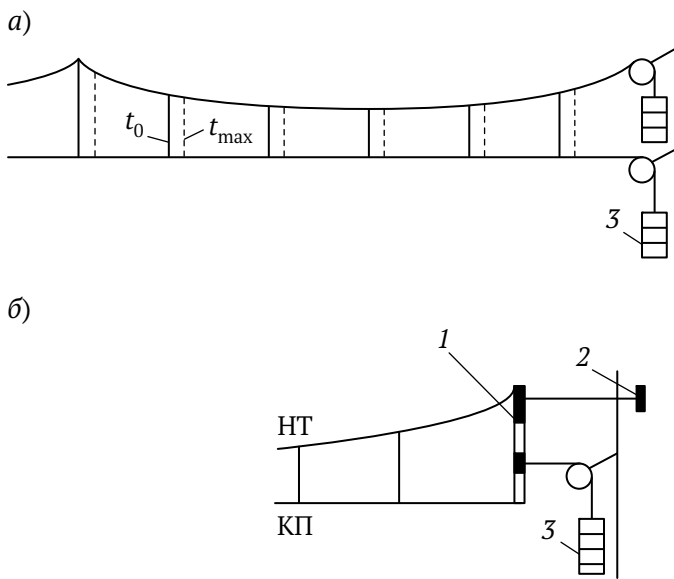


Рис. 1.40. Компенсированная цепная подвеска:  
1 — коромысло; 2 — тормозное устройств; 3 — компенсатор

Такая одинарная (с одним несущим тросом) компенсированная цепная контактная подвеска применяется со скоростями движения до 200 км/ч и длиной пролета до 70 м.

Для высокоскоростного движения со скоростями 200 км/ч и более может быть применена двойная цепная подвеска (см. рис. 1.36, б; рис. 1.41), отличающейся от одинарной наличием вспомогательного провода 3, расположенного между несущим тросом 1 и контактным проводом 4 и подвешенного к несущему тросу нерегулируемыми струнками 2, длина которых зависит от места установки: в середине пролета устанавливаются короткие и с приближение к опоре удлинненные.

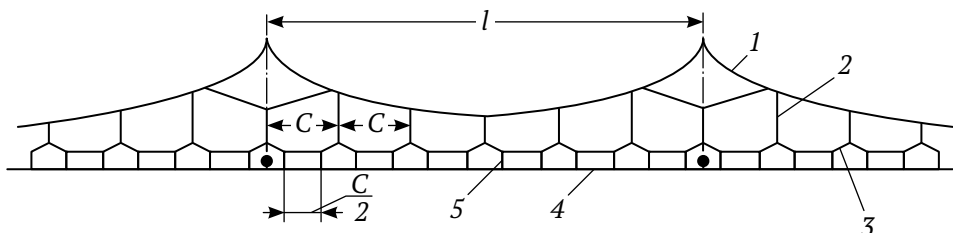


Рис. 1.41. Двойная цепная подвеска с рессорными струнками:  
 $l$  — длина пролета;  $C$  — длина между нерегулируемыми струнками



Контактный провод подвешивается к вспомогательному проводу петлевыми регулируемым струнками 5 (рис. 1.41). Стрела провеса контактного провода двойной цепной подвески при изменении температуры мала, что и допускает ее применение при высокоскоростном движении.

Двойные и сложные (см. рис. 1.36, в) контактные компенсированные подвески сложны в монтаже, эксплуатации и не получили широкого распространения.

### **1.2.2. Пути усиления однофазной системы тягового электроснабжения**

Принято, что электрификация железнодорожных магистралей [1] должна осуществляться по системе однофазного переменного тока 25 кВ 50 Гц и ее вариант 2×25 кВ 50 Гц.

Подтверждены неоспоримые преимущества системы электрификации переменного тока перед системой электрификации на постоянном токе, однако опыт эксплуатации системы переменного тока 25 кВ 50 Гц выявил ряд существенных недостатков, представленных ниже, и при повышении скоростей и интенсивного графика движения поездов возникает необходимость усиления системы. Также, как и в системе постоянного тока 3,0 кВ, в системе 25 кВ 50 Гц можно выделить пассивные и активные варианты усиления.

#### **Пути пассивного усиления однофазной системы тягового электроснабжения**

К пассивным вариантам усиления системы 25 кВ 50 Гц относятся: введение в систему экранирующих и усиливающих проводов; чередование подключения фаз силовых трансформаторов тяговых подстанций, питающихся от одной продольной линии электропередачи; продольная емкостная компенсация; поперечная нерегулируемая емкостная компенсация; поперечные регулируемые фильтрокомпенсирующие установки.

#### **Применение экранирующих и усиливающих проводов (УЭП)**

Применение экранирующих и усиливающих проводов (УЭП) в системе 25 кВ 50 Гц направлено на повышение провозной способности. По сравнению с системой 25 кВ 50 Гц подсистема с УЭП позволяет повысить провозную способность участка в 1,4 раза [1].

## Чередование подключения фаз силовых трансформаторов

В России наиболее распространенной системой электроснабжения электрифицированных железных дорог является схема питания от трехфазной практически несимметричной по токам и напряжениям внешней энергосистемы по линиям передачи 110–220 кВ, идущим вдоль железной дороги. Нагрузка однофазной системы электроснабжения вносит дополнительные в уже имеющую несимметрию нагрузки искажения трехфазную питающую энергосистему.

Для уменьшения несимметрии токов нагрузки у источника питания и несимметрии напряжения в линии передачи ЛЭП 110 (220) кВ одни и те же зажимы силовых трансформаторов тяговых подстанций (наиболее загруженные фазы) поочередно подключают то к одним, то к другим фазам ЛЭП [66]. Порядок присоединения зависит от схемы соединения обмоток трансформаторов на тяговых подстанциях от схемы одностороннего или двухстороннего питания ЛЭП.

Схема питания участка через трехфазные трансформаторы, соединенные по схеме  $Y/\Delta-11$ , при двухстороннем питании по ЛЭП (рис. 1.42) широко применяется в России на электрифицированных участках переменного тока (однофазная система 25 кВ 50 Гц).

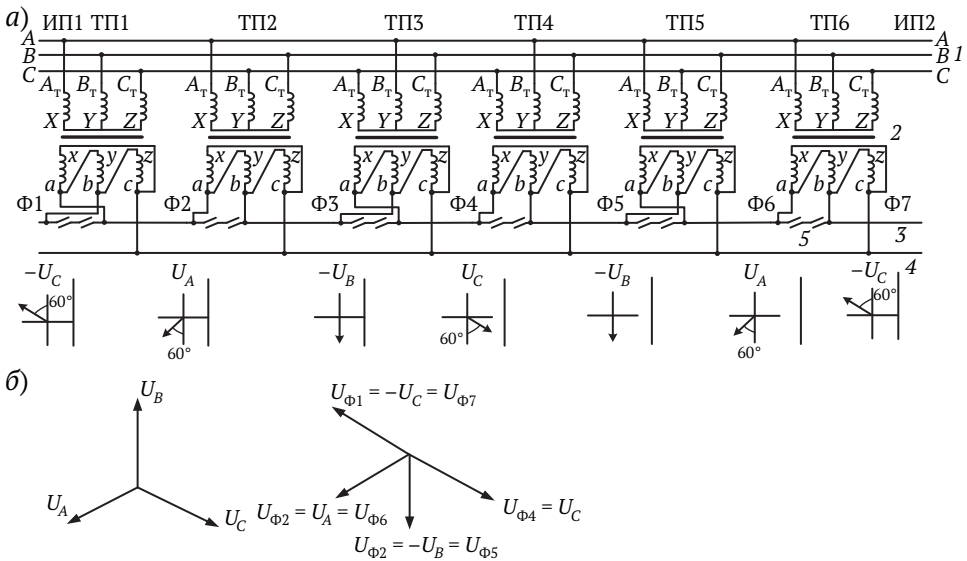


Рис. 1.42. Схема питания участка однофазного тока через трехфазные трансформаторы, соединенные по схеме  $Y/\Delta-11$ , при двухстороннем питании линии передачи:

а — схема питания; б — векторная диаграмма напряжений первичной и вторичной обмоток;

1 — трехфазная линия передачи; 2 — трехфазный трансформатор;

3 — контактная сеть; 4 — рельсы; 5 — нейтральная вставка

В схеме к рельсам подключен один и тот же вывод «С» вторичной обмотки всех трансформаторов. В основе подключения первичных обмоток трансформаторов приняты, как отмечено ранее в этом разделе, три тяговые подстанции, на которых введена последовательность подключения наименее загруженной фазы *B*. На первой ТП первичные обмотки трансформатора  $A_T$ ,  $B_T$  и  $C_T$  подключены согласно к фазам *A*, *B* и *C* ЛЭП. На второй и третьей ТП обмотка  $B_T$  трансформатора подключена соответственно к фазам *C* и *A* ЛЭП, т.е. на первых трех ТП схема подключения обмоток  $B_T$  к фазам ЛЭП составляет *BCA*. На последующих тяговых подстанциях ТП4, ТП5 и ТП6 схема подключения обмоток  $B_T$  трансформаторов к фазам ЛЭП обратная *ACB*, т.е. схема присоединения на подстанции ТП4 такая же, как на подстанции ТП3. Фидерные зоны подключены к одинаковым выводам вторичных обмоток трансформаторов.

Различные расстояния между подстанциями, профиль пути, изменение грузопотока не обеспечивают равенства мгновенных, даже средних значений токовых нагрузок тяговых подстанций при рациональном для симметрии нагрузок варианте, равном трем для одностороннего питания и шести — для двустороннего.

В выводах [66] указано, «что несимметрия напряжения определяется в большей степени падением напряжения в проводах линии передачи. ... Как бы не присоединяли подстанции к трехфазной линии, получить одинаковые потери напряжения во всех фазах не удастся, так как несимметричные нагрузки располагаются на различном расстоянии от источников питания». Кроме того, подстанции подсоединяются поочередно к различным фазам ЛЭП, «...что усиливает несимметрию нагрузки каждой отдельной линии и несимметрию расположения относительно питающих центров или опорных подстанций». А также «нагрузка тяговых подстанций непрерывно изменяется в большом диапазоне и практически никогда нагрузки отдельных подстанций не бывают равны друг другу». И что более важно: «описанные выше различные схемы питания электрифицированных участков, хотя и позволяют более равномерно загрузить линии передачи, но не решают всей проблемы несимметрии».

### **Установки продольной емкостной компенсации УПК**

Электроподвижной состав имеет нелинейную активно-индуктивную нагрузку и потребляет кроме активной реактивную мощность, вызывающую дополнительные потери электрической энергии и напряжения.

Для повышения качества электрической энергии, т.е. для компенсации потерь напряжения применяются установки емкостной компенсации реактивного сопротивления и реактивной мощности [67, 68]: продольной емкостной компенсации УПК; поперечной нерегулируемой емкостной компенсации на тяговых подстанциях и в тяговой сети; поперечной регулируемой емкостной компенсацией (фильтркомпенсирующая установка ФКУ).

При УПК статические конденсаторы включаются последовательно в цепь тягового тока (рис. 1.43). Основное назначение УПК – компенсировать индуктивное сопротивление линий и трансформаторов. При УПК чем больше ток нагрузки и чем больше потеря напряжения в сети, тем больше напряжение на конденсаторе, компенсирующее эту потерю напряжения, что ведет к повышению напряжения на токоприемнике электроподвижного состава, т.е. к повышению качества напряжения в тяговой сети. Однако при включении УПК в систему 25 кВ 50 Гц уменьшается сопротивление тяговой сети. Возрастают уравнивающие токи между двумя соседними тяговыми подстанциями при различных уровнях напряжения на шинах 27,5 кВ через тяговую сеть и провода ЛЭП. Для устранения транзита электрической энергии через тяговую сеть переходят на устройства разрыва контактной сети, что ведет к снижению эффекта повышения напряжения.

На железных дорогах России получило применение УПК на тяговых подстанциях с включением как в питающие фидера, так и в отсасывающий фидер.

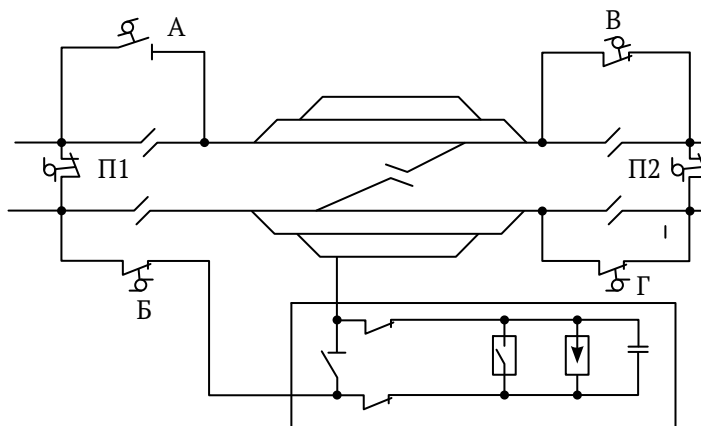


Рис. 1.43. Схема включения установки продольной компенсации на межподстанционной зоне

## Поперечная нерегулируемая емкостная компенсация

В установках поперечной компенсации конденсаторы включаются параллельно нагрузке, на тяговой подстанции — между питающим и отсасывающим фидерами (рис. 1.44), в тяговой сети — между элементом (устройством контактной сети) 27,5 кВ и рельсом/рельсами (рис. 1.45). Нерегулируемая поперечная компенсация позволяет в определенной мере компенсировать и повысить напряжение тяговых подстанций, поднять коэффициент мощности.

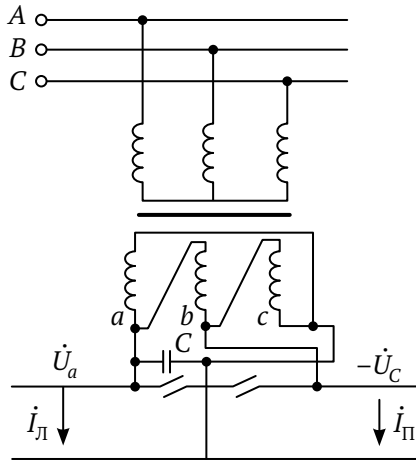


Рис. 1.44. Принципиальная схема установки поперечной нерегулируемой компенсации на тяговой подстанции

При сезонной неравномерности грузопотоков и изменении режима работы сетей внешнего электроснабжения железных дорог в отдельные периоды мощность нерегулируемой конденсаторной установки будет отличаться от рациональной расчетной, что ухудшает ее эффективность. Может изменяться и число работающих силовых трансформаторов.

Для повышения напряжения на токоприемнике электроподвижного состава кандидат технических наук Б. М. Бородулин [69] предложил размещать установки поперечной компенсации в тяговой сети (см. рис. 1.45). При этом могут быть уменьшены потери электрической энергии в тяговой сети и повышено напряжение. Исследованиями, проведенными ЦНИИ МПС (ВНИИЖТ) на одном участке Восточно-Сибирской ж.д., установлено, что 23 % времени напряжение на посту секционирования превышает максимально допустимое 29 кВ [70]. Для устранения этого положения мощность конденсаторной батареи установки необходимо снизить или

отключить батарею при повышении напряжения до 29 кВ, т.е. конденсаторная установка должна быть регулируемой. Другими недостатками включения конденсаторной установки на посту секционирования является то, что для отдельных тяговых подстанций нерегулируемая конденсаторная батарея установки окажется включенной на опережающую фазу, что приведет к увеличению несимметрии токов подстанции [71].

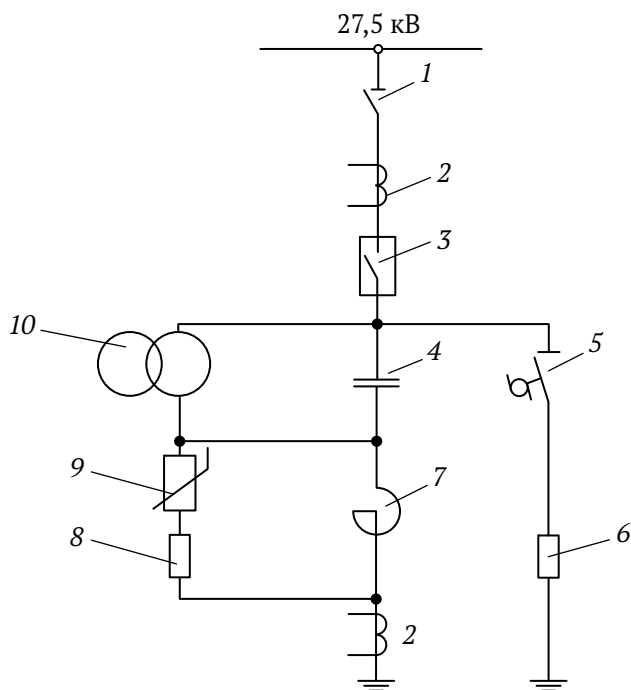


Рис. 1.45. Схема установки поперечной нерегулируемой компенсации с разрядным резистором:

- 1 — шинный разъединитель; 2 — трансформаторы тока; 3 — выключатель;  
 4 — конденсаторы; 5 — разъединитель с моторным приводом; 6 — разрядный резистор;  
 7 — реактор; 8 — резистор; 9 — ОПН; 10 — трансформатор напряжения

Таким образом, отмеченные недостатки поперечной нерегулируемой емкостной компенсирующей установки, включенной на нетяговых подстанциях или на тяговых, определяют необходимость введения в установку регулируемых конденсаторных батарей.

В ряде научно-исследовательских организаций проводились и ведутся работы по созданию симметрирующих и компенсирующих установок.

### Поперечные регулируемые фильтркомпенсирующие установки (ФКУ)

В [68] приведен значительный объем работ по теоретическому и практическому обоснованию необходимости включения регулируемых фильтркомпенсирующих установок (ФКУ) тягового электроснабжения железных дорог электрифицированных на переменном токе.

Принципиальная схема поперечного включения одноступенчатой ФКУ, приведенная на рис. 1.46, имеет одну фиксированную величину емкости  $C$ . Регулирование генерируемой реактивной мощности осуществляется дискретно — включением и выключением ФКУ с помощью выключателя  $Q1$ . Последовательно с конденсатором  $C$  включена индуктивность  $L$ , назначение которой для ограничения токов, протекающих через конденсатор. Для снижения коммутационных бросков тока и напряжения конденсатора последовательно с конденсатором включен резистор  $R$ , который затем через короткое время после включения ФКУ шунтируется выключателем  $Q2$ .

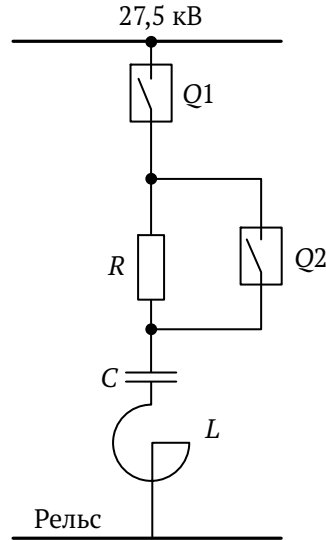


Рис. 1.46. Принципиальная схема ФКУ

Принципиальная схема установки многоступенчатой поперечной емкостной компенсации (рис. 1.47), состоящая из двух секций мощности 1 и 2 с конденсаторными батареями 8 и 13; переключателя 15, переключающего в бестоковую паузу и обеспечивающего последовательную или параллельную работу секций, совместно с выключателями 5, 6, 10, 11 формирует четыре ступени мощности ФКУ.

Установка продольной компенсации УПК компенсирует индуктивное сопротивление линий и трансформаторов, повышая напряжение на токоприемнике ЭПС при больших токах нагрузки и меньше повышая напряжение при малых токах нагрузки. Однако УПК не компенсируют реактивную мощность ЭПС и не подавляют высшие гармоники в контактной сети.

ФКУ компенсируют реактивную мощность и по утверждению [68] компенсируют «полностью», что подтверждается в *теоретическом плане*: «установки поперечной емкостной компенсации могут использоваться как фильтры высших гармоник и улучшать гармонический состав напряжения в контактной сети и в системе внешнего электроснабжения».

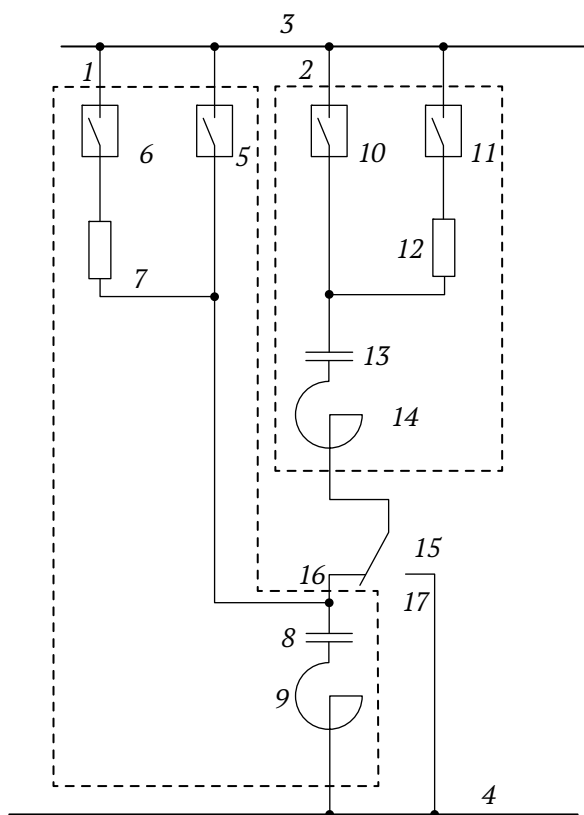


Рис. 1.47. Принципиальная схема многоступенчатой поперечной емкостной компенсации

Недостаток ФКУ: при больших нагрузках за счет уменьшения напряжения генерируемая мощность ФКУ уменьшается, и напряжение повышается в меньшей степени, чем при малых нагрузках, тогда как, наоборот, требуется больше повышать напряжение при больших нагрузках. Это можно исправить введением регулирования ФКУ.

#### **Активные варианты усиления однофазной системы тягового электроснабжения**

К активным вариантам усиления системы 25 кВ 50 Гц относятся: применение более мощных силовых трансформаторов; регулирование напряжения силовых трансформаторов под нагрузкой РПН (ступенчатое механическое; ступенчатое тиристорное); вольтодобавочные устройства ВДУ (вольтодобавочный трансформатор для ограничения уравнивающих токов и уменьшения потерь электрической энергии; вольтодобавочное



устройство УрГУПС; система электрификации железных дорог переменного тока с повышенным напряжением 94 кВ и симметрирующим эффектом; автотрансформаторная система тягового электроснабжения 2х25 В 50 Гц.

### Применение более мощных силовых трансформаторов

Направлено на повышение напряжения тяговой сети и на увеличение пропускной и провозной способности железнодорожных электрифицированных участков. Повышение единичной мощности трансформаторов (табл. 1.7) связано с повышением номинального тока трансформатора, благодаря чему снижаются удельные потери электрической энергии, ведущие к повышению КПД.

Таблица 1.7

#### Электрические характеристики силовых трехобмоточных трансформаторов электрифицированных железных дорог

Тип	$S_{1H}$ , МВ·А	Напряжение обмоток, кВ			Потери, кВт		$U_{кз}$ , % ВН-СН	$I_{хх}$ , %	РПН в ней- трали ВН, %	КПД, %
		ВН	СН	НН	Х.Х.	К.З.				
ТДТНЭ – 20000/110-Б	20,0	115	27,5	11,0	45	127	10,5	0,8	±8*2	98,9
ТДТНЭ – 25000/110-69	25,0	115	27,5	11,0	45	145	10,5	1,0	±9*1,78	99,0
ТДТНЭ – 40000/110	40,0	115	27,5	11,0	45	200	10,5	0,9	±9*1,78	99,19

Коэффициент полезного действия по [5]

$$\eta = 1 - \frac{P_{xx} + \beta^2 P_{кз}}{\beta S_{2H} \cdot \cos \varphi_2 + P_{xx} + \beta^2 P_{кз}}$$

где  $S_{2H} = S_1 H$ ;  $\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = 1$ ;  $\cos \varphi_2 = 0,83$  принят для инженерных расчетов [68] и  $\cos \varphi_2 = 0,8$  принят из расчетных записок трансформаторов [11–13] ПО «Уралэлектротяжмаш».

### Ступенчатое механическое РПН силовых трансформаторов

Все силовые трансформаторы на подстанциях переменного тока выпускаются с устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Регулирование осуществляют ступенчато без разрыва цепи тока

обмотки путем переключения под нагрузкой числа витков первичной обмотки трансформатора одновременно на всех трех фазах (см. раздел 1.1.2).

1. Применяются переключающие устройства следующих типов:

— РНТ-13–625/35 с установкой в отводы обмотки трансформатора с напряжением до 35 кВ включительно;

— РНТ-13–625/110 с установкой в нейтрали обмоток трансформатора, соединенных по схеме «звезда У» с напряжением 110 кВ;

— РНТВ-35/1000 при замене контакторов в РНТ-13 на вакуумные дугогасящие камеры ВДК.

2. Переключающие устройства с установкой в нейтрали первичной обмотки, соединенной по схеме «звезда У» и напряжениями:

— 110 кВ — РНТА-У-35/200–93У1;

— 35 кВ — РНТА-У-35/200-У1;

— 220 кВ — РНТА-У-35/300–96У1, где 200, 300 А — номинальный ток; У1 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150.

Для различных производств принят различный диапазон (глубина) регулирования. На электрифицированных железных дорогах постоянного тока диапазон составляет не более  $d = 0,2$  от напряжения холостого хода  $U_{d0} = 3500$  В, для дорог переменного тока диапазон регулирования РПН для применяемых силовых трансформаторов указан в табл. 1.7 и составляет от изменения номинального напряжения 16 %.

Глубина регулирования напряжения в электролизных производствах цветной металлургии и химической промышленности 80–85 % достигается различными известными способами и техническими устройствами [66].

Для расширения диапазона (глубины) регулирования РПН трансформаторов может быть применено пофазное регулирование напряжения [72], при котором при неравных числах витков фаз первичной обмотки и симметричном напряжении питающей сети в трансформаторе искажаются магнитные потоки, напряжения, токи по амплитуде и фазе. Несимметрия чисел витков характеризуется коэффициентом несимметрии  $K_H = \frac{w_\Phi}{w_\Theta}$ ,

где  $w_\Phi$  — число витков одной из фаз, отличающихся от равных между собой чисел витков двух других фаз, называемых базовыми —  $w_1$ . В симметричном положении  $K_H = 1$ , в несимметричных при  $w_\Phi > w_\Theta$   $K_H > 1$ , а при  $w_\Phi < w_\Theta$   $K_H < 1$ .

В схеме соединения первичной обмотки в треугольник появляются поток и ток нулевой последовательности, влияние которых может быть снижено встраиванием во вторичные обмотки индуктивных устройств

и выравниванием тепловых нагрузок. Для трансформаторов со схемой соединения первичной обмотки в треугольник допустим коэффициент несимметрии обмоток 0,9–1,1.

Регулирование напряжения РПН на тяговых подстанциях переменного тока имеет особенности, связанные с несимметрией напряжения по фазам. На одной из подстанций железной дороги [73] напряжение на отстающей фазе на 2–3 кВ меньше, чем на остальных и изменяется от 22 до 27 кВ. Включение автоматического регулирования напряжения АРПН несколько улучшило несимметрию напряжений, но не выше 0,5–1 кВ. Лучшие показатели обеспечиваются совместным применением АРПН с поперечной или продольной компенсацией. Однако на практике эффект симметрирования остается на низком уровне.

### **Ступенчатое тиристорное РПН силовых трансформаторов**

Основным недостатком переключающих РПН является состояние контактов и переключающих устройств и наличие механического переключателя и приводного механизма. Устранением указанных недостатков служат материалы патента на изобретение [74]. Трансформатор (рис. 1.48), содержащий последовательно соединенные к фазе питающего напряжения сетевую обмотку 6 и со стороны нейтрали регулировочную обмотку 7 с отводами, к которым подключены тиристорные ключи, образующие две группы. Четная группа объединяет через тиристорные ключи 8, 10 четные отводы 14, 16 регулировочной обмотки, а нечетная группа — нечетные отводы 15, 17, причем количество отводов четной и нечетной группы при многоступенчатом регулировании может быть увеличено. В схему введен дополнительный тиристорный ключ 20 с подключенным к нему параллельно неуправляемого реактора 22.

Начало дополнительного тиристорного ключа 20 соединено с тиристорными ключами 9, 11 нечетной группы отводов, а конец дополнительного ключа 20 — с тиристорными ключами 8, 10 четной группы отводов и с нейтралью трансформатора (общие для первичных обмоток точки 21 нейтрали).

Регулирование напряжения происходит в следующем порядке. Например, в исходном положении (рис. 1.48, а) открыты дополнительный тиристорный ключ 20 и ключ 11 отвода 17. Входное напряжение приложено к максимальному числу витков регулировочной обмотки 7 и сетевой обмотке 6. Напряжение на выходе трансформатора минимальное.

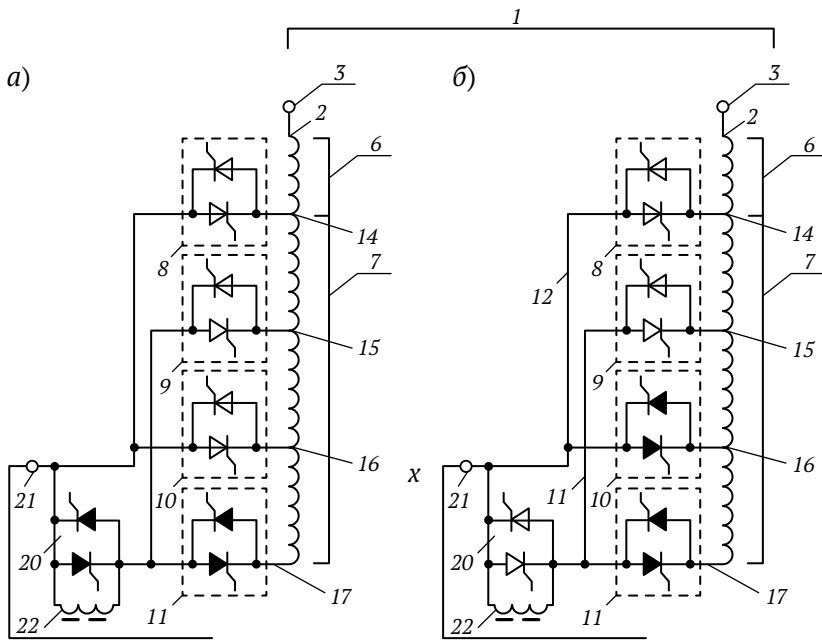


Рис. 1.48. Принципиальная электрическая схема многоступенчатого регулирования напряжения

Для повышения напряжения на выходе трансформатора необходимо последовательно закрыть дополнительный тиристорный ключ 20 (первичный ток трансформатора будет протекать кратковременно, пока не открыт тиристорный ключ 10, от отвода 17 через тиристорный ключ 11 и неуправляемый реактор 22), открыть тиристорный ключ 10. Следующий этап — закрыть тиристорный ключ 11. Ток первичной обмотки 2 будет протекать от отвода 16. Число витков регулировочной обмотки уменьшилось, напряжение на выходе трансформатора увеличилось.

При открытых тиристорных ключах 11 и 10 в контуре между отводами 16, 17 и неуправляемым реактором 22 будет протекать циркулирующий ток, ограниченный сопротивлениями витков ступени регулировочной обмотки и неуправляемым реактором:

$$I_{ц} = \frac{E_{w_{16-17}}}{Z_{w_{16-17}} + Z_{НР}}$$

Процесс понижения выходного напряжения трансформатора по сравнению с процессом повышения напряжения осуществляется в обратной

последовательности. Итак, в исходном положении: открыты дополнительный тиристорный ключ 20 и тиристорный ключ 19 отвода 15; закрыт тиристорный ключ 10 отвода 16. Необходимо закрыть дополнительный ключ 20 и открыть тиристорный ключ 10 отвода 16. В контуре между отводами 16 и 15 регулировочной части 7 первичной обмотки 2, открытым тиристорным ключом 9, неуправляемым реактором 22 и открытым тиристорным ключом 10 протекает циркулирующий ток, ограниченный сопротивлениями витков между отводами 15, 16 ступени регулировочной обмотки и неуправляемым реактором. Следующим этапом необходимо закрыть тиристорный ключ 9.

Как при повышении, так и при понижении напряжения процесс переключения тиристорными ключами отводов регулировочной части первичной обмотки трансформатора происходит без разрыва протекания первичного тока трансформатора за счет одновременного открытого состояния двух тиристорных ключей в отводах одной ступени регулировочной обмотки, одного тиристорного ключа, выходящего из работы, и другого — вступающего в работу. Возникающий в процессе повышения или понижения напряжения циркулирующий ток ограничен в основном сопротивлением нерегулируемого реактора 20. Кроме того, наличие нерегулируемого реактора упрощает схему управления тиристорными ключами. Тиристорное переключающее устройство может быть применено в силовых трансформаторах тяговых подстанций электрифицированных железных дорог и в трансформаторах электролизного производства.

### **Вольтодобавочные устройства ВДУ системы электроснабжения переменного тока**

Вольтодобавочный трансформатор для ограничения уравнильных токов и уменьшения потерь электрической энергии в тяговых сетях переменного тока рассмотрен в работах [75–78].

Напряжения на шинах соседних тяговых подстанций практически всегда различаются по величине и фазе [75]. По фидерной зоне протекает уравнильный ток, который вызывает дополнительные потери электрической энергии, произвольно загружает тяговую сеть и тяговые трансформаторы. Для выравнивания на концах участка тяговой сети по модулю и фазе с целью ограничения уравнильного тока и уменьшения потерь электроэнергии можно устанавливать вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ), в качестве которых целесообразно применять трансформаторы типа ОРМЖ-10000/27 [76].

В качестве вольтодобавочной следует использовать обмотку низшего напряжения (с изоляцией относительно земли 27,5 кВ), включенную в рассечку отстающей фазы и имеющую рабочие ответвления на 1,25; 2,5; 3,75 и 5,0 кВ. Обмотка высшего напряжения с  $U_{\text{ном}} = 27,5$  кВ может быть подключена параллельно опережающей фазе тяговой обмотки, что позволяет получать напряжения со сдвигом по фазе 0,  $\pm 60$ ,  $\pm 120$  и  $180^\circ$  эл. Наибольший интерес представляет получение напряжения вольтодобавки со сдвигом по фазе 0 и  $\pm 60^\circ$  эл. Вопросы выбора ответвлений вольтодобавочной обмотки и схем подключения первичной обмотки ВДТ рассмотрены в [77].

С помощью ВДТ можно добиться существенного уменьшения потерь электрической энергии в тяговой сети, вызываемых протеканием уравнительного тока [78].

Особый интерес представляет применение ВДТ для уменьшения потерь энергии от уравнительных токов в тех случаях, когда напряжения на шинах соседних тяговых подстанций сдвинуты относительно друга по фазе. При этом ВДТ в настоящее время является средством, пригодным для существенного ограничения уравнительного тока и уменьшения вызываемых им потерь энергии в тяговой сети.

Для усиления системы 25 кВ 50 Гц и для симметрирования нагрузки силового трансформатора УрГУПСом предложено (рис. 1.49) вольтодобавочное устройство ВДУ [79] с однофазным вольтодобавочным трансформатором ВДТ, первичная обмотка которого подключена к загруженной на 33 % мощности тяговой обмотки силового трансформатора, а каждая из двух однофазных вторичных обмоток включается в рассечки выводов силового трансформатора к шинам 27,5 кВ тяговой подстанции и имеет устройство регулирования напряжения, обеспечивающее равенство напряжения соответствующих фаз шин 27,5 кВ соседних тяговых подстанций, что ведет дополнительно к снижению уравнительных токов в системе тяговой и питающей сетей.

МИИТом совместно с ВНИИЖТом и Росэнерготрансом предложена работа [80] по применению двух трансформаторных приставок ТПР к силовому трансформатору, которые первичными обмотками, соединенными по схеме открытого треугольника, подключаются к тяговой обмотке силового трансформатора тяговой подстанции, а вторичными обмотками, соединенными по схеме неполной звезды, включаются в рассечки выводов силового трансформатора к шинам 27,5 кВ тяговой подстанции. Применение двух трансформаторных приставок ТПР направлено

на увеличение на 33 % используемой мощности силового трансформатора с учетом симметрирующего эффекта, заключающегося в том, что с помощью трансформаторных приставок ТПР обеспечивается формирование напряжения левого и правого плеч питания фидеров контактной сети на тяговых подстанциях, сдвинутых относительно друг друга на 90 градусов. При равной нагрузке плеч питания трансформатор тяговой подстанции распределяет двухплечевую нагрузку симметрично по трем фазам, снижая угол между напряжением и током отстающей фазы с 56–57 до 36–37 градусов, что при одинаковых токах плеч около 1000 А увеличивает напряжение отстающей фазы на 2700–3000 В. Эффект симметрирования снижается при неравенстве токов в плечах питания, особенно при отсутствии тока в одном из плеч.

Мощность двух приставок ТПР к силовому трансформатору ТДЦНЖСМ-60000/110 УХЛ1 составляет 12 МВА.

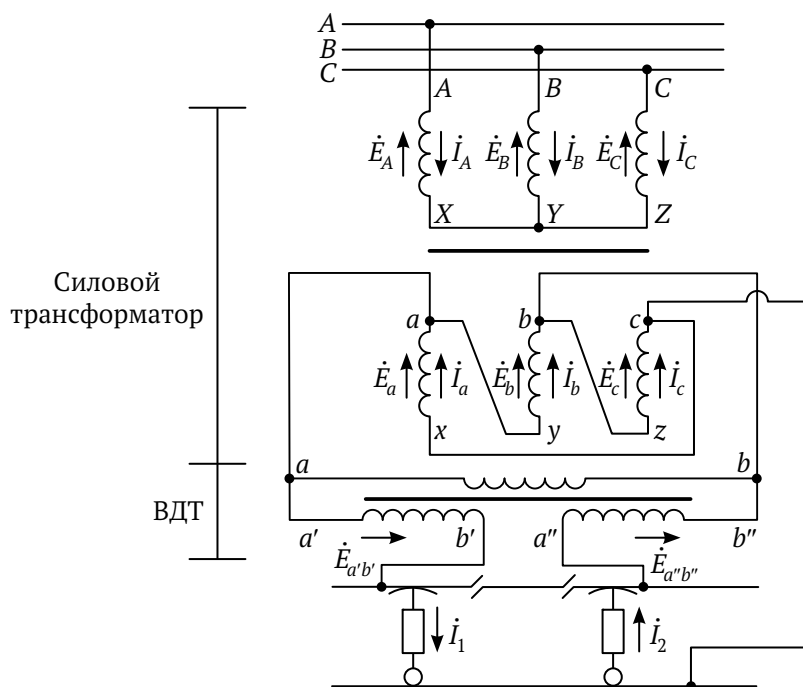


Рис. 1.49. Схема питания тяговой сети однофазного тока от трехфазного трансформатора с ВДТ

## Система электрификации железных дорог переменного тока с повышенным напряжением 94 кВ и симметрирующим эффектом

Система (рис. 1.50) содержит головные трансформаторные тяговые подстанции с расстоянием между ними 250–350 км и промежуточные однотрансформаторные подстанции с однофазным трансформатором, работающие между головными подстанциями параллельно без нейтральных вставок [81, 82]. Однофазные трансформаторы не обладают симметрирующим эффектом и подключены к напряжению  $66,4 + 27,5 = 93,9$  кВ и так же, как и показанные пунктирной линией на рис. 1.50 провода, и, соответственно, коммутирующее оборудование, рассчитаны на напряжение 110 кВ. В контактную сеть подается напряжение 27,5 кВ, образуя распределенное питание.

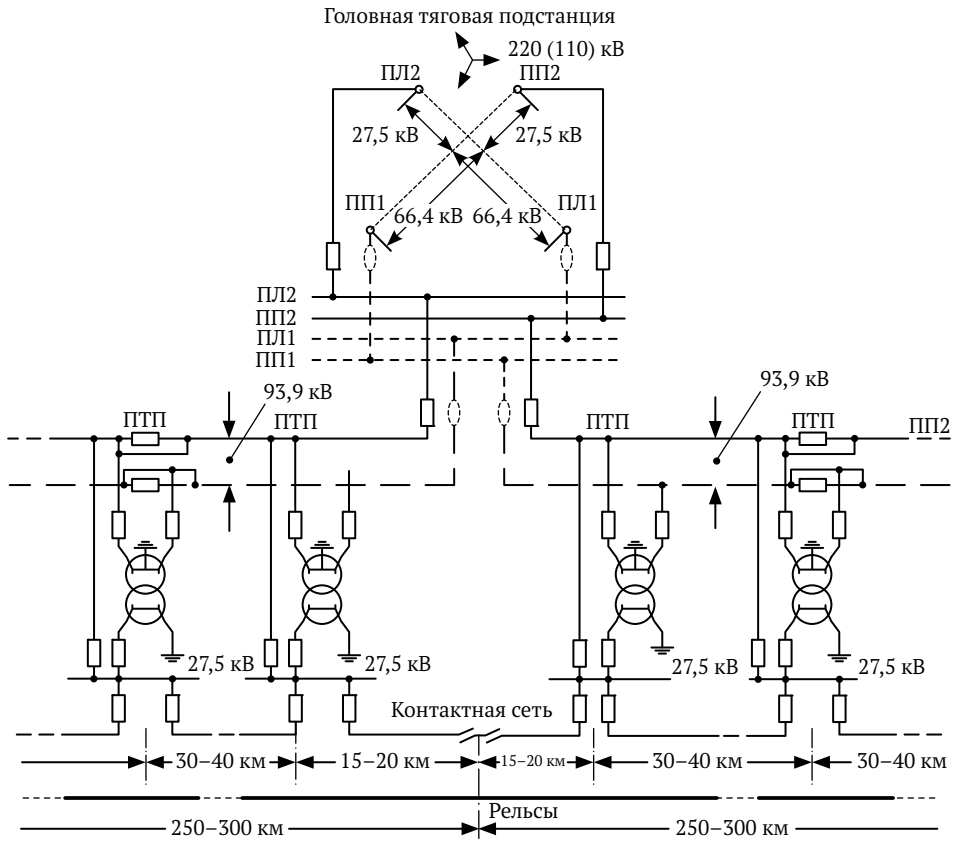


Рис. 1.50. Схема системы электроснабжения промежуточных тяговых подстанций от головной подстанции



На головных тяговых подстанциях установлены трансформаторы с симметрирующим эффектом. Согласование симметрирующего трансформатора по напряжению 27,5 кВ с существующим на подстанции трансформатором без симметрирующего эффекта может быть выполнено с помощью приставки мощностью до 10 МВт к существующему на подстанции трансформатору.

Система при практической реализации обеспечивала бы:

- минимизацию выходов тяговых подстанций на питающую сеть общего назначения;
- возможность параллельной работы всех промежуточных одноагрегатных однофазных тяговых подстанций;
- улучшение симметрирования тяговой нагрузки на головных подстанциях.

#### **Автотрансформаторная система тягового электроснабжения — система 2×25 кВ 50 Гц**

При этой системе на тяговых подстанциях с помощью специальных автотрансформаторов создается трехпроводная схема системы питания с двумя одинаковыми значениями напряжений [1, 66]. Одно из них, равное напряжению холостого хода  $U_{\text{тп}} = 27,5$  кВ, подается на систему шин питания *контактная сеть — рельс*, а второе  $U_{\text{тп}} = 27,5$  кВ — на систему шин питания *рельс — питающий провод*, подвешиваемый на опорах контактной сети (рис. 1.51). Между тяговыми подстанциями на небольшом расстоянии друг от друга (8–15 км) располагаются автотрансформаторы АТ1, АТ2, АТ3.

Напряжение между шинами на ТП равно 55 кВ, а между контактной сетью и питающим проводом на зоне между АТ1 и АТ3 — 50 кВ. Если электровоз находится между первым АТ1 и вторым АТ2 автотрансформаторами, то он получает питание от вторичных обмоток этих трансформаторов, т.е. как и на обычной линии однофазного тока напряжением 25 кВ. При этом на участке от ТП1 до АТ1 в рельсах ток практически отсутствует (имеется незначительная часть нагрузки, получаемой электровозом по сети *контактный провод — рельс*. Учитывая, что первичные обмотки автотрансформаторов питаются по сети *контактная сеть — питающий провод* с суммарным напряжением 50 кВ, это приводит к уменьшению потерь напряжения и электрической энергии.

В одинаковых условиях электропотребления и расположения подстанций токовая нагрузка контактной сети уменьшается в 1,6–1,8 раз, а потери энергии в системе — в 2,0–2,4 раза по сравнению с потерями в обычной системе 25 кВ 50 Гц.

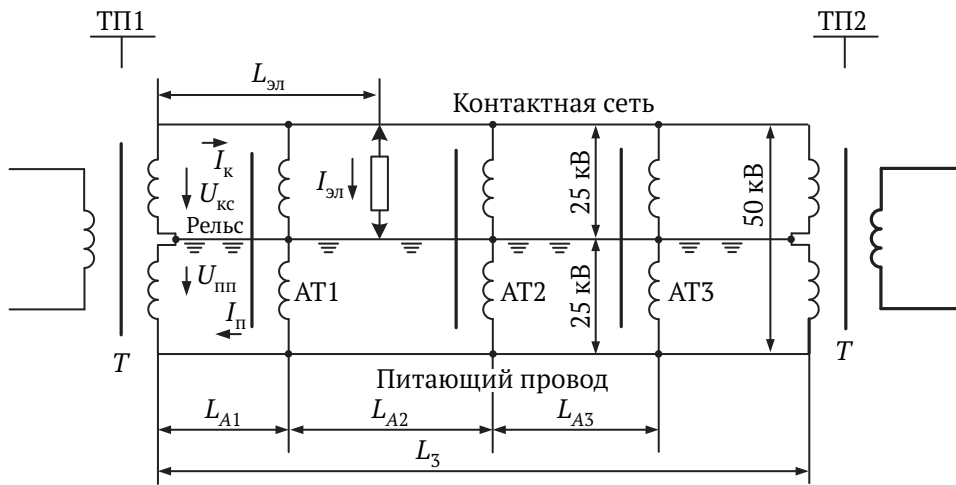


Рис. 1.51. Трехпроводная автотрансформаторная схема питания системы однофазного тока

### Системы электрической тяги переменного тока с повышенным напряжением в контактной сети 50 кВ

Системы электрической тяги с повышенным до 50 кВ напряжением в контактной сети реализованы в ЮАР, Канаде и США [1] при перевозке больших объемов однородного грунта (руда, уголь) от места добычи к потребителю по однопутным линиям со значительным перепадом высоты, по замкнутому маршруту с использованием специально разработанных электровозов. В России были разработаны требования к подобному горному электровозу, но из-за унификации локомотивов для всех условий железных дорог страны не были реализованы.

Применение электротяги с напряжением в контактной сети 50 кВ (зарубежный применяемый аналог) обеспечивает увеличение провозной способности, а при применении подсистем  $2 \times 50$  кВ или  $100-50$  кВ снимаются ограничения по пропускной способности, и создается возможность увеличения межподстанционных зон до 150–200 км.

Однако повышение напряжения в контактной сети выше 50 кВ ограничивается условиями электромагнитной безопасности, при которой предельно допустимое значение напряженности  $E$  воздействующего электрического поля частоты 50 Гц устанавливается выше 25 кВ/м [1] — при напряженности свыше 20 до 25 кВ/м допустимое время пребывания в электрическом поле без применения средств защиты составляет 10 мин [СанПин 2.2.4.1191–03]. Если  $E > 25$  кВ/м, то недопустимо находиться в такой зоне без индивидуальной защиты.

### **1.3. ОСНОВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Повышение мощности с одновременным повышением энергетической эффективности системы тягового электроснабжения связано с необходимостью передачи электрической энергии требуемой мощности скоростным пассажирским поездам и тяжеловесным грузовым поездам при обеспечении пропускной и провозной способности участков железных дорог, в том числе и с существующим объемом перевозок. Повысить энергетическое состояние системы тягового электроснабжения необходимо и в случае введения высокоскоростного движения (300–350 км/ч), так как электропотребление таких поездов близко к электропотреблению тяжеловесных поездов.

Минимизация расхода электрической энергии на тягу, т.е. повышение «энергетической эффективности систем тягового электроснабжения, как ... и энергосистем общего назначения (ЛЭП 35, 110, 220, 330, 750, 1150 и 1500 кВ), всегда было связано с повышением напряжения передачи электроэнергии к потребителю» [1].

На рис. 1.52 представлены мероприятия повышения напряжения в контактной сети, соответственно и на ЭПС на участках постоянного и переменного токов. Кроме того, для повышения энергоэффективности электрической тяги вводится ранее известная, но вновь разрабатываемая на базе современных научных достижений и технических устройств трехфазная система электрической тяги для участков переменного тока.

### **1.4. ОЦЕНКА ДЕЙСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО 3,0 КВ И ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА 25 КВ 50 ГЦ**

Для постановки реальной и выполнимой задачи при разработке трехфазной системы тягового электроснабжения необходима характеристика действующих систем электрической тяги постоянного тока 3,0 кВ и однофазного переменного тока 25 кВ 50 Гц, как опубликовано официальной информацией, по внутрисистемным показателям системы электроснабжения и электроподвижного состава, таких как расход на тягу и потери электрической энергии.

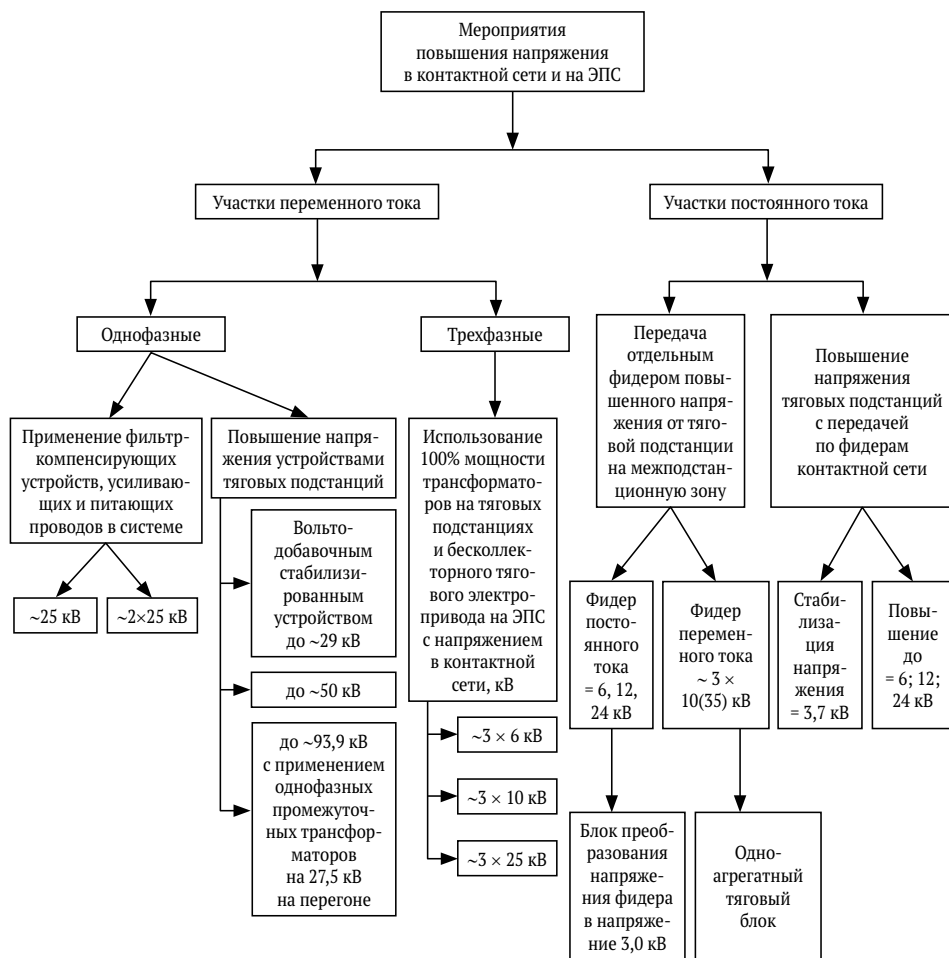


Рис. 1.52. Варианты повышения напряжения в системах тягового электроснабжения постоянного и переменного токов

В научно-техническом издании ВНИИЖТа [1] доктором технических наук А. В. Котельниковым приведена информация о том, что опыт применения в России систем электрической тяги постоянного и переменного тока показал преимущественное использование системы однофазного переменного тока напряжением 25 кВ 50 Гц.

Так, капитальные затраты [1] на электрификацию при переменном токе на 15–18 % ниже, чем на постоянном; снижается в 2–3 раза число тяговых подстанций; экономия меди при более легкой контактной подвеске составляет более 2 т на 1 км; снимается проблема износа контактных проводов и их периодической замены; исключается электрокоррозия опор контактной

сети и подземных металлических сооружений. Электрифицированные участки переменного тока имеют меньшие на 5–6 % суммарные потери ЭЭ на тягу. При равных объемах перевозочной работы на участках переменного тока требуется на 15–20 % меньше электровозов и локомотивных бригад. Снижается повреждаемость устройств электроснабжения и электровозов с асинхронным бесколлекторным приводом. Себестоимость перевозок на участках переменного тока на 20 % меньше, чем на участках постоянного тока.

В другом издании [83] приведена информация с сокращениями. «Официальные цифры на 80-е годы показывали, что на участках переменного тока удельный расход на 6–15 процентов выше (не по показаниям счетчиков машин, а именно по ТП)... Общеизвестно и занесено в учебники со схемами и графиками потребления электроэнергии, что расход электроэнергии на постоянном токе ВСЕГДА меньше при равных условиях... Что касается цифр, то даже группа безумных сторонников переменки во ВНИИЖТе... вынуждена была признать, как минимум, шестипроцентный перерасход электроэнергии на единицу работы на переменном токе... Реальные цифры в зависимости от конкретных условий составляют 10–15 процентов. Что и подтвердил недавний перевод участка Лоухи — Мурманск на переменку... Расход электроэнергии у электровозов переменного тока существенно выше, но у них выше скорость, что дает несравнимое преимущество». Таким образом, из [83] следует, что смысл электрификации участков на переменном токе состоит «в увеличении скорости и не только — мощность 4-осного переменника такая же, как у 6-осного постоянного».

Доктор технических наук А. С. Курбасов в 1988 г. [60] отмечает, что «опыт эксплуатации системы электрической тяги с напряжением контактной сети 3 кВ... выявил определенные преимущества перед электрической тягой переменного тока 25 кВ, в частности по расходу электроэнергии, капитальным и эксплуатационным затратам», что противоречит выводам [1] и согласуется по расходу электроэнергии с заключением в [77].

В работах [60, 61] А. С. Курбасова «показаны главные преимущества тяговых асинхронных двигателей». Асинхронные двигатели могут развивать большие скорости движения, чем коллекторные постоянного тока, и «для коллекторных тяговых двигателей предел мощности по надежности составляет 750–800 кВт; при асинхронном тяговом двигателе в тех же габаритах (и даже меньших) реализуется мощность 1200–1400 кВт».

В [61] также говорится, что «опыт создания электровозов с асинхронным приводом в основном относится к системе переменного тока в контактной сети».

Из приведенных достоинств и недостатков двух систем тяги на постоянном и переменном токе на существующем этапе и на возможном их дальнейшем развитии следует, что:

- системы тяги постоянного тока имеют ограничения по мощности, скоростям движения, по пропускной способности и имеют повышенный расход электрической энергии и себестоимость перевозок;

- применение системы тяги однофазного переменного тока обеспечивает повышение провозной способности, но система переменного тока 25 кВ 50 Гц, повышая эффективность работы участков, обладает, в свою очередь, рядом приведенных существенных недостатков.

К числу недостатков системы 25 кВ 50 Гц, отмеченных доктором технических наук, профессором Р. Р. Мамошиным [80], относятся:

- несимметричность однофазной нагрузки, подключаемой к симметричной системе внешнего питающего электроснабжения, ведет к ухудшению качества электрической энергии и увеличению потерь в питающей сети, а также к увеличению потерь в силовых трансформаторах подстанций на 25–100 %;

- мощность силовых трансформаторов тяговых подстанций используется на 67 %;

- вынужденно применяются схемы неодинакового присоединения подстанций к фазам сетей внешнего напряжения — схемы «винта», направленной на симметрирование нагрузок тяги в этих сетях; схема «винта» малоэффективна и вынуждает сооружать на каждой подстанции нейтральные вставки;

- плохо используются мощности тяговых подстанций, что ведет к завышению установленной мощности подстанций на 15–20 %;

- неодинаковы углы сдвига между векторами токов и напряжений фаз трансформатора, что вызывает повышенные потери напряжения на этих фазах, в тяговой сети и, соответственно, снижение скорости движения поездов, практически линейно зависящей от уровня напряжения на токоприемниках;

- необходимость усиливать контактную сеть на грузонапряженных участках с помощью усиливающих и экранирующих проводов;

- наличие уравнивающих токов в тяговых сетях межподстанционной зоны (вызываемых неравенством напряжений на вводах

(«и на выводах») тяговых подстанций, питающих межподстанционные зоны), ведет к дополнительным потерям энергии, завышая данные расхода электроэнергии.

Кроме указанных основных недостатков однофазной системы переменного тока 25 кВ 50 Гц, проблемными вопросами при дальнейшем повышении напряжения остаются обеспечение электромагнитной совместимости и соблюдение электромагнитной безопасности персонала железных дорог, пассажиров и населения.

Существующая система электрической тяги 25 кВ 50 Гц и ее вариант 2×25 кВ 50 Гц с введением устройств усиления может на современном этапе и удовлетворить достаточно большие объемы перевозок, но не всегда в состоянии обеспечить передачу требуемой мощности для поездов повышенной массы и высокоскоростных поездов. Поэтому необходимо оценить и найти новые решения дальнейшего повышения технико-энергетической эффективности системы электрической тяги переменного тока.

Если для тяжеловесного и высокоскоростного движения явно определяется тип двигателя — асинхронный с переменным током в контактной сети, то остается пока неразрешенным вопрос выбора системы переменного тока: однофазная или трехфазная система.

Как известно, трехфазная система по уровню применения в промышленности и в других отраслях хозяйственной деятельности и по законам электротехники обладает наилучшими показателями по сравнению с однофазной системой переменного тока.

Внедрение простой и наиболее эффективной трехфазной системы электрической тяги отвечает требованию грузового, в том числе и тяжеловесного движения при освоении месторождений сибирского и восточного регионов России.

## **1.5. ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ**

Увеличение энергетической эффективности систем электрической тяги связано с повышением напряжения передачи электрической энергии электроподвижному составу. Повышение массы, скорости и интенсивности движения поездов вынудили перейти в традиционных системах электрической тяги от систем постоянного тока 1,5 кВ; 3,0 кВ к системам переменного тока 16 кВ 16  $\frac{2}{3}$  Гц; 25 кВ 50 Гц и 2×25 кВ 50 Гц.

За период эксплуатации системы прошли значительные этапы процесса модернизации и усиления. Не останавливаясь на системе постоянного тока 3,0 кВ и на неосуществляемой системе постоянного тока повышенного напряжения 6, 12, 24 кВ, система переменного тока 25 кВ 50 Гц, обладая повышенным напряжением передачи энергии, потребовала усиления по напряжению введением усиливающих и экранирующих проводов, схем продольной и поперечной, в том числе и регулируемых фильтрокомпенсирующих устройств компенсации реактивных индуктивных сопротивлений линий и реактивной энергии электроподвижного состава. Уменьшение сопротивления тяговой сети влечет возрастание уравнивающих токов и транзита электрической энергии, в том числе и между энергосистемами. Для устранения транзита вводится одностороннее питание (на примере Челябинской и Оренбургской энергосистем, где введен раздел питания по контактной сети постом секционирования на 228 км между тяговыми подстанциями Бреды — Айдерля).

Другая проблема системы переменного тока 25 кВ 50 Гц — это симметрирование нагрузки фаз питающей энергосистемы. Применяемые варианты схем подключения к питающей продольной ЛЭП фаз силовых трансформаторов на тяговых подстанциях хотя и позволяют более равномерно загрузить линии электропередачи, но не решают проблему симметрирования. Это связано с тем, «что нагрузка тяговых подстанций, подключенных к линии питания, непрерывно изменяется в большом диапазоне и никогда нагрузки отдельных подстанций не бывают равны друг другу» [66].

Введение в системе 25 кВ 50 Гц устройства регулирования напряжения под нагрузкой РПН трансформаторов, вольтодобавочных устройств направлено на повышение напряжения симметрирующего трансформатора ТДЦНЖСМ — 60000/110 УХЛ1. Разработка на его базе системы электрификации железных дорог переменного тока ДПЛ-94 с повышенным напряжением 94 кВ и симметрирующим эффектом направлена, кроме повышения напряжения, и на симметрирование нагрузки.

Симметрирование нагрузки возникает при равной нагрузке плеч питания тяговой подстанции. Симметрирующий трансформатор ТДЦНЖСМ — 60000/110 УХЛ1, как автономный потребитель, распределяет двухплечевую нагрузку симметрично по всем фазам. Но нагрузка никогда или редко бывает одинаковой, откуда следует, что система 94 кВ обладает ограниченным симметрированием.



# ИСТОРИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СХЕМ И УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

## 2.1. ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЯГИ

Первые эксперименты использования электрической энергии как средства тяги проводились до середины XIX в. [2].

В первых электрических локомотивах применялись двигатели постоянного тока, для питания которых в корпусе локомотива устанавливались гальванические батарейные элементы, а затем и аккумуляторы.

В 1834 г. Томас Дэвенпорт (штат Вермонт, Америка) в построенной круговой модели железной дороги использовал электрические локомотивы с гальваническими элементами (с батарейным питанием). Роберт Дэвидсон (Шотландия) в 1837 году [2] создал электрический локомотив с использованием батарей. Позже Дэвидсон построил более крупный локомотив, по имени Гальвани, и выставил на Королевской шотландской выставке искусств в 1841 г. В 1842 г. Дэвидсон запустил локомотив по железной дороге Эдинбург – Глазго, двигавшийся со скоростью 4 мили в час.

В последующем питание двигателей локомотивов было осуществлено от источников внешнего электропитания.

Первый электрический пассажирский поезд был представлен Вернером Сименсом в Берлине в 1879 г. Поезд, состоящий из локомотива и трех вагонов (автомобилей), достигал скорости 13 км/ч. Двигатель локомотива мощностью 2,2 кВт получал питание от генератора через третий изолированный рельс, расположенный между рельсами.

В 1880 г. Томас Эдисон [2, 84] построил в Америке небольшую железную дорогу с использованием динамо в качестве двигателя и с передачей электрической энергии по рельсам, используя их в качестве токопроводящей среды через металлический обод колес и металлические щетки к двигателю.

В 1881 г. первый трамвай с воздушными линиями [2] был представлен Сименсом на Международной электротехнической выставке в Париже. С октября 1883 г. на трассе Модлинг и Хинтербурул в Австрии началось первое постоянное трамвайное движение с воздушными линиями, состоящими из двух  $U$ -труб, в которых «бежали» токоприемники. В 1882 г. Сименс проверил такую систему токосъема, предшественницы токосъема троллейбусов.

Более простым и более совершенным оказался воздушный провод в сочетании с токоприемником (пантографом), прижатый к проводу снизу и перевозимым на транспортном экипаже. Такая система для железнодорожного движения была изобретена Фрэнком Дж. Спрэггом в 1888 году [2] и с 1889 г. использовалась на железнодорожной ветке Ричмонда, штат Вирджиния, что и стало признанием начала всемирного использования электрической тяги.

В первой системе электрической тяги постоянного тока с воздушной линией применялось относительно низкое напряжение — до 750 В [2].

Возрастающая необходимость увеличения мощности электрических локомотивов при низком напряжении привела к значительному увеличению тока двигателей локомотива, что, в свою очередь, естественно, вызвало увеличение потерь электрической энергии в двигателях локомотива и в питающих проводах. Для снижения потерь электрической энергии в питающих проводах увеличили сечение этих проводов и уменьшили расстояние между пунктами питания, что привело к увеличению количества преобразовательных пунктов питания (тяговых подстанций).

Другой путь увеличения мощности локомотива мог быть осуществлен за счет повышения напряжения в питающих проводах, т.е. на локомотивах. Однако этот путь в системе постоянного тока был связан со сложностью снижения напряжения на двигателе до уровня напряжения, ограниченного конструкцией и изоляцией в коллекторном узле (габаритом в пределах колесной тележки).

После этого была предложена замена системы электрической тяги постоянного тока на систему электрической тяги переменного тока [84].

Основными направлениями развития электрической тяги переменного тока были разработка тягового электродвигателя и выбор системы тягового электроснабжения.

## 2.2. СОСТОЯНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В существующей системе тягового электроснабжения использовался электрический двигатель постоянного тока, который был конструктивно доработан. Его электромеханические характеристики достаточно простыми средствами позволяют регулировать скорость и вращающий момент в широких пределах. Такой двигатель хорошо подходил для целей электрической тяги. Однако низкое напряжение двигателя постоянного тока с коллекторным узлом ограничено (отмечено ранее) габаритными размерами тележки колесной пары и отсутствием надежной межламельной изоляции в коллекторе и внутриобмоточной изоляции. Повышение напряжения в контактной сети потребовало бы установку на локомотиве дополнительного сложного с низким КПД силового оборудования — электромеханического преобразователя.

Тяговый электрический двигатель переменного тока допускает использовать сравнительно высокое напряжение в контактной сети, но с установкой на локомотиве простейшего, надежного в работе, с высоким КПД понижающего трансформатора. Введение высокого напряжения переменного тока уменьшает потери электрической энергии в контактной сети и повышает передачу электрической мощности локомотиву.

При разработке двигателя переменного тока возникла проблема выбора типа двигателя одно-, двух- или трехфазного. В случае принятия однофазного двигателя, он представлял бы аналог двигателя постоянного тока — коллекторный двигатель переменного тока с ненужными проблемами коммутации коллекторного узла — и получивший вначале сравнительно малое распространение в промышленности и не принятый для электрической тяги.

В 1888 г. опубликованы работы Г. Феррариса и Н. Тесла [5], устанавливающие «возможность получения вращающего магнитного поля при помощи двухфазного тока и построения на этом принципе двигателя переменного тока», представляющего однофазный асинхронный двигатель, который был отменен «вследствие снижения пускового момента и низкого коэффициента мощности» [84].

Весной 1889 г. выдающийся русский инженер-электротехник М. О. Доливо-Добровольский<sup>3</sup>, работавший в тот период в Германии, предложил трехфазную систему переменных токов. Он построил первый трехфазный двигатель (рис. 2.1) и первый трехфазный трансформатор (рис. 2.2). Двигатель обладал повышенным пусковым моментом и был принят для нужд электрической тяги и промышленности.

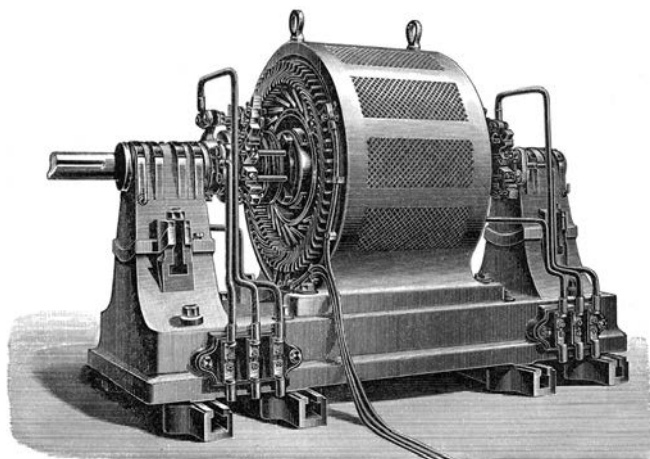


Рис. 2.1. Трехфазный асинхронный двигатель М. О. Доливо-Добровольского

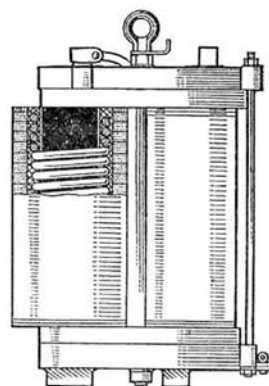


Рис. 2.2. Трехфазный трансформатор для Лауффенской электростанции

Система трехфазного тока была [5] применена в сооружении первой опытной высоковольтной электропередачи трехфазного тока между гидроэлектростанцией в Лауффене-ам-Неккар и Франкфурте-на-Майне, протяженностью 175 км. В Лауффене гидротурбина приводила во вращение генератор трехфазного тока, построенный швейцарской фирмой Эрликон по проекту инженера Ч. Брауна, мощностью 230 кВ·А, напряжением 95 В. При помощи трехфазного трансформатора фазное напряжение в Лауффене повышалось до 15000 В и понижалось во Франкфурте-на-Майне до значения 65 В для питания трехфазного двигателя насосной установки мощностью 75 кВт. Трехфазный трансформатор и трехфазный асинхронный двигатель были построены немецкой фирмой АЕГ по проектам М. О. Доливо-Добровольского.

<sup>3</sup>Михаил Осипович Доливо-Добровольский (1862-1919) родился в русской семье, эмигрировавшей в Германию в 1883 г. после преследований, последовавших после убийства Александра II; учился в Дармштатском техническом университете; его деятельность почти неразрывно будет связана с фирмой АЕГ, первоначально филиалом компании «Generale Electric», генеральным директором он стал в 1887 г.

## 2.3. НАЧАЛЬНЫЕ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ТРЕХФАЗНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В системе тягового электроснабжения первоначально были испытаны два варианта экспериментальной трехфазной системы — один с двумя воздушными линиями электроснабжения (две фазы) и тягового рельса в качестве третьей фазы (трехфазная ДВЛР) и другой вариант с тремя воздушными линиями (трехфазная ТВЛ).

Первый вариант — трехфазная ДВЛР был впервые опробован для электрической тяги электрического вагона в конце 1880 — начале 1890-х гг. компанией «Сименс и Хальске» [86]. Компания в 1892 г. построила на своем заводе Вернерверк в Берлине испытательный полигон с длиной пути 360 м. Токопроводящая цепь от источника трехфазного тока до электрического вагона состояла из двух воздушных линий и рельса.

Вернер фон Сименс в 1892 г. конструирует трехфазный двигатель, имеющий восемь полюсов мощностью 35 кВт с повышенным КПД, устанавливает его на небольшом локомотиве с двумя осями. На платформе локомотива были установлены два токоприемника, регулирующие резисторы и коммутирующая аппаратура. На испытательном полигоне электрический вагон достиг скорости 25 км/ч. В 1893 г. компания «Сименс и Хальске» выставила электрический вагон на Всемирной выставке в Чикаго и продемонстрировала практическую способность электрической тяги для железных дорог.

Второй вариант — трехфазная ТВЛ. Компания «Сименс и Хальске» заинтересована в использовании трехфазного асинхронного двигателя для электрической тяги с питанием по трем воздушным линиям (без питания по тяговому рельсу), с высоким напряжением 10000 В и проверкой качества работы токоприемников при отборе мощности при высокой скорости движения 60 км/ч, а также с целью доказательства пригодности [86] системы трехфазного тока и электрооборудования для использования на больших расстояниях. Компанией «Сименс и Хальске» между Lichterfelde и Zehlendorf в начале 1899 г. был построен трехфазный испытательный полигон протяженностью 1,8 км со скоростью движения 60 км/ч и напряжением до 10000 В.

Компания выпустила две тележки: одна представляла локомотив, другая — грузовик-трансформатор. На крыше тележки с трансформатором

располагался токоприемник с тремя бугелями, контакты которого скользили сверху по проводам трех воздушных линий, расположенных параллельно в наклонной плоскости под углом  $45^\circ$ . Напряжение 10000 В трансформатором понижалось до 750 В. Испытания показали, что с увеличением скорости более 60 км/ч бугели токоприемников с поверхностями контакта «прыгали, вызывая искрение и небезопасный контакт» [86].

В 1900 году проведена [86] реконструкция воздушных линий и трех токоприемников на крыше вагона (рис. 2.3). Трансформатор разместили в вагоне. Токоприемники реконструированы для обеспечения бокового отбора электрической мощности от трех воздушных линий, расположенных в вертикальной плоскости, к которым полозы токоприемников прижимались силою пружин. Испытания показали, что токоприемник оказался устойчивым даже при высоких скоростях.

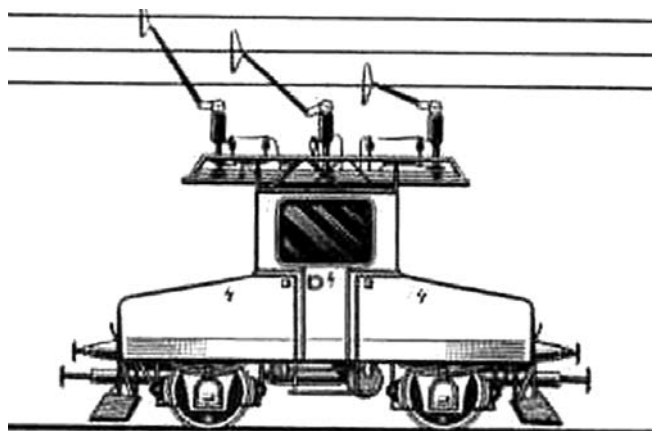


Рис. 2.3. Локомотив с тремя токоприемниками для бокового отбора мощности от трех воздушных линий

В Берлине создано банковское сообщество [85, 87] Studiengesellschaft für Elektrische Schnellbahnen (St.E.S) для финансирования строительства экспериментальной скоростной (200 км/ч) линии. В дополнение к нему находится Allgemeine Elektrizitäts – Gesellschaft (AEG), Siemens und Halske, Borsig и Vander Zypen und Charlier (Westwaggon) — будущие поставщики подвижного состава.

После обсуждений вопросов о скорости, маршруте, подвижном составе, о его ведении и т.д. установлено использование проекта на военной железной дороге между Мариенфельде — Цоссен на участке длиной 23,4 км с кривыми радиуса более 2000 метров и уклонами до 5 ‰.

Проведена реконструкция путей с заменой балласта, шпал и рельсов. Контактная трехпроводная линия принимается в вертикальной плоскости для бокового отбора мощности.

Компанией Vander Zypen und Charlier построено три локомотива: два трехосных локомотива — один с электрической частью AEG, другой с электрической частью Siemens — и третий четырехосный локомотив с оборудованием Siemens.

В электрическом оборудовании есть различия между AEG и Siemens. Два токоприемника Siemens имеют по одной стойке для трех контактных полозов (рис. 2.4), два токоприемника AEG — по три независимые стойки (рис. 2.5).

В 1902 г. проведены испытания четырехосного локомотива Siemens со скоростью 120 км/ч.

После некоторых улучшений на полигоне в августе 1903 г. высокоскоростные испытания возобновились с трехосными локомотивами Siemens и AEG. 23 октября 1903 г. локомотив Siemens достиг скорости 206,7 км/ч, а 27 октября 1903 г. экспериментальный локомотив AEG установил мировой рекорд скорости 210 км/ч.

К концу 1903 г. компания St.E.S формально и неожиданно закончила эксперименты на скоростном полигоне, обратив внимание на то, что предложенная цель — передвижение со скоростью 200 км/ч — достигнута.

Официальный отчет о Мариенфелде — Цоссене дает представление о большом успехе эксперимента и о намерении продолжения эксперимента на устойчивость, на длительный срок и по специальной высокоскоростной коммерческой линии, но этого не произошло.

Полигон Мариенфельд — Цоссен вернется к использованию военными и будет демонтирован в 1920 г..

Локомотив Siemens некоторое время был сохранен в Verkens und Baumuseum в Берлине, был превращен в музейный экспонат, тот же музей затем перешел в Берлинский Рейхсхайнстрикт в британском секторе после капитуляции, и здесь потеряны части всего содержимого. О локомотиве AEG не известно ничего [85].

Четырехосный локомотив Siemens был разрезан на две части, одна из которых будет локомотивом, используемым на линии LAG Мурнау — Обераммергау до 1977 г., а другая часть использовалась как маневровый локомотив на заводе Siemens в Берлине до 1988 г. и теперь размещена в Немецком техническом музее в Берлине.

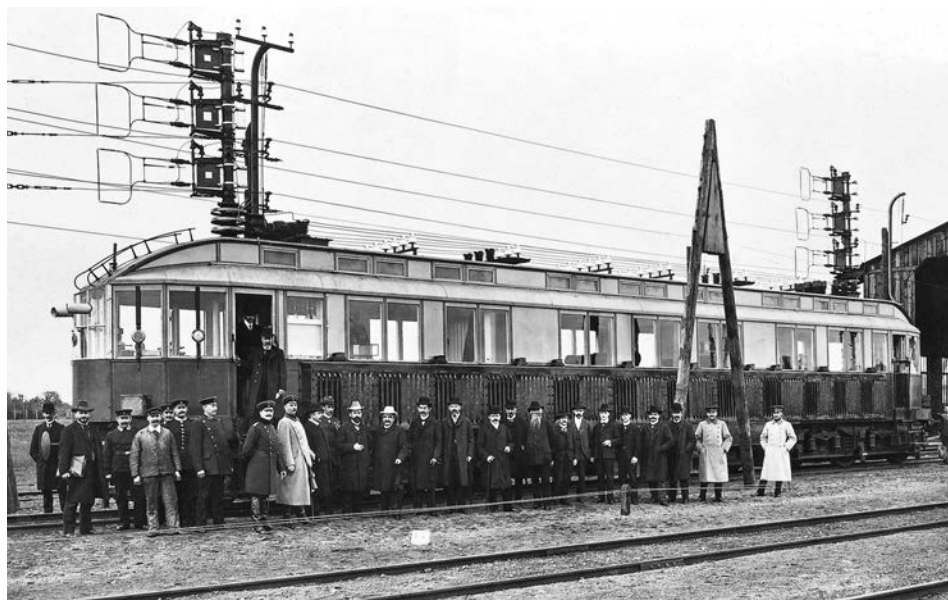


Рис. 2.4. Экспериментальный трехфазный локомотив компании Siemens

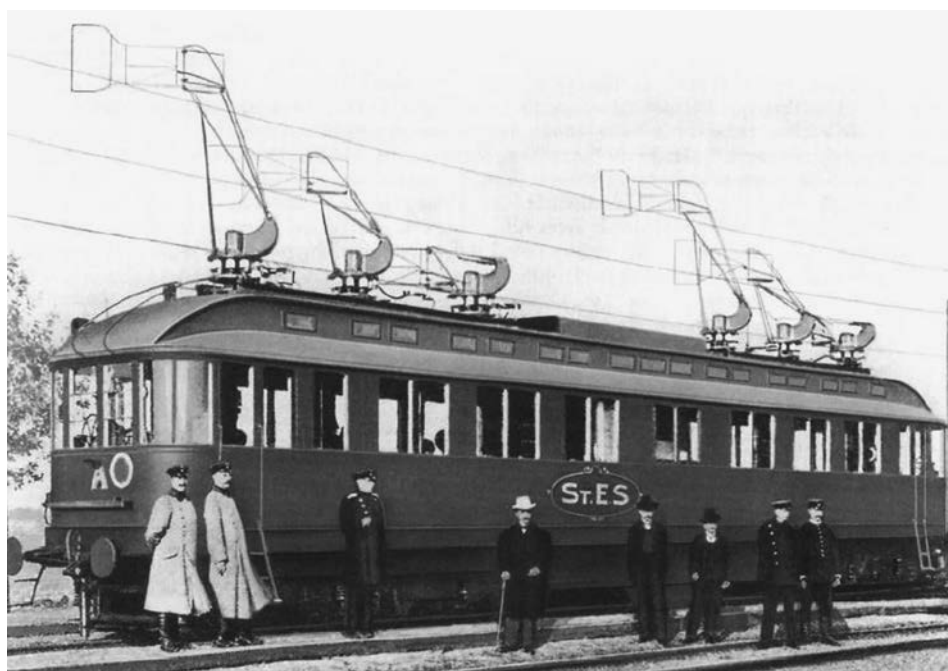


Рис. 2.5. Экспериментальный трехфазный локомотив AEG 27 октября 1903 г. установил мировой рекорд скорости 210,2 км/ч



После испытаний получили доказательство о возможности использования трехфазной системы для скоростного движения, но, учитывая механические сложности и требования «специальных конструкций в воздушных линиях и конструкции токоприемника [86], схема трехфазного тока с трехполюсной воздушной контактной сетью не нашла практического применения».

«В коммерческой трехполюсной трехфазной электрификации с 1896 г. был выбран путь через двухполюсную воздушную линию, а третий полюс образуют рельсы» [86].

Английский инженер Чарльз Браун вносит некоторые изменения в двигатель М. О. Доливо-Добровольского и использует его с 1890 по 1898 г. в электрификации железных дорог с речно-зубчатой передачей на горных туристических линиях Горнергратбан, Юнгфраубан в Швейцарии, Пети-поезд-де-ла-Руна во Франции, Корковадо в Рио-де-Жанейро (Бразилия) с низким напряжением 550–750 В; 40–33,3 Гц и с фирмой Эрликон в первом промышленном (коммерческом) использовании электрической тяги в Лугано (Швейцария) в трамвайных сетях (480 В, 40 Гц) в 1896 г.

Браун в партнерстве с Бовери в 1899 г. организовал пуск первой протяженной железнодорожной линии длиной 41 км Бургдорф — Тун с трехфазными магистральными электровозами с трехфазным переменным током низкого напряжения 750 В 40 Гц.

Используя систему Westinghouse, разработанную Калманом Канди в компании Ganz, в 1902 г. была электрифицирована трехфазным током высокого напряжения 3000 В, 15,6 Гц (локомотив на рис. 2.6) [88] линия Вальтеллин (Лекко-Колито-Чавенна 65 км, с ответвлением Колико-Сандрио 41 км, Италия) протяженностью 106 км.

В коммерческом плане трехфазная электрическая тяга с двухфазной воздушной линией и тяговым рельсом в качестве третьей фазы осуществлялась с 1896 по 1976 г.

К 1942 г. трехфазная с двухполюсной контактной сетью электрифицированная сеть железных дорог Италии достигла наибольшей протяженности и составила 1840 км. Эксплуатация системы трехфазного тока на железнодорожных линиях закончилась в Италии в 1976 г. [2]. Электрификация трехфазным током сохранилась как технический реликт на узкоколейных зубчато-речных туристических маршрутах протяженностью от 3,82 км до 9,34 км с уклонами от 30 до 250 ‰.

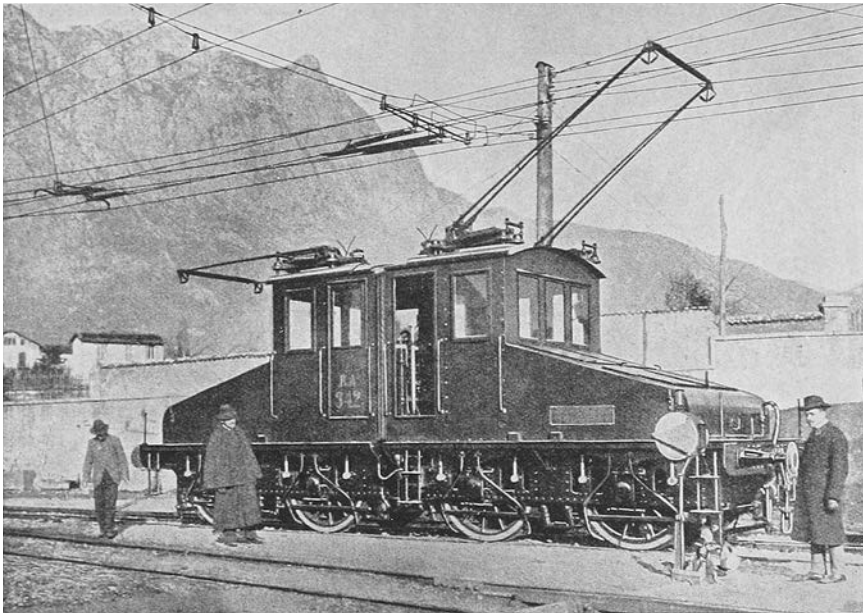


Рис. 2.6. Локомотив переменного тока в Вальтеллине (1898–1902).  
Источник питания: трехфазный 15 Гц переменного тока, 3000 В. Разработан компанией KalmanKando в компании Ganz, Венгрия и поставляется компанией Westinghouse

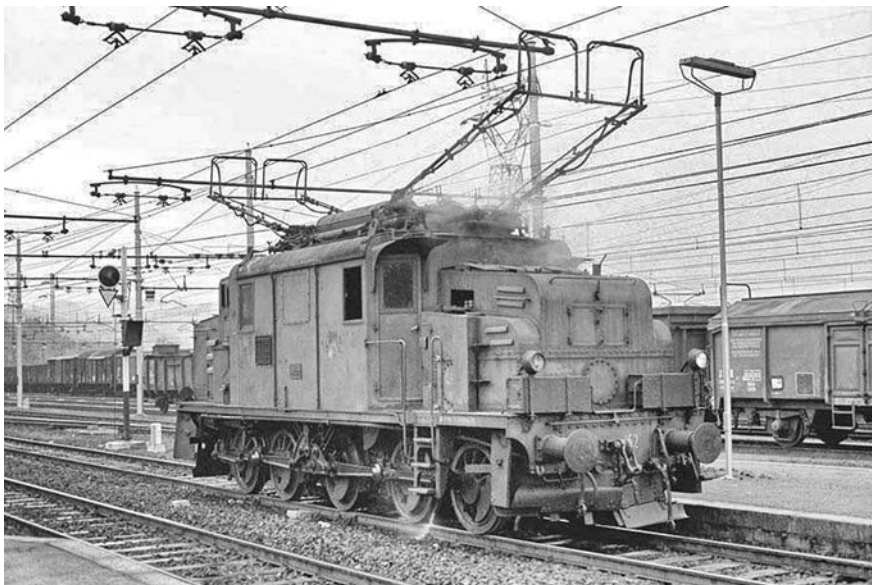


Рис. 2.7. Итальянский грузовой локомотив E554, работающий с трехфазным током.  
Два токоприемника с отдельными головками для каждой фазы.  
Фото сделано в Лигурии, 1974

Основными причинами отказа электрификации железных дорог трехфазным током с двухполюсной воздушной линией (тем более с трехполюсной) являются сложности токосъема при больших скоростях движения, ограничения междуфазных расстояний при высоких напряжениях, сложные устройства воздушных стрелок двух контактных проводов, отсутствие или слабое развитие элементов электронной полупроводниковой техники устройств автоматики и телемеханики.

## **2.4. ВОЗНИКНОВЕНИЕ СИСТЕМЫ ОДНОФАЗНОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Все системы с несколькими воздушными линиями сложны по конструкции, имеют высокий риск появления коротких замыканий при переключениях, при использовании высокого напряжения и при проходе поезда в точках соединения анкерных участков с высокой скоростью.

Разработка Kalman Kando в компании Ganz в Будапеште, работающая с Westinghouse [2], ввела электромеханический преобразователь, позволяющий использовать трехфазные двигатели с однофазной системой электроснабжения, что устраняет необходимость в двух проводниках.

Первая реализация промышленного однофазного питания переменного тока была произведена фирмой Ерликон в 1901 г.; установка на линии Seebach — Wettingen швейцарских железных дорог была завершена в 1904 г. В локомотивах мощностью 345 кВт, напряжением 15 кВ 50 Гц используются трансформаторы и роторные преобразователи для питания тяговых двигателей постоянного тока.

Итальянские железные дороги были первыми в мире по введению протяженных магистралей, а не только линий на короткое расстояние. Используя систему Westinghouse, разработанную Калманом Кандо в компании Ganz, в 1902 г. была электрифицирована трехфазным током высокого напряжения 3000 В 15,6 Гц линия Вальтеллин (Тирано-Лекко, Италия). Механический преобразователь преобразует однофазный ток в трехфазный переменный ток в локомотиве.

В 1903 г. железные дороги Пруссии на участке [85] Niderschoneweider-Splindlersfeld на окраине Берлина участвовали в проведении эксперимента системы однофазного напряжения переменного тока частотой 25 Гц с простой контактной сетью и возможностью отказа от традиционной

системы с двойными воздушными линиями. «Железнодорожные компании того времени не проявили особого интереса к высокой скорости с электрической тягой... паровые машины тогда казались верхом совершенства», что соответствовало и, по-видимому, в настоящее время соответствует принципу: «Зачем усложнять жизнь системой, как минимум, сомнительной функциональности...»

В 1923 г. в Венгрии были [2] проведены испытания по использованию однофазной системы напряжением 16 кВ 50 Гц. После успешных испытаний система с 1932 по 1960-е гг. применена на линии Будапешт-Хедьешалом (в направлении Вены). В дальнейшем напряжение 16 кВ было заменено на российскую и позднее французскую систему 25 кВ (в 1950-х гг. во Франции разработаны системы 20 кВ и 25 кВ и в бывшем СССР — 25 кВ).

Современные локомотивы однофазной системы 25 кВ 50 Гц используют трансформатор и выпрямитель для обеспечения напряжением двигателей постоянного тока. Скорость регулируется переключением витков обмотки на трансформаторе. В бывшем СССР в 1960-е гг. был выпущен электровоз ВЛ-60 с ртутным выпрямителем с водяным охлаждением (рис. 2.8).



Рис. 2.8. Советский электровоз VL 60pk (ВЛ60 пк)

С развитием электронной полупроводниковой техники в более сложных локомотивах (рис. 2.9) используются тиристорные или IGBT схемы для двигателей постоянного тока и для получения трехфазного напряжения для асинхронных двигателей переменного тока.



Рис. 2.9. Шведский локомотив R3 был первым локомотивом серии, в котором использовались тиристоры с двигателями постоянного тока

Хотя недавно разработанные системы неизменно работают на переменном токе, многие существующие системы постоянного тока все еще используются, например: Южная Африка и Соединенное Королевство (750 В и 1500 В); Нидерланды, Япония, Мумбаи, Ирландия (1500 В); Словения, Бельгия, Италия, Польша, Россия, Испания (3000 В) и г. Вашингтон (750 В).

## **2.5. СХЕМЫ И ОСНОВНЫЕ УСТРОЙСТВА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ «ДВУХФАЗНАЯ ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ — РЕЛЬС»**

### **2.5.1. Электрическая схема питания и секционирования контактной сети**

В разделе приведен сокращенный материал из издания [89] X. — L. C. DELSISTEMATRI FASE с включением текста и рисунков практически без изменений.

Напряжение в контактной сети (на локомотиве с асинхронными тяговыми двигателями) 3,7 кВ 16,7 Гц. Расстояние между тяговыми подстанциями 15–20 км. Общее сопротивление 1 км линии с медными проводами

сечением  $200 \text{ мм}^2$  при пересчете на 2 фазы и рельсы типа FS 46  $Z = 0,2 \text{ Ом}$  (зависит от омического и реактивного сопротивления) и соответствует удельному «падению напряжения  $0,2 \text{ В}$  для  $1 \text{ А}$  и  $1 \text{ км}$ ».

От вторичной обмотки тягового трансформатора (рис. 2.10 фиг. 108) подстанции «выходят 3 фазы, которые питают тяговые двигатели».

Две фазы подаются через «переключатели (выключатели) от воздушной линии (фидеров) к двум контактным проводам; третья фаза подключается через кабель к путевым рельсам». Между «двумя фазами контактной подвески и между ними и рельсами имеется линейное напряжение  $3,7 \text{ кВ}$ ».

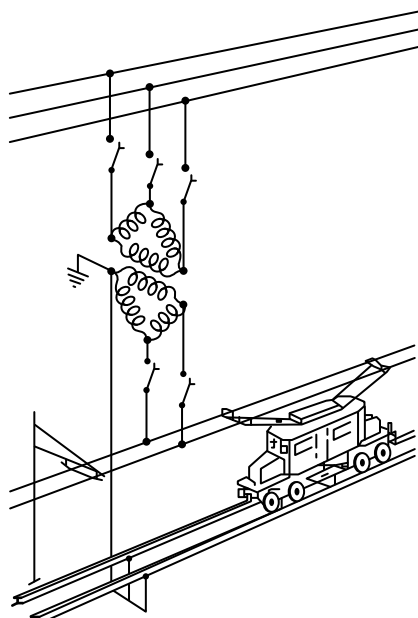
«Электрический ток через устройства токосъема (скользящие контакты полоза токоприемника и колесо-рельс) поступает на двигатели локомотива».

«На рис. 2.11 (фиг. 109) показана схема питания и секционирования (электрическая схема) двухпроводной (двухполюсной) контактной линии между двумя тяговыми подстанциями и промежуточной станцией».

Схема составлена с учетом проведения периодических осмотров (реvisions) и «ремонта поврежденных устройств с минимальными нарушениями графика движения поездов». «По этой причине при помощи секционирования (электрического разделения) пути станции разделяются на четные и нечетные зоны (области), пути нечетной области электрически и механически отделены от путей четной области. Только при включении параллельного разъединителя (44 или 41) две области могут быть соединены друг с другом». «На перегоне четный и нечетный пути не зависят друг от друга».

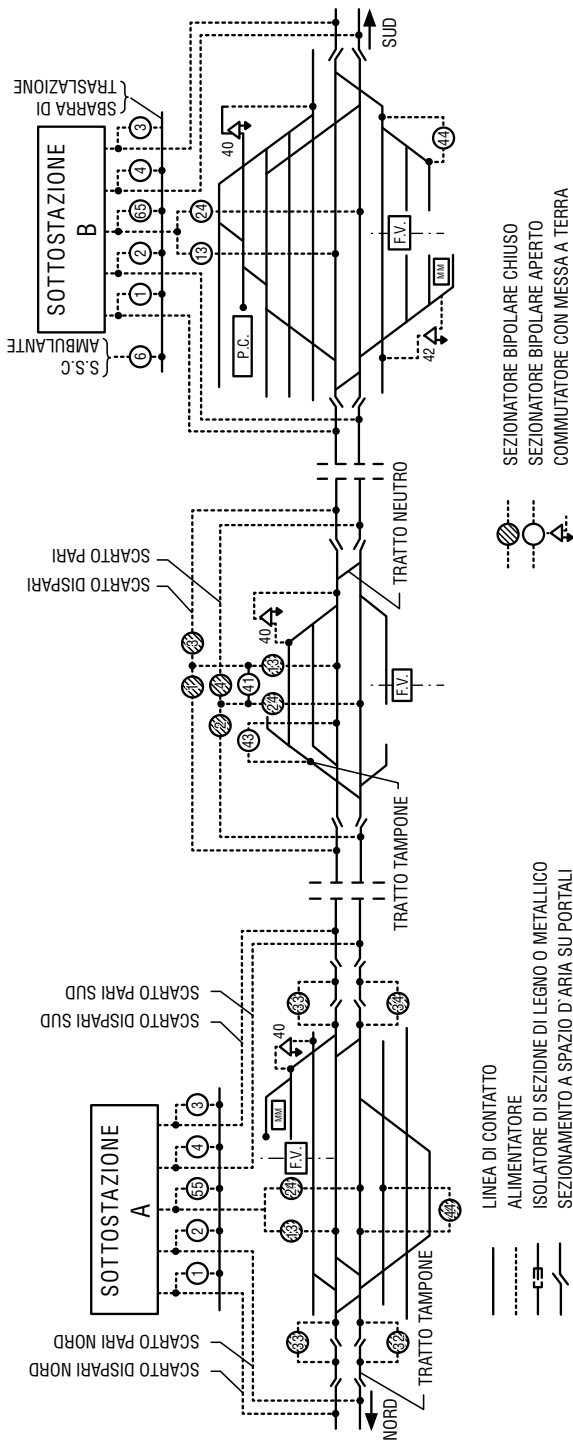
Контактная сеть перегонов слева и справа от тяговой подстанции получает питание для каждой из двух фаз по отдельным фидерам.

Контактная сеть двух зон станции с тяговой подстанцией получает питание для каждой из двух фаз по отдельным двум фидерам, например четной зоны 24, нечетной зоны 13.



Фиг. 108

Рис. 2.10. Упрощенная схема трехфазной системы электрической тяги



Фиг. 109

Рис. 2.11. Схема питания и секционирования контактной линии между двумя тяговыми подстанциями и промежуточной станцией

На промежуточной станции «электрический ток поступает в контактные провода» через разъединители 1, 2 и (или) 3, 4 и разъединители 24 и 13 на станции и через контактные провода перегонов от соответствующих фидеров на тяговой подстанции. Разъединители 1, 3 и 2, 4 питающих линий (фидеров) от перегона, «состоящие из одного или двух параллельных проводов для каждой фазы, установленных на кронштейнах и закрепленных на верхней части опоры, соединяют два смежных участка перегона. Эти две питающие от контактной сети перегона линии (фидеры) не являются частью контактной сети станции, т.е. отделяют станцию.

«Схема, показанная на рис. 2.11 (фиг. 109), позволяет... всегда обеспечивать бесперебойное электроснабжение между соседними тяговыми подстанциями, даже в случае перерыва (сбоя) питания любого участка линии между двумя тяговыми подстанциями». Действительно, «в случае выхода из строя контактной сети одного из путей перегона «бесперебойное питание обеспечивается контактными проводами другого пути (через разъединитель 41 промежуточной станции)». На промежуточной станции бесперебойность питания «между соседними участками перегона обеспечивается при помощи питающей линии (фидеров), даже если контактная сеть самой промежуточной станции не работает (отсутствует)».

Для обеспечения бесперебойного электроснабжения в случае однопутной линии «между двумя тяговыми подстанциями необходимо установить специальную линию (источник питания), которая проходит параллельно с Л. С. и подключается к станции с помощью разъединителей».

### **2.5.2. Контактная подвеска**

«В трехфазной системе электрической тяги используются два типа подвески: поперечная (простая) и продольная (цепная), (в дополнение: подвеска в туннеле).

#### *Поперечная подвеска*

«Вид поперечной подвески на прямом участке и в кривой показан на рис. 2.12 (фиг. 110).

Рама (каркас) (рис. 2.12, а) зафиксирована на 2-х кронштейнах 1 с катушечным изолятором 2, связанным через штифт 3 катушечным изолятором 5, который связан с таким же катушечным изолятором другой фазы через нежесткую стальную трубку 4. К катушечным изоляторам 5 подвешены фиксаторы 6 с одним или с двумя зажимами (для одного или для



двух проводов на фазу), которые фиксируют контактные провода 7 фасонного типа.

Характеристиками поперечной подвески являются: двойная изоляция каждого провода по отношению как к другой фазе, так и к металлическим частям подвески; возможность небольших вертикальных перемещений по кронштейнам 1 рамы 4 с двумя несущими изоляторами 2; возможность горизонтального перемещения по консоли рамы 4 с несущими изоляторами 2, кронштейнами 1 и катушечными изоляторами 5 для формирования зигзага относительно оси подвески контактных проводов.

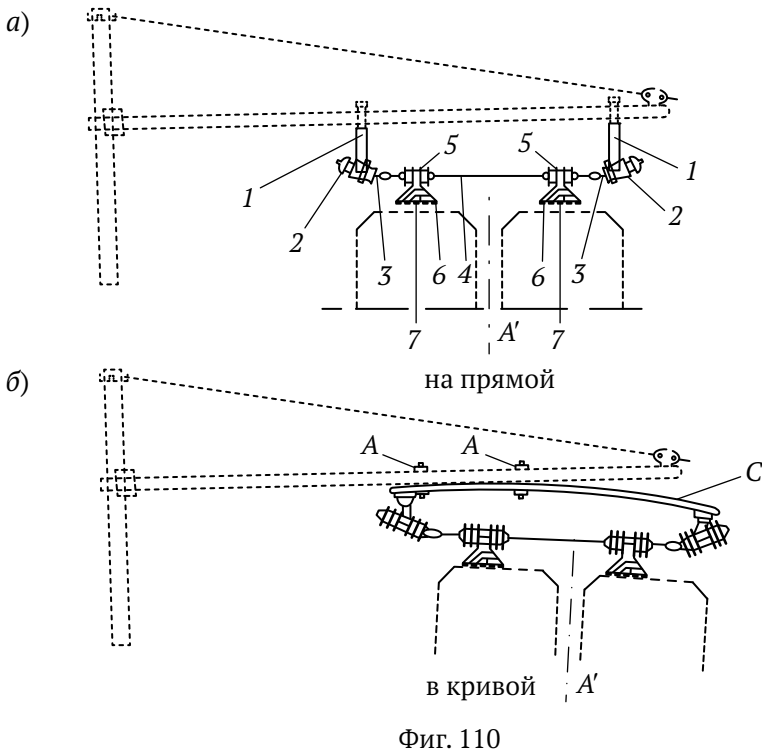


Рис. 2.12. Вид поперечной подвески на прямом участке (а) и в кривой (б): 1 — кронштейн; 2 — катушечный изолятор; 3 — штифт; 4, 6 — фиксатор; 5 — изолятор

В подвеске для кривых участков пути (рис. 2.12, б) «подвесная рама вместо кронштейнов соединена с консолью при помощи дугообразной железной арки (трубки С)». Регулируя точки крепления А трубки С к консоли, контактные «провода могут быть установлены на наклонной плоскости параллельно плоскости пути», который в кривых имеет превышение наружного рельса над внутренним.

Длина пролета при поперечном типе подвески не может превышать 35 м».

Поперечная подвеска применяется, как правило, на станциях и на горных линиях, где имеются частые кривые малого радиуса и «требуется пролеты уменьшенной длины и не имеют высоких скоростей движения поездов».

### *Продольная подвеска*

В продольной подвеске «контактные провода поддерживаются другим проводом (тросом), называемым опорным (несущим), который подвешен в том же направлении по оси пути, т.е. в продольном направлении к нему (рис. 2.13).

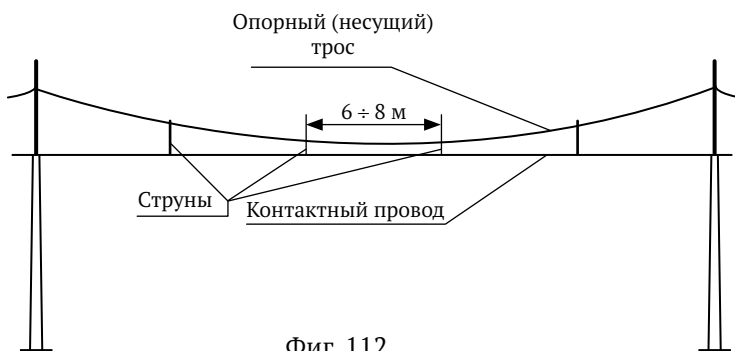


Рис. 2.13. Схема продольной подвески

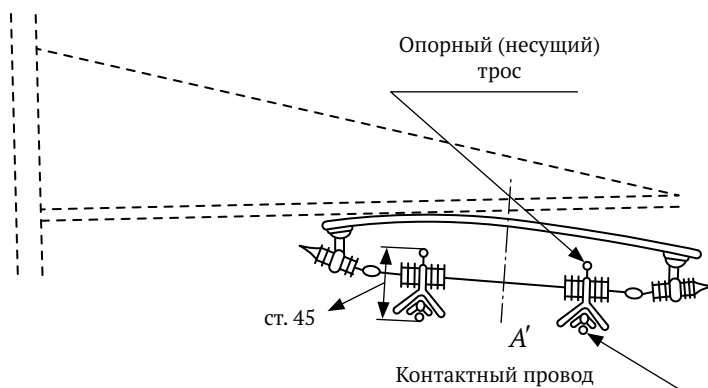
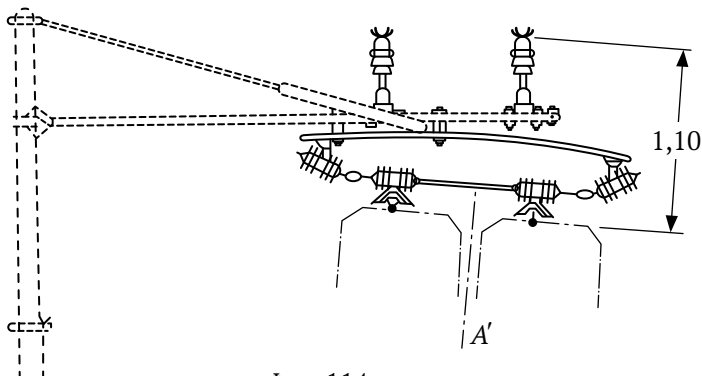


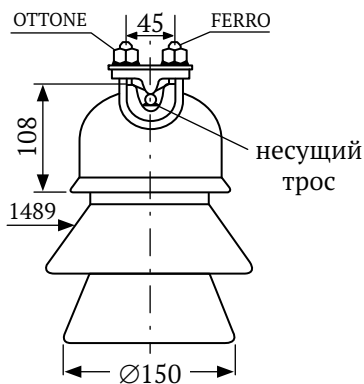
Рис. 2.14. Подвеска типа А

«В подвеске типа А (рис. 2.14) опорные (несущие) тросы проходят ниже консоли и закреплены на зажимах, посаженных на ось (штифт), соединенный с кольцом катушечного изолятора; в типе В (рис. 2.15) опорные (несущие) троса проходят над консолью и закреплены на головке штыревого изолятора 1489 (рис. 2.16)».



Фиг. 114

Рис. 2.15. Подвеска типа В



Фиг. 115

Рис. 2.16. Штыревой изолятор 1489

Несущий трос из медной круглой «проволоки диаметром 11,5 мм поддерживает с помощью медных струн диаметром 5 мм контактные провода из профилированной (фасонной) проволоки диаметром 11,8 мм.

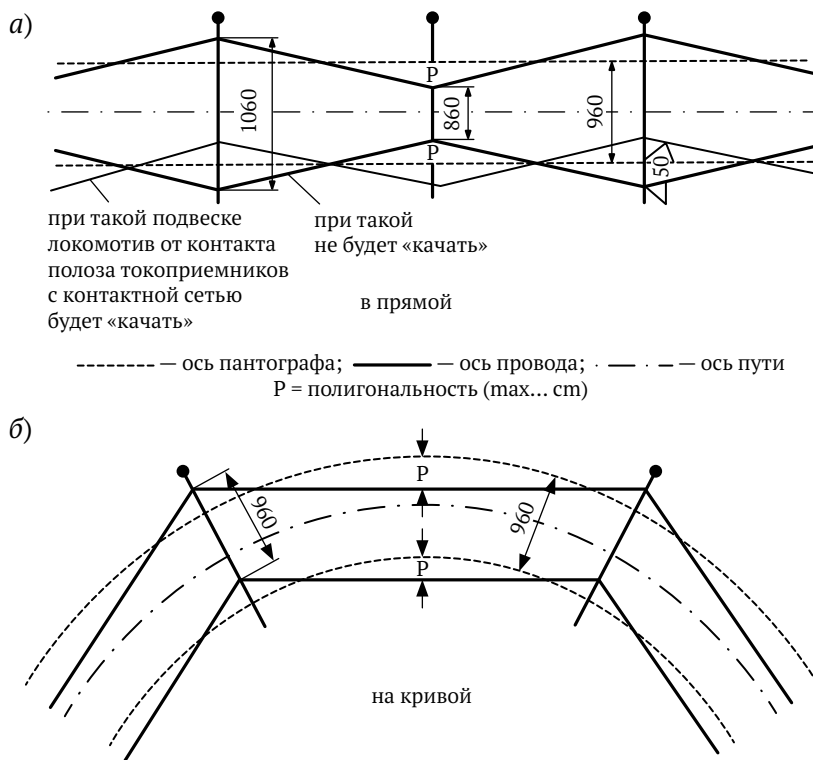
«В подвеске типа А расстояние между несущим тросом и контактным проводом в точке подвеса составляет 45 см, максимальная длина пролета не может превышать 35 м (см. рис. 2.14)»; в подвеске типа В расстояние

между проводами в точке подвеса 1,1 м (см. рис. 2.15), «максимальная длина пролета на прямом участке составляет 50 м».

В подвеске типа *B*, регулируя высоту струн, можно ограничить отклонение контактного провода «в уровне между точкой подвеса и серединой пролета» до 16 см по сравнению с 50 см поперечной подвески.

*Зигзаг контактной подвески (контактная подвеска типа «зигзаг»)*

Контактные провода расположены зигзагом в одном пролете (рис. 2.17) и отклоняются на 50 см в точке подвеса поочередно (от опоры) внутрь к оси пути и (к опоре) наружу от оси пути.



Фиг. 117

Рис. 2.17. Расположение контактной подвески типа «зигзаг» в плане пути

Расстояние между осями контактной сети (осями полозов токоприемников) составляет 960 мм. С учетом зигзага расстояние между проводами контактной сети (проводами двух фаз) изменяется «поочередно от 860 мм до 1060 мм при переходе от одной точки подвеса к другой» (от одной опоры к другой). Следовательно, ширина полоза каждого токоприемника составляет 100 мм.

### Пересечения (стрелочные переводы)

«Оборудование пересечений должно быть таким, чтобы:

– проход локомотива под пересечениями должен происходить без снижения разрешенной скорости для участка и без перерывов (отрывов) при токобъеме;

– рамки (арки, полозы) токоприемника не должны приближаться к ближайшему проводу другой фазы на недопустимое расстояние во избежание коротких замыканий;

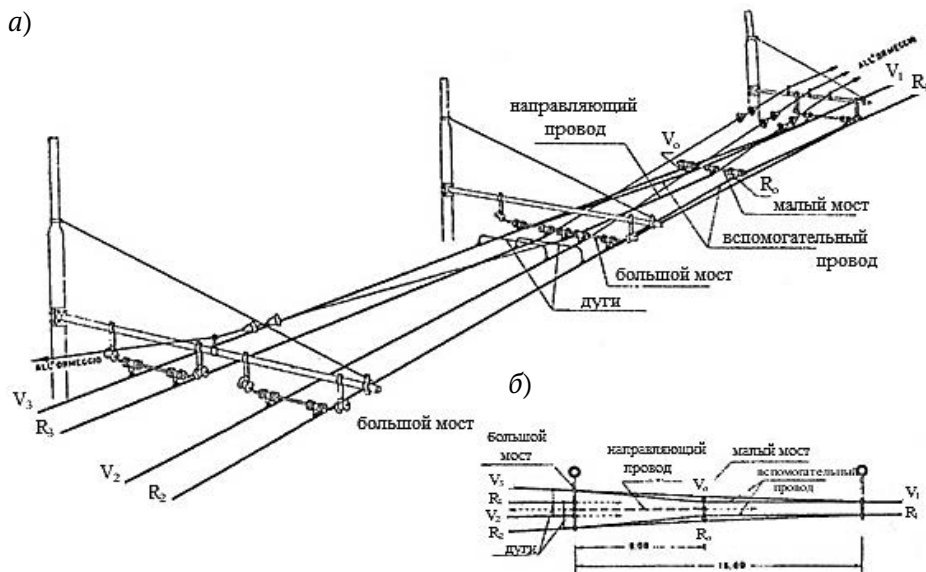
– рамки (арки, полозы) токоприемника должны всегда находиться во взаимодействии хотя бы с одним проводом во избежание схода (обрыва) провода;

– зона взаимодействия (контакта) между проводом и ползком токоприемника не должна превышать 20 см с одной и с другой стороны от центра (оси) ползца токоприемника».

Кратко представлены два стрелочных перевода: простой стрелочный перевод и перекрестный стрелочный перевод.

#### Простой стрелочный перевод

На рис. 2.18 показано расположение проводов на простом стрелочном переводе и относительный план.



Фиг. 118

Рис. 2.18. Расположение проводов на простом стрелочном переводе (а) и вид в плане (б)

Он состоит:

— из двух специальных подвесных креплений (точек подвеса), называемых большим мостом, расположенным ближе к центру, и малым мостом, на расстоянии 8 метров друг от друга, между двух мостов отсутствуют провода внутренних фаз, которые в ином случае пересекались бы в центре стрелочного перевода, являясь причиной замыкания проводов разных фаз;

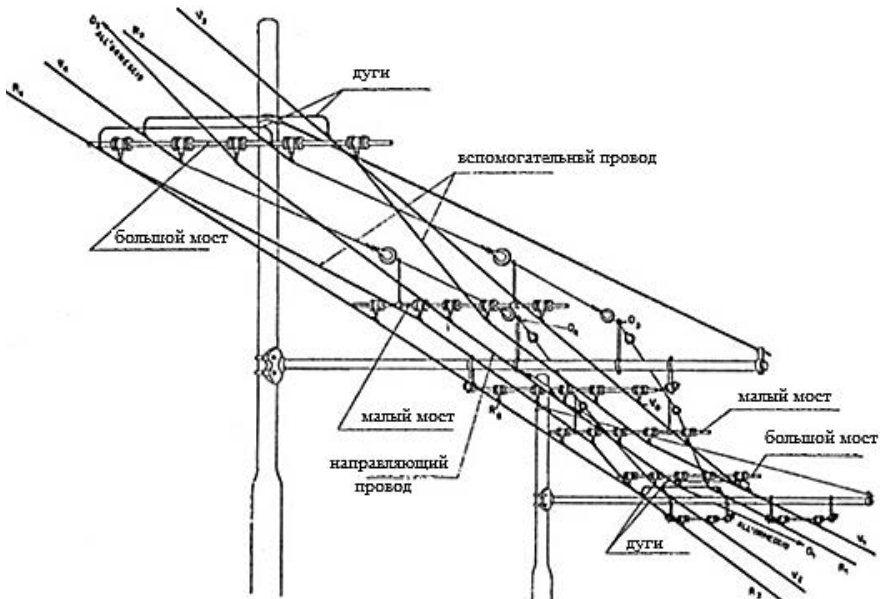
— из проводников двух внешних фаз  $R_1R_0R_3$  и  $V_1V_0V_3$ , с которыми рядом размещены вспомогательные провода, чтобы сформировать полигональность (зигзаг) независимо от направления (ответвления) стрелочного перевода;

— из направляющего провода, расположенного продольно центральной линии стрелочного перевода;

— из двух медных тросов (дуг), которые после большого моста обеспечивают электрическую связь с двумя внутренними отходящими проводами.

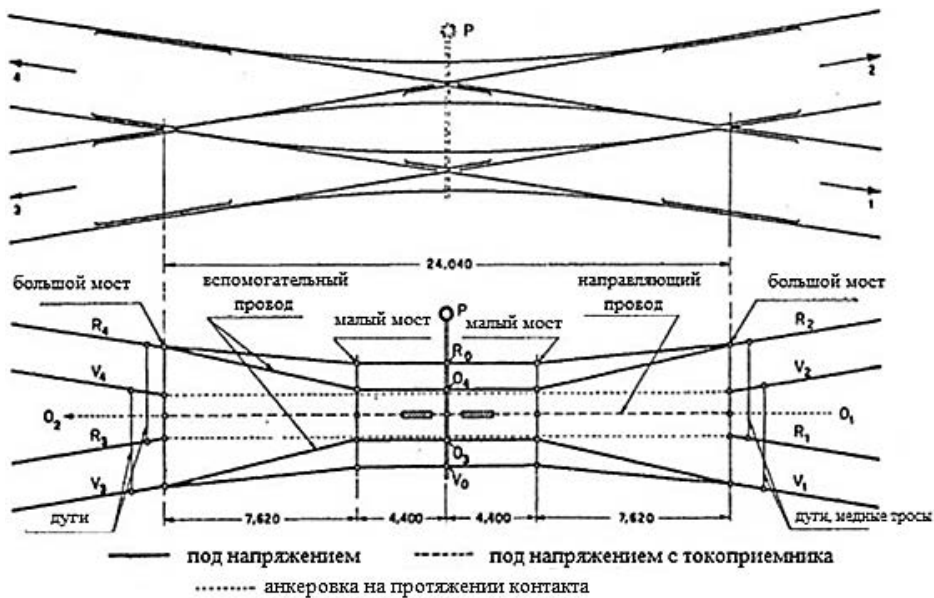
### *Перекрестный стрелочный перевод*

На рис. 2.19 представлено расположение проводов на перекрестном стрелочном переводе, на рис. 2.20 — относительный план со схематической компоновкой оборудования контактной сети.



Фиг. 119

Рис. 2.19. Расположение проводов на перекрестном стрелочном переводе



Фиг. 120

Рис. 2.20. Относительный план расположения проводов со схематической компоновкой оборудования контактной сети на перекрестном стрелочном переводе

Количество оборудования (устройств) этого стрелочного перевода примерно равно значению двух простых стрелочных переводов, причем два больших моста расположены в крайних центрах (сердцевинах) стрелочного перевода, а два малых моста — в промежуточном положении, обеспечивая нормальный токосъем для обеих рамок (полозов) токоприемников.

Направляющий провод, проходящий через средние (центральные) изоляторы 4-х мостов, служит в качестве направляющего для рамок (полозов) токоприемника внутренних фаз.

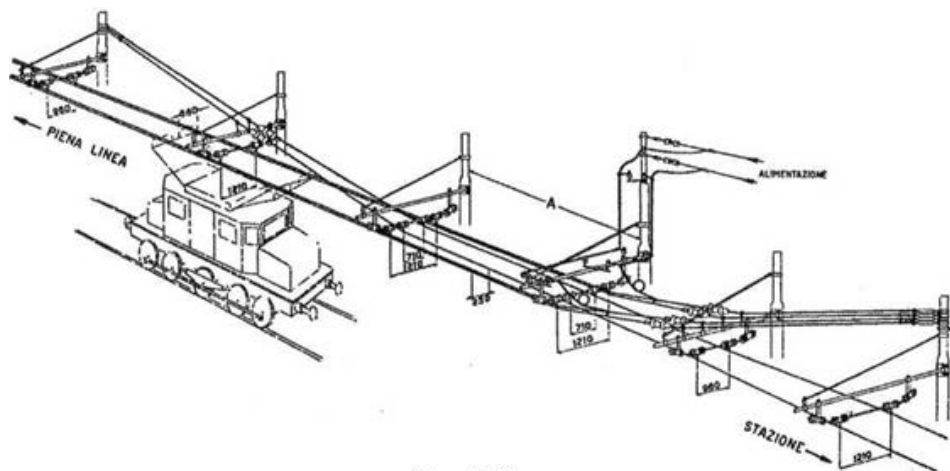
#### *Секционирование — буферные секции*

«В первых проектах секционирование между контактной сетью станции и перегона было получено при помощи секционного изолятора из дерева, состоящего из двух полос древесины с компактными волокнами, пропитанными изоляционным веществом», включенным в разрыв контактного провода.

«Также используются изоляторы из petralit: материал из смеси цемента и асбеста, пропитанный диэлектрическим веществом, водо- и дугоустойкий, но хрупкий».

«В последних схемах... используется секционирование при помощи воздушного промежутка».

На рис. 2.21 видно, что сопряжение (секционирование) состоит из 5-ти пролетов. В центральном пролете А два провода станции и перегона проходят параллельно и на одной высоте, причем провода одноименных фаз находятся на расстоянии 25 см друг от друга и, следовательно, одновременно находятся во взаимодействии (контакте) с движущимся ползком токоприемника, полезная (рабочая) длина которого составляет 66 см.



Фиг. 123

Рис. 2.21. Схема секционирования проводов контактной сети станции и перегона

После этого пролета по направлению к перегону провода станции постепенно поднимаются и уходят на анкеровку после двух пролетов на специальную опору. Аналогично провода перегона также, как и провода станции в промежутке двух пролетов, постепенно поднимаются от пролета А и уходят на анкеровку.

## 2.6. ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

Экспериментальные исследования по использованию электрической энергии для нужд тяги начались в 1834 г. с использованием гальванических элементов (Т. Дэвенпорт, Америка; Р. Дэвидсон, Шотландия) с двигателями постоянного тока.



Другой этап — источники внешнего электроснабжения. Вернер Сименс, Томас Эдисон создали электрические вагоны с питанием по рельсам и по воздушным линиям. Начало всемирного использования электрической тяги положено в 1888 г. изобретением Дж. Спрэггом.

В 1888 г. опубликованные работы Г. Феррариса и Н. Тесла обеспечили возможность использования двигателя переменного тока. В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольский предложил трехфазную систему переменного тока (первые трехфазные трансформатор и двигатель).

Компания Сименс и Хальске в 1892 г. построила полигон с источником трехфазного тока с двумя воздушными линиями и рельсами; в 1900 году создано банковское сообщество и компании AEG и Siemens создали систему с тремя воздушными линиями.

В коммерческой эксплуатации остались двухполюсная электрификация (1896 г., трамвайные сети, Лугано, Швейцария, фирма Эрликон, Чарльз Браун).

Двухполюсная воздушная система переменного тока эксплуатировалась до 1976 г. в Италии, где к 1942 г. протяженность линий системы составила 1840 км.

В 1903 г. железные дороги Пруссии провели эксперимент системы однофазного напряжения переменного тока. Первая реализация промышленного однофазного питания произведена фирмой Эрликон в 1901 г. Компания Ganz (Калман Кандо) электрифицировала систему Вальтеллин (Италия) однофазным током с преобразованием в трехфазную.

В 1923 г. в Венгрии проведены испытания однофазной системы 16 кВ 50 Гц, и с 1932 по 1960-е гг. эта система применена на линии Будапешт-Хедьешалом.

# ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

### 3.1. ВАРИАНТЫ ОРГАНИЗАЦИИ СХЕМ ТОКОСЪЕМА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

В изданиях первоисточников показаны и в главе 2 приведены достоинства и недостатки трехфазной системы электрической тяги, приведших к разработке однофазной системы электрической тяги 25 кВ 50 Гц.

В разделе 1.2 приведено описание этой системы, ее недостатки и варианты пассивного и активного усиления однофазной системы 25 кВ 50 Гц до подсистемы  $2 \times 25$  кВ 50 Гц.

Основные недостатки однофазной системы электрической тяги отмечены доктором технических наук, профессором Р. Р. Мамошиным [80]. Более четко обозначились недостатки однофазной системы электрической тяги при введении тяжеловесного и скоростного движения поездов — в целом при увеличении размеров движения.

По конструктивным и схемным решениям трехфазная система электрической тяги может быть классифицирована по двум вариантам токосъема тяговой нагрузки электровоза с контактного провода контактной подвески:

- 1) полз токоприемника располагается горизонтально под контактным проводом — токосъем «понизу»;
- 2) полз токоприемника располагается вертикально сбоку контактного провода — «боковой» токосъем.

### 3.2. ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ УСТРОЙСТВ ТОКОСЪЕМА «ПОНИЗУ»

Результатом совершенствования существовавшей в промышленном использовании с 1896 по 1976 г. трехфазной системы электрической тяги железных дорог переменного тока должна быть система, лишенная

отмеченных выше недостатков однофазной системы переменного тока 25 кВ 50 Гц и характеризующаяся симметрированием токов трехфазных питающих электрических сетей, снижением потерь электрической энергии, т.е. пониженным удельным расходом электрической энергии на тягу и, следовательно, повышенной технико-экономической эффективностью системы электрической тяги.

В системе тягового электроснабжения трехфазной системы электрической тяги (рис. 3.1) имеется дополнительный контактный провод, при этом провода двух фаз «а» и «b» трехфазного силового трансформатора тяговой подстанции подключаются соответственно к основному и дополнительному контактным проводам контактной сети. Третья фаза «с» трехфазного силового трансформатора подключена к тяговому рельсу. Также имеется дополнительное устройство токосъема, идентичное основному [90]. Полоз токоприемников располагается горизонтально под контактными проводами, обеспечивая токосъем «понизу».

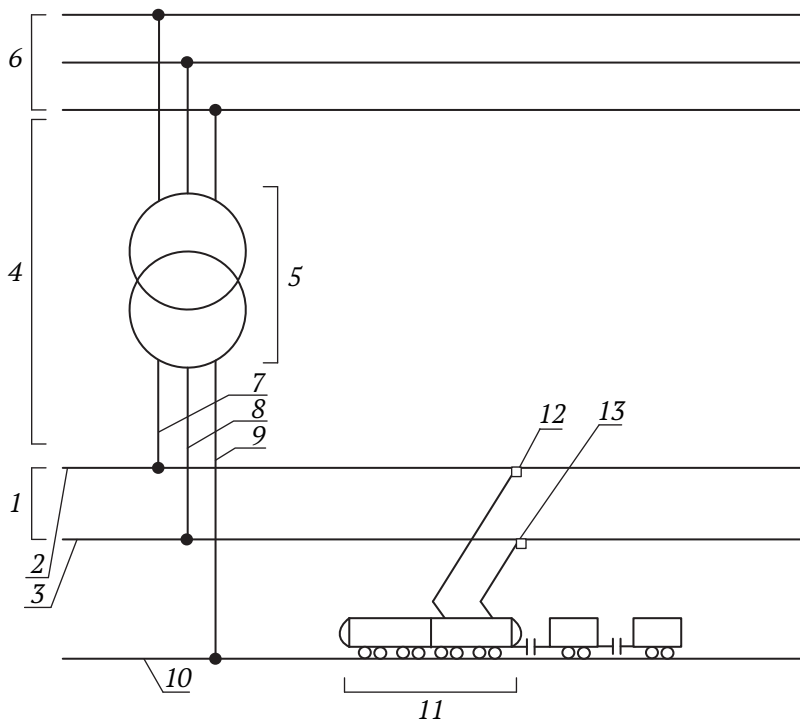


Рис. 3.1. Функциональная схема трехфазной системы электрической тяги с горизонтальным токосъемом «понизу»:

1 — контактная сеть; 2, 3 — основной и дополнительный контактные провода; 4 — тяговая подстанция; 5 — трансформатор; 6 — высоковольтная линия электропередачи; 7, 8, 9 — выводы «а», «b», «с»; 10 — тяговый рельс; 11 — электроподвижной состав; 12, 13 — устройства токосъема

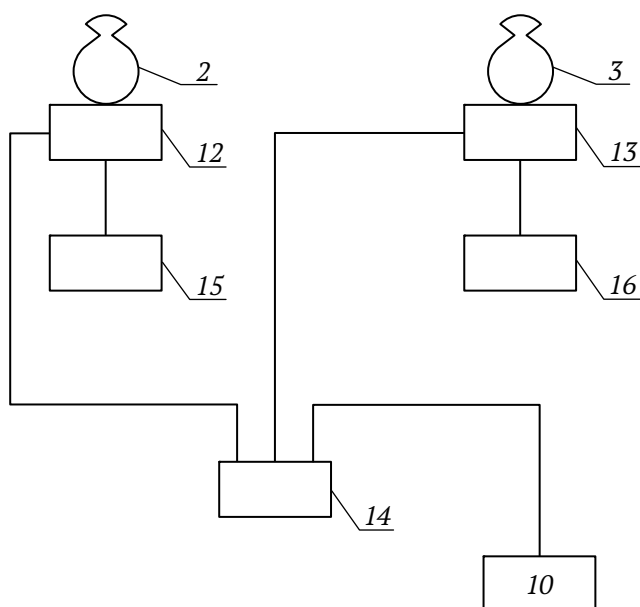


Рис. 3.2. Функциональная схема подключения тяговых электродвигателей и блоков управления устройствами токосъема:  
 2, 3 — контактные провода фаз «а» и «b»; 10 — тяговый рельс;  
 12, 13 — устройство токосъема; 14 — тяговый преобразовательный трансформатор;  
 15, 16 — блоки управления устройствами токосъема

Отключение блоками управления (рис. 3.2) соответственно основного устройства и (или) дополнительного устройства токосъема направлено и вызвано различными условиями эксплуатации трехфазной системы электрической тяги (например, заходом на боковые пути станции, ремонтом, техническим обслуживанием, стоянками и др.).

Таким образом, в условиях эксплуатации, кроме симметричного трехфазного режима, возникают необходимые и вынужденные причины появления несимметричного однофазного режима работы трехфазной системы тягового электроснабжения переменного тока.



Отличие в обозначенных схемах на рис. 3.1 и на рис. 3.3 заключается в схемном решении способа токосъема. В системе (см. рис. 3.1) токосъем осуществляется при горизонтальном расположении полоза каждого токоприемника под соответствующими контактными проводами, обеспечивая токосъем «понизу». В системе (см. рис. 3.3) токосъем осуществляется при вертикальном расположении полоза токоприемника относительно соответствующего контактного провода, обеспечивая «боковой» токосъем.

Под «боковым» токосъемом понимается токосъем, когда полз токоприемника соприкасается (скользит) с боковой поверхностью контактного провода, обращенной к продольной оси крыши локомотива и представленный схематично на рис. 3.3, 3.4 и в патенте на изобретение [91] (первый вариант «бокового» токосъема).

При этом токоприемник закреплен на электроподвижном составе таким образом, что контактная поверхность его полоза обращена к боковой поверхности контактного провода (рис. 3.4), обеспечивая при контактировании боковой токосъем.

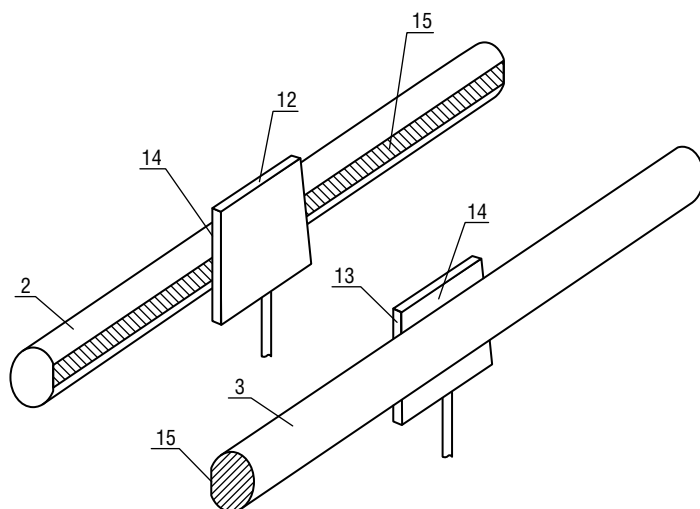


Рис. 3.4. Схема взаимного расположения токоприемников и контактных проводов при вертикальном «боковом» токосъеме:  
2, 3 — контактные провода; 12, 13 — полозы токоприемника;  
14 — контактная поверхность полоза; 15 — контактная поверхность контактного провода

Отличие контактного взаимодействия полоза токоприемника с контактным проводом при втором варианте бокового токосъема состоит в том, что боковая поверхность скольжения контактного провода обращена в сторону от продольной оси крыши и локомотива. При этом токоприемники

располагаются на крыше с полевой стороны локомотива, так как между контактными проводами фаз «а» и «b» для исключения их схлестывания при значительной ветровой нагрузке монтируются изоляционные механические распорки (рассмотрено в разделе 5.6.7).

Кроме того, токоприемники имеют возможность [90] их перемещения и отделения от контактных проводов. При поднятых токоприемниках движение электроподвижного состава происходит с питанием от трех фаз силового трансформатора тяговой подстанции через два контактных провода и тяговый рельс. При опущенном одном токоприемнике движение электроподвижного состава происходит от двух фаз «а» или «b» и «с» силового трансформатора через один контактный провод и тяговый рельс.

### 3.4. ВАРИАНТЫ СХЕМ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Движение поездов по перегону и по главным путям станции в четном и нечетном направлениях обеспечивается трехфазной системой тягового электроснабжения при симметричном ее режиме.

Движение поездов по боковым путям станции также обеспечивается этой системой, но при несимметричном режиме.

Организация движения поездов по боковым путям при отсутствии контактной сети на боковых путях будет рассмотрена в главе 5.

Схема питания одной секции электровоза представлена на рис. 3.5, где от силового трансформатора тяговой подстанции две фазы «а» и «b» подключены к двум проводам контактной сети КС1 и КС2, а третья фаза «с» — к тяговым рельсам, от которых питается трехфазный преобразовательный тяговый трансформатор электровоза.

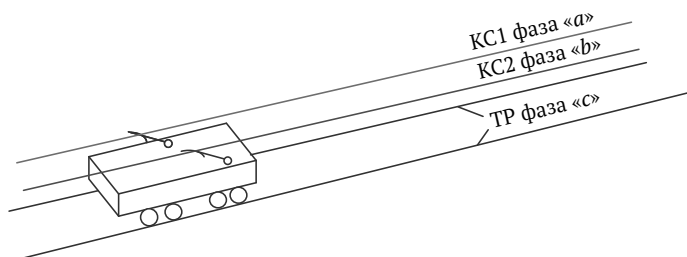


Рис. 3.5. Положение токоприемников при движении электровоза по перегону и по главному путям станции

Вынужденный несимметричный однофазный режим работы системы электрической тяги может возникнуть при отключении от защит одной из двух фаз «*a*» или «*b*» вторичной обмотки силового трансформатора тяговой подстанции или при обрыве одного контактного провода КС1 или КС2. Отключение одной из трех фаз «*a*», «*b*» или «*c*» при сохранении питания в двух других фазах силового трансформатора не ведет к прекращению движения на участке.

Движение по боковым путям станции производится с ограничениями скорости движения и, естественно, потребляемой мощности, достаточной для движения и реализуемой при несимметричном режиме системы электрической тяги, т.е. при питании силовой схемы электровоза от двух фаз «*ac*» или «*bc*», или «*ab*» (на четной или нечетной сторонах станции).

Контактная сеть боковых путей станции упрощается, токоприемник может производиться одним токоприемником — правым или левым. Система электрической тяги переводится в однофазный режим работы.

Съезд с главного пути станции четного или нечетного направления на боковые пути с переходом работы системы электрической тяги из симметричного трехфазного режима на несимметричный однофазный режим работы на боковых путях станции показан схематически на рис. 3.6.

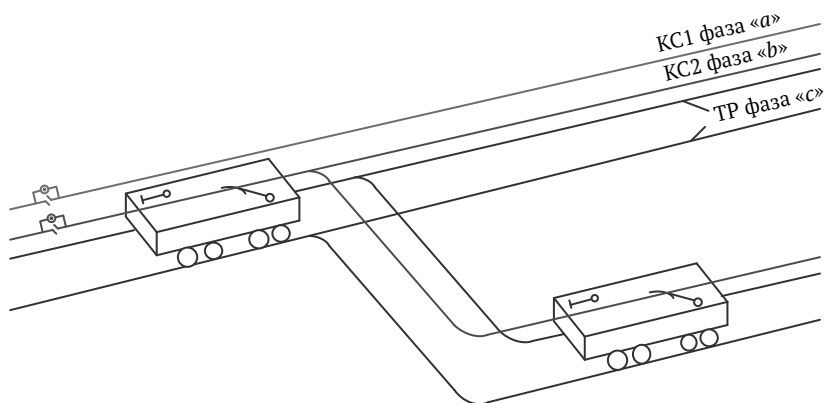


Рис. 3.6. Схема положения токоприемников при съезде с главного пути станции на боковой путь с несимметричным тяговым электроснабжением

При движении по перегону в четном или в нечетном направлении и при намеченном съезде на боковой путь необходимо перед станцией опустить токоприемник, расположенный на стороне крыши электровоза, противоположной направлению съезда на боковой путь станции.



На боковых путях станции контактная подвеска монтируется со сдвигом от оси бокового пути в сторону съезда от главных путей станции (рис. 3.7) на расстояние, определяемое расчетом и схемой расположения токоприемников от оси крыши секции электровоза.

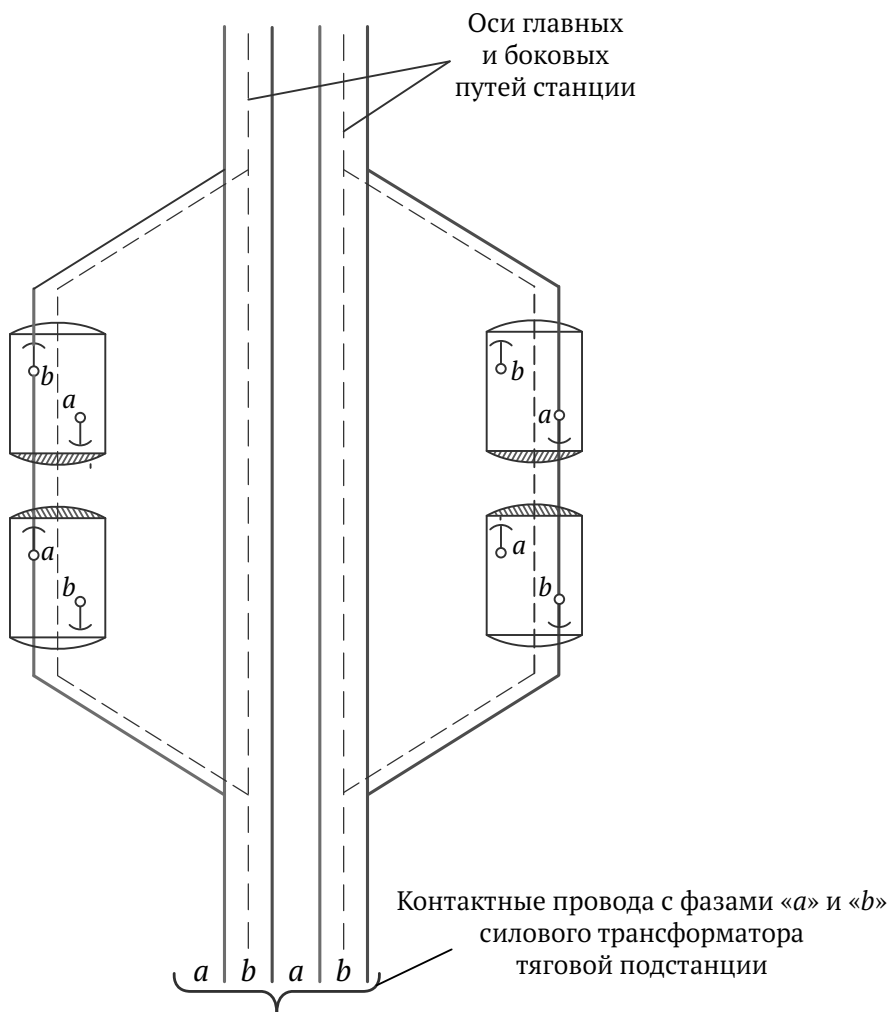


Рис. 3.7. Положение токоприемников и контактной подвески на боковых путях станции с несимметричным режимом работы системы тягового электроснабжения

Работа силового трансформатора тяговой подстанции в однофазном режиме «*a*» и «*c*» или «*b*» и «*c*» соответствует режиму работы силового трансформатора существующей системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ 50 Гц.

Съезд с главного пути станции на боковой путь с сохранением симметричного трехфазного режима работы схемы тягового электроснабжения производится в соответствии со схемой (рис. 3.8). Перевод питания с одного контактного провода, например КС1 одного пути, через контактный провод КС2 этого же пути должен производиться шлейфом (проводом) на повышенной высоте над контактными проводами этого пути.

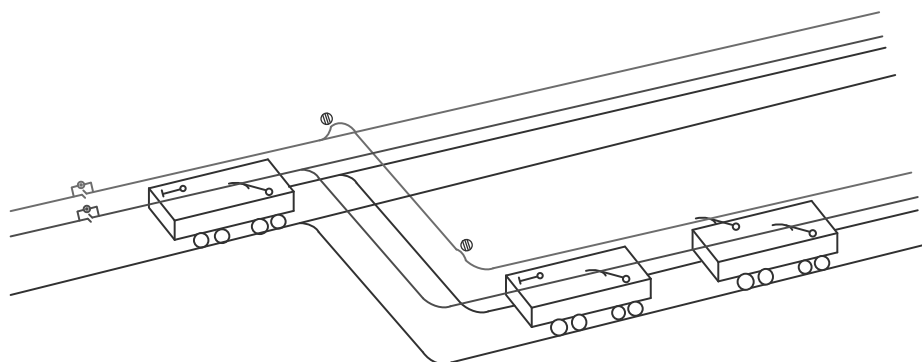


Рис. 3.8. Схема положения токоприемников и контактной сети при съезде на боковой путь с сохранением симметричного тягового электроснабжения

Если на боковых путях станций не требуются усиления мощности, т. е. допустима работа системы электрической тяги в однофазном режиме, то реконструкция контактной сети на боковых путях производится только в соответствии со схемой (см. рис. 3.7) и съезд с главных путей на боковые пути происходит в соответствии со схемой (см. рис. 3.6).

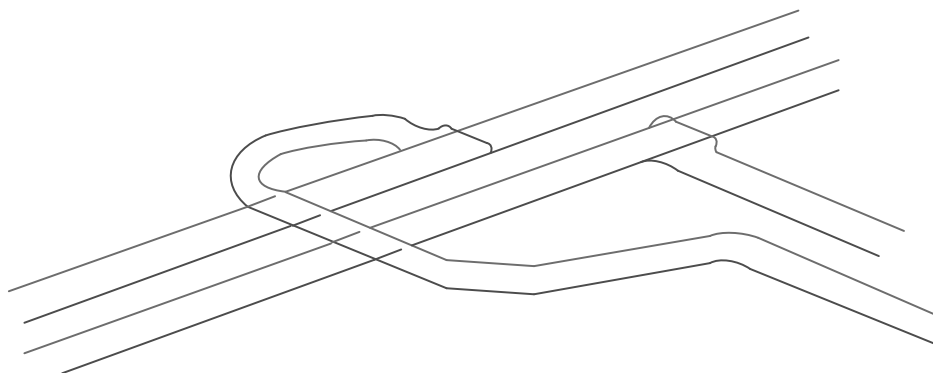


Рис. 3.9. Схема контактной сети главного хода одного направления и главного хода другого направления с симметричным режимом работы системы тягового электроснабжения

Отвод или пересечение главных путей двухпутного участка одного направления с главными путями двухпутного участка другого направления с сохранением симметричного режима должно производиться на различном уровне (рис. 3.9) путем использования мостов, эстакад или тоннелей.

На рис. 3.5–3.9 расположение контактных проводов и устройств токосъема (полоза токоприемника) представляется в горизонтальной плоскости, соответствует изобретению Фрэнка Дж. Спрэга 1888 года и используется в системе электрической тяги постоянного тока и однофазной системе переменного тока, обеспечивая токосъем «понижу». Эти же рисунки также представляют схемы с «боковым токосъемом».

Таким образом, представленные варианты схем питания тягового преобразовательного трансформатора электровоза от трехфазной системы тягового электроснабжения переменного тока позволяют обеспечить симметричный трехфазный и несимметричный однофазный режимы работы системы электрической тяги.

### 3.5. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ВЫБОР КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

#### 3.5.1. Краткие сведения о параметрах электрической контактной цепи системы однофазного переменного тока

Первоначально рассмотрим цепь (рис. 3.10) переменного тока с резистивным  $R$  и индуктивным  $X_L = \omega L$  [92–95] элементами.

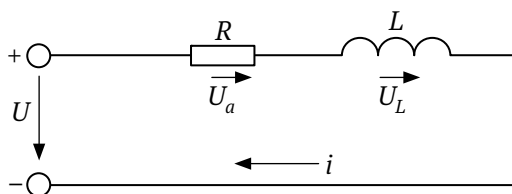


Рис. 3.10. Эквивалентная схема цепи резистивным и с индуктивным элементами

При протекании от источника напряжения бесконечной мощности синусоидального тока:

$$i = I_M \sin \omega t; \quad (3.1)$$

по закону Ома имеем активную составляющую (рис. 3.11, а):

$$u_a = iR = RI_M \sin \omega t = U_{aM} \sin \omega t \quad (3.2)$$

и ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (3.3)$$

По закону Ленца при увеличении тока, т.е. при  $\frac{di}{dt} > 0$ , ЭДС самоиндукции отрицательна и направлена встречно по направлению к току и, наоборот, при уменьшении тока  $\frac{di}{dt} < 0$ , ЭДС положительна и направлена согласно с током. В том и другом случае ЭДС препятствует возникновению изменения тока, создавая падение напряжения на индуктивности  $U_L$ .

По второму закону Кирхгофа:

$$u = u_a + u_L,$$

где индуктивная составляющая:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_M \sin \omega t)}{dt} = L \omega I_M \cos \omega t = X_L I_M \cos \omega t = U_{LM} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (3.4)$$

Обе составляющих напряжения  $U$  (рис. 3.11, а) изменяются по синусоидальному закону. Активная составляющая  $u_a$  совпадает по фазе с током, а индуктивная составляющая  $u_L$  опережает его на  $\frac{\pi}{2}$ .

Сумма слагаемых:

$$u = u_a + u_L = U_{aM} \sin \omega t + U_{LM} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.5)$$

определяет мгновенное значение синусоидального напряжения на зажимах цепи  $RL$  (рис. 3.11, б), опережающего по фазе ток на угол  $\varphi$ .

Амплитуда этого напряжения:

$$U_M = \sqrt{U_{aM}^2 + U_{LM}^2}$$

и действующее значение:

$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}} = \sqrt{\left( \frac{U_{aM}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left( \frac{U_{LM}}{\sqrt{2}} \right)^2} = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \quad (3.6)$$

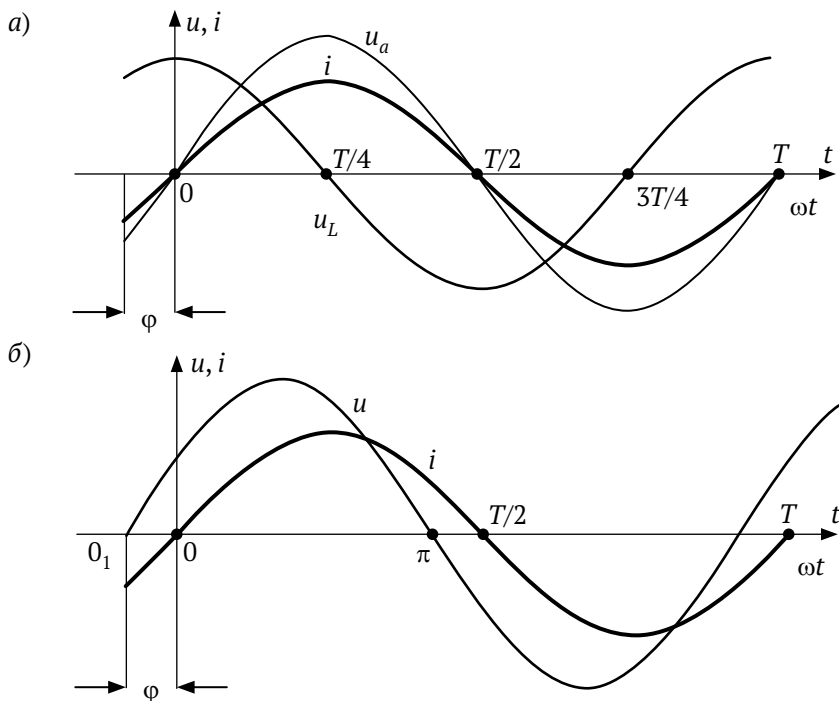


Рис. 3.11. График напряжения и тока цепи с активным сопротивлением и индуктивностью

Выражая составляющие напряжения через ток и сопротивления, получим формулу:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{(IR)^2 + (I\omega L)^2} = I\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = I \cdot Z, \quad (3.7)$$

соответствующую закону Ома для действующих значений тока и напряжения цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

В формуле величина

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (3.8)$$

полное сопротивление цепи без разделения его в тяговой сети отдельно на активное и индуктивное сопротивления.

В примере (см. рис. 3.10) ток в цепи  $i = I_M \sin \omega t$  имел нулевую начальную фазу (рис. 3.11, б), а напряжение на зажимах цепи опережало по фазе ток на угол  $\phi$ :

$$u = I_M Z \sin(\omega t + \phi) = U_M \sin(\omega t + \phi). \quad (3.9)$$

Угол сдвига фаз между напряжением и током:

$$\cos \varphi = \frac{u_a}{u} = \frac{IR}{IZ} = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{u_L}{u} = \frac{X_L}{Z}.$$

Мгновенная мощность в цепи с активным и индуктивным сопротивлениями:

$$p = ui = U_M \sin(\omega t + \varphi) I_M \sin \omega t. \quad (3.10)$$

Применяя правило преобразования произведения тригонометрических функций в сумму:

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)}{2},$$

получим

$$\begin{aligned} p &= U_M I_M \frac{\cos(\omega t + \varphi - \omega t) - \cos(\omega t + \varphi + \omega t)}{2} = \\ &= \frac{U_M I_M}{2} \cos \varphi - \frac{U_M I_M}{2} \cos(2\omega t + \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (3.11)$$

откуда следует, что мгновенная мощность электрической цепи (тяговой сети) с сопротивлением  $Z$  состоит из двух слагаемых: постоянной мощности  $UI \cos \varphi$  и переменной  $UI \cos(2\omega t + \varphi)$ , изменяющейся по гармоническому закону с двойной частотой.

Среднее значение переменной слагающей мощности за период, как гармонической функции, равно нулю. Поэтому средняя за период мощность цепи с активным и индуктивным сопротивлениями равна постоянной слагающей мгновенной мощности:

$$P = p_a = UI \cos \varphi \quad (3.12)$$

и представляет активную мощность этой цепи.

Учитывая, что  $u_a = U \cos \varphi$ , средняя мощность в активном сопротивлении:

$$P_a = U_a I = I^2 R. \quad (3.13)$$

Хотя среднее значение переменной слагающей мощности за период и равно нулю, но мгновенная мощность в индуктивном сопротивлении имеет место и равна:

$$\begin{aligned}
Q_L &= u_L i = U_{LM} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) * I_M \sin \omega t = \\
&= U_{LM} I_M \frac{\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \omega t\right) - \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \omega t\right)}{2} = \\
&= \frac{U_{LM} I_M}{2} \left[ \cos \frac{\pi}{2} - \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \right] = \frac{U_{LM} I_M}{2} \sin 2\omega t = \\
&= \frac{U_{LM} I_M}{2} \left[ 0 - \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \right] = U_L I
\end{aligned} \tag{3.14}$$

и изменяется с двойной частотой два раза за период, достигая положительного максимума  $U_L I = I^2 \omega L$  и два раза такого же по времени отрицательного максимума.

График мгновенной индуктивной  $p_L$ , активной  $p_a$  и полной  $p$  мощностей приведен на рис 3.12.

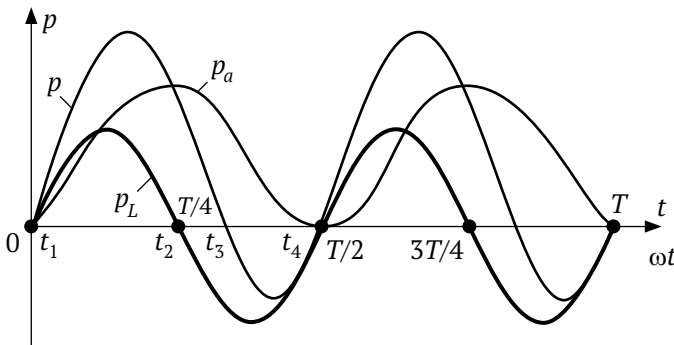


Рис. 3.12. График мощности цепи с активным сопротивлением и индуктивной катушкой

В первую четверть от 0 до  $\frac{T}{4}$  и в третью от  $\frac{T}{2}$  до  $\frac{3T}{4}$  четверть времени периода  $2\pi$  функция мгновенной мощности  $p_L$  положительна, и идет заряд энергией катушки:

$$W_L = \frac{LI^2}{2}. \tag{3.15}$$

Во вторую четверть от  $\frac{T}{4}$  до  $\frac{T}{2}$  и в четвертую от  $\frac{3T}{4}$  до  $T$  конца четверти и, соответственно, конца времени периода  $2\pi$  функция мгновенной

мощности отрицательна, и катушка отдает энергию, накопленную за предыдущую четверть периода:

$$Q_L = I^2 \omega L. \quad (3.16)$$

Следовательно, энергия периодически то забирается индуктивной катушкой от источника, то отдается ему обратно.

Реактивная энергия индуктивной мощности цепи (3.16) расходуется на создание магнитного поля элементов (генератора, трансформаторов, электрических моторов) изменением магнитной индукции  $B$  с петлей гистерезиса, сопровождающееся выделением тепловой энергии в магнитопроводах.

### 3.5.2. Токи и потери мощности в тяговых сетях однофазной и трехфазной систем электрической тяги

В основу расчета сечения и выбора проводов контактной подвески положено равенство расхода электрической энергии на тягу на электрифицированных участках железных дорог при существующей однофазной системе электрической тяги (ОСЭТ) переменного тока 25 кВ 50 Гц и перспективной трехфазной системе электрической тяги (ТСЭТ) 3×25 кВ 50 Гц.

Из этого следует, что мощности электровозов для двух систем электрической тяги должны быть приняты одинаковыми и равными мощности часового режима 8400 кВт грузового электровоза с асинхронными тяговыми двигателями (АТД) 2ЭС5 разработки Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского электровозостроения (ВЭлНИИ) [96]. Для грузового электровоза 2ЭС7 с мощностями на валах тяговых двигателей (АТД) максимальной 8800 кВт и продолжительного режима 8400 кВт разработки завода «Уральские локомотивы» с током часового режима 750 А.

На электровозах в каждой из двух секций при однофазной системе электрической тяги 25 кВ 50 Гц для питания 4-х АТД используется преобразовательный агрегат с тяговым трансформатором и 4-мя выпрямительными блоками с двухпульсовой однофазной мостовой схемой выпрямления, для которой мощность первичной обмотки тягового трансформатора:

$$S_1^{(1)} = U_1 I_1^{(1)} = \frac{U_{d0} \cdot K_T}{K_B} \cdot \frac{I_d \cdot n}{K_T} = \frac{U_{d0} \cdot I_d \cdot n}{0,9} = 1,11 P_d, \quad (3.17)$$



где  $U_1$  — фазное напряжение первичной обмотки тягового трансформатора;  
 $\kappa_T$  — коэффициент трансформации;  
 $\kappa_B$  — коэффициент выпрямления, равный 0,9;  
 $U_{d0}$  — выпрямленное напряжение холостого хода;  
 $I_d$  — ток нагрузки выпрямительного блока питания одного АТД;  
 $n$  — число АТД одной секции электровоза, равное 4-м;  
 $P_d$  — мощность одной секции электровоза, откуда действующее значение однофазного тока в первичной обмотке тягового трансформатора одной секции электровоза равно

$$I_1^{(1)} = \frac{1,11P_d}{U_1}. \quad (3.18)$$

Ток в проводах контактной подвески соответствует току электровоза, состоящему из двух секций, и равен

$$I_{13}^{(1)} = 2 \frac{1,11P_d}{U_1}. \quad (3.19)$$

На электровозах в каждой из двух секций при трехфазной системе электрической тяги  $3 \times 25$  кВ 50 Гц для питания 4-х АТД используется преобразовательный агрегат с тяговым трансформатором и четырьмя выпрямительными блоками с шестипульсовой трехфазной мостовой схемой выпрямления, для которой мощность первичной обмотки тягового трансформатора:

$$S_1^{(3)} = 3U_1 I_1^{(3)} = 3 \frac{U_{d0} \cdot \kappa_T}{\kappa_B} \cdot \frac{I_d \cdot n}{\kappa_T} \sqrt{\frac{2}{3}} = 1,05P_d, \quad (3.20)$$

где  $\kappa_B$  — коэффициент выпрямления, равный 2,34, откуда действующее значение тока в одной фазе трехфазной первичной обмотке тягового трансформатора одной секции электровоза равно:

$$I_1^{(3)} = \frac{1,05P_d}{3U_1} = \frac{0,35P_d}{U_1}. \quad (3.21)$$

и двух секций электровоза, соответственно:

$$I_{13}^{(3)} = 2 \frac{0,35P_d}{U_1}. \quad (3.22)$$

Соотношение токов в контактной сети двух систем электрической тяги:

$$\frac{I_{1\text{Э}}^{(1)}}{I_{1\text{Э}}^{(3)}} = \frac{2 \cdot 1,11 P_d / U_1}{2 \cdot 0,35 P_d / U_1} = \frac{1,11}{0,35} = 3,17. \quad (3.23)$$

показывает, что ток в контактной сети однофазной системы электрической тяги в 3,17 раз больше, чем фазный ток в каждой фазе *a* и *b* контактной сети и тягового рельса фазе *c* трехфазной системы электрической тяги.

Потери электрической энергии в тяговой сети (контактная сеть + тяговый рельс):

$$\Delta A_{\text{тс}} = I_{1\text{Э}}^2 R \cdot t_{\text{т}}, \quad (3.24)$$

где  $I_{1\text{Э}}$  — ток контактной сети системы ОСЭТ —  $I_{1\text{Э}}^{(1)}$ ;

в контактной сети системы ТСЭТ —  $I_{1\text{Э}}^{(3)}$ ;

$R_{\text{тс}} = (R_{\text{нт}}, R_{\text{к}}, R_{\text{тр}})$  — активное сопротивление тяговой сети (несущего троса + контактного провода + тягового рельса) системы ОСЭТ  $R^{(1)}$ ;

$R_{\text{тр}}$  — активное сопротивление тяговой сети одной фазы *a* или *b* (контактного провода + тягового рельса) системы ТСЭТ  $R^{(3)}$ ;

$t_{\text{т}}$  — время движения под током.

Без учета активных сопротивлений питающих сетей потери электрической энергии в тяговой сети определяются в основном величиной тока в проводах контактной сети (контактном проводе и несущем тросе), а точнее определяются токами  $I_1^2$ .

Соотношение потерь электрической энергии в тяговой сети двух схем электрической тяги с учетом формул (3.19) и (3.22):

$$\frac{(I_{1\text{Э}}^{(1)})^2}{(I_{1\text{Э}}^{(3)})^2} = \frac{1,11^2}{0,35^2} = \frac{1,2321}{0,3675} = 3,35 \quad (3.25)$$

показывает, что потери электрической энергии в контактной сети однофазной системы электрической тяги в 3,35 раз больше, чем в трехфазной системе электрической тяги.

### 3.5.3. Характеристики контактных подвесок и показатели серий электровозов, используемые при предварительном выборе контактной подвески трехфазной системы электрической тяги

Учитывая, что в однофазной системе электрической тяги ОСЭТ и в трехфазной системе электрической тяги ТСЭТ ток электровоза протекает по тяговым рельсам одного типа, удельное активное и реактивное сопротивление которых невелико и составляет, например, для рельса Р65 двухпутного участка соответственно 0,055 и 0,138 Ом/км, то величины сопротивлений  $R$  в формуле (3.24) в основном зависят от типа контактных подвесок в рассматриваемых системах.

Ряд существующих в системе ОСЭТ типов контактных подвесок с удельными величинами сопротивлений, допустимыми токами и количеством электровозов на зоне питания с контактной подвеской, приведены в табл. 3.1.

Количество электровозов в зоне контактной подвески равно отношению длительно допустимого тока контактной подвески к часовому току электровоза.

Определение токов нагрузки контактной подвески производится по результатам электрических расчетов трехфазной системы электрической тяги электрифицированных участков с использованием программы комплексного расчета системы однофазного переменного тока «FASONODR» с учетом дополнения программы расчета.

Приведем предварительный расчет тока нагрузки контактной подвески системы ТСЭТ с учетом существующих в системе ОСЭТ типов контактных подвесок и эксплуатируемых на электрифицированных участках типов электровозов (табл. 3.2).

В системе ТСЭТ для расчета фазного тока (тока в каждом контактном проводе и в тяговом рельсе) принимаем ток часового режима 380 А электровоза ВЛ80<sup>р</sup>, имеющего мощность часового режима 6420 кВт (табл. 3.2). Примем также, что на зоне могут одновременно находиться четыре поезда.

Если в существующей ОСЭТ применяется контактная подвеска ПБСМ-70 + МФ-100, допустимый ток которой составляет  $I_{\text{доп}} = 670$  А (табл. 3.1), то на зоне могут находиться не более двух мощных электровозов. Контактная подвеска М-120+2МФ-100 допускает ток 1780 А и, соответственно, большее

Таблица 3.1

## Характеристики контактных подвесок

Провода контактной подвески	Площадь эквивалентного сечения по меди, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток, А		Электрическое сопротивление 1км подвески постоянному току, Ом	Количество электро-возов переменного тока с часовым током 380 А в зоне контактной подвески	Нагрузка от веса провода g, даН/м
		постоянный	переменный			
ПБСА-50/70+МФ-85	112/101	600	–	–	–	0,65±0,76
ПБСА-50/70+МФ-100	127/120	710	750	–	1,97	0,65±0,89
ПБСМ-70+МФ85	109/104	660	623	0,169	1,69	0,6±0,76
ПБСМ-70+МФ100	124/118	710	670	0,163	1,76	0,6±0,89
ПБСМ-95+МФ100	133/128	800	740	0,135	1,95	0,77±0,89
ПБСМ-95+2МФ100	233/224	1340	1250	0,0773	3,78	
М-120+МФ-100	220/215	–	1280	0,0835	3,37	
М-120+2МФ-100	320/310	1880	1780	0,0615	4,68	
М-120 + 2МФ-100+А-185	432/418	2510	1840	0,0425	4,84	
МФ-100	100	600	600	0,177		0,89
МФ-150	150	750	–	0,118		1,34
БрФ-100*	100**					0,89
БрФ-120*	120**			0,206		

Примечание: \* скорость движения до 250 км/ч включительно, \*\* площадь поперечного сечения S, мм<sup>2</sup>.

## Показатели серий электровозов

Наименование показателей	Значение показателей электровозов										
	грузовых					пассажирских					
	ВЛ60 <sup>к</sup> , ВЛ60 <sup>р</sup>	ВЛ80 <sup>к</sup> , ВЛ80 <sup>т</sup> , ВЛ80 <sup>с</sup>	ВЛ80 <sup>р</sup>	ВЛ82 <sup>м</sup>	ВЛ60 <sup>ч</sup>	ЧС4, ЧС4 <sup>т</sup>	ЭП10 (перспектива)	ЭП2000 (перспектива)			
Род тока	переменный					постоянный/ переменный					переменный
Напряжение в контактной сети, кВ	25					3/25					25
Число и мощность, кВт, тяговых двигателей	6×775	8×790	8×790	6×775	6×775	6×775	6×850	6×1100 (асинхрон- ный привод)	8×975 (синхрон- ный привод)		
Часовой режим:											
сила тяги, кН	312	440	440	396	223	175					
скорость, км/ч	52,5	51,9	52,5	52,5/53,0	73,5	104,5					
Продолжительный режим:											
сила тяги, кН	259	400	400	373	185	161					
скорость, км/ч	56,2	53,6	54,4	53,6/54,0	78,7	106,5					
Ток электровоза I, А:											
наибольший при пуске	324	427	498	2900/425	394	412					
расчетный при пуске	308	356	470	2800/408	376	412					
расчетного режима	248	320	378	2530/374	—	—					
часового режима	250	350	380	2140/327	250	290					
продолжительного режима	220	318	360	2040/310	220	280					
Мощность часового режима (на ободе колеса), кВт	4550	6350	6420	5780/5830	4550	4900	6600 (длит.)	7800 (длит.)			

Примечание. Перспективные электровозы ЭП10 и ЭП2000 не вышли в серийное производство по причине высокой стоимости.

количество  $\left(\frac{1780}{380} = 4,68\right)$  электровозов на зоне. Учитывая соотношение токов в контактной подвеске двух систем (3.23), ток в контактной подвеске системы ОСЭТ практически в 3 раза больше тока в контактном проводе одной фазы системы ТСЭТ, поэтому можно принять за расчетный ток контактных проводов в системе ТСЭТ ток  $1780/3=593$  А и — соответствующую контактную подвеску, введенную с 1 января 1986 г., ПБСМ-70+МФ-100 ( $I_{\text{доп}} = 670$  А). Вместо провода МФ-100 рекомендован контактный провод НЛО 0,04–100, электрические параметры которого близки к параметрам провода МФ-100.

Предварительное рассмотрение типа контактной подвески для системы ТСЭТ показывает, что по токовым нагрузкам может быть принята контактная подвеска ПБСМ-70+МФ-100 с возможностью использования в системе ТСЭТ других вариантов типов контактного провода и контактной подвески.

### **3.6. ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ**

1. Трехфазная система с двумя контактными проводами и тяговым рельсом может быть реализована при горизонтальном и вертикальном расположении полоза двух токоприемников относительно контактных проводов с блоками совместного или отдельного их подъема и опускания.

2. Рассмотрены варианты положения токоприемников при движении по перегону, по главному пути станции и при движении по боковым путям.

3. Потери электрической энергии в контактной сети однофазной системы электрической тяги в 3,35 раз больше, чем в трехфазной системе электрической тяги.

# РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ В СИММЕТРИЧНОМ И НЕСИММЕТРИЧНОМ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

## 4.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 4.1.1. Общие замечания и постановка задачи

Электрическая схема трехфазной системы электрической тяги состоит из трехфазной системы тягового электроснабжения (СТЭ) и трехфазного электроподвижного состава (ЭПС) — в дальнейшем «электровоз».

В систему СТЭ (рис. 4.1) входят: на тяговой подстанции трехфазный силовой трансформатор ТС; контактная сеть, состоящая из двух цепей проводов контактной подвески КП1, КП2 и третьей цепи — тяговый рельс ТР.

Система ЭПС состоит из трехфазного трехобмоточного преобразовательного тягового (в дальнейшем тягового) трансформатора ТТ, выпрямительно-инверторного блока ВИБ и тяговых электродвигателей ТЭД. Выпрямительно-инверторный блок, тяговые электродвигатели и третья обмотка трансформатора со схемой соединения «треугольник», предназначенная для питания вспомогательных машин электровоза, на рис. 4.1 не показаны.

При разработке и применении на электрифицированных участках железных дорог трехфазной системы электрической тяги переменного тока возникает производственная необходимость работы трехфазной системы на перегонах и на главных и боковых путях станций в симметричном трехфазном режиме и в несимметричном однофазном режиме. При работе трехфазной системы электрической тяги переменного тока в симметричном и в несимметричном режимах рассмотрены электромагнитные процессы в трансформаторах с использованием их основных соотношений и методов расчета электрических цепей [92–95].

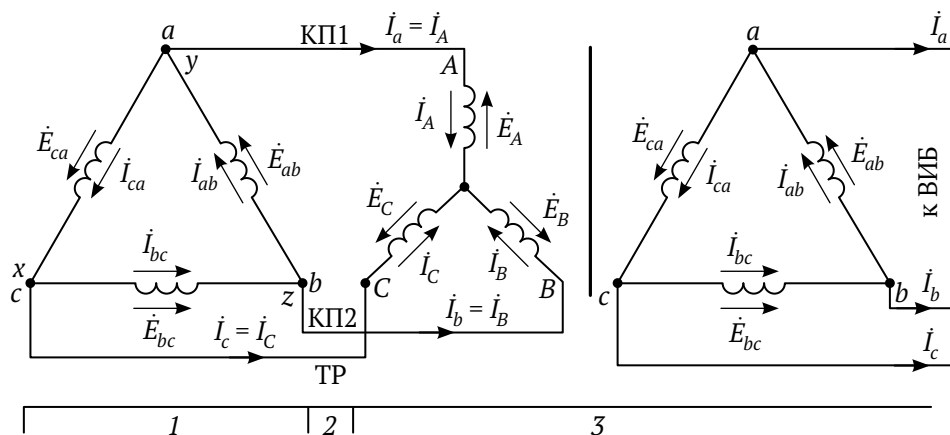


Рис. 4.1. Упрощенная электрическая схема  
 трехфазной системы тягового электроснабжения переменного тока:  
 1 — вторичная обмотка трехфазного силового трансформатора СТ;  
 2 — тяговая сеть ТС; 3 — преобразовательный тяговый трансформатор ТТ

#### 4.1.2. Симметричный режим работы трехфазной системы тягового электроснабжения

С учетом находящейся в эксплуатации существующей однофазной системы переменного тока 25 кВ 50 Гц, в рассматриваемой трехфазной системе тягового электроснабжения (рис. 4.1) в силовом трансформаторе на тяговой подстанции и в тяговом трансформаторе на электровозе принимается соединение обмоток по схеме «звезда-треугольник». Известно, что при таком соединении обмоток во вторичных линейных и фазных токах трансформатора отсутствуют составляющие нулевой последовательности и для них справедливы равенства

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0, \quad (4.1)$$

$$\dot{I}_{ab} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{ca} = 0, \quad (4.2)$$

при этом линейные и фазные токи связаны равенствами

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (4.3)$$



Решая совместно уравнения (4.2) и (4.3), получим значения фазных токов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{ab} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_a - \dot{I}_b) \\ \dot{I}_{bc} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_b - \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{ca} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_c - \dot{I}_a) \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

На рис. 4.2 показана векторная диаграмма линейных и фазных токов вторичной обмотки, соединенной в «треугольник», соответствующих уравнениям (4.1)–(4.4), из которой следует, например, что  $\dot{I}_{ab} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a - \dot{I}_b)$ . Также из векторной диаграммы видно, что при соединении обмотки в «треугольник» центр звезды фазных токов совпадает с центром звезды линейных токов.

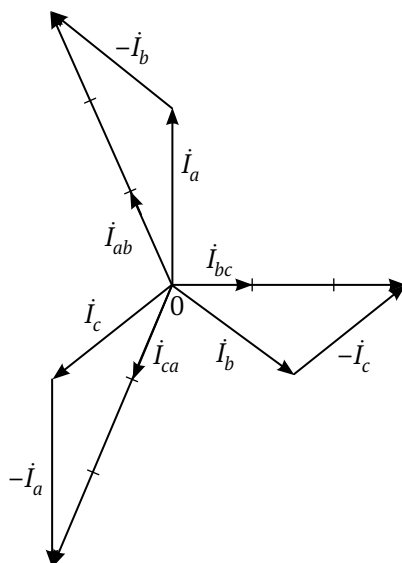


Рис. 4.2. Векторная диаграмма фазных и линейных токов во вторичной обмотке трансформатора в симметричном режиме работы трехфазной системы электрической тяги

Аналогичные соотношения можно установить между фазными и линейными первичными и вторичными напряжениями трансформаторов, которые при наличии магнитного равновесия токов в каждой фазе связаны между собой. На рис. 4.3 представлена электрическая схема замещения трансформатора, в соответствии с которой и с основными соотношениями трансформатора следует:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \frac{w_2}{w_1} \dot{I}_1 + \dot{I}'_2, \quad (4.5)$$

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_0 - \dot{I}_1. \quad (4.6)$$

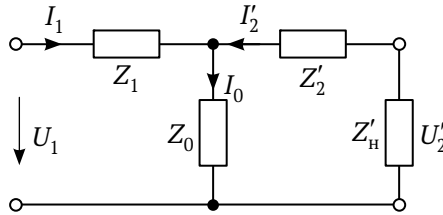


Рис. 4.3. Электрическая схема замещения трансформатора

Пренебрегая током холостого хода  $\dot{I}_0$  ввиду его незначительной величины по сравнению с током  $\dot{I}_1$ , получим

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_1.$$

Согласно второму закону Кирхгофа по схеме рис. 4.3:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 z_1 - \dot{I}'_2 z'_2 - \dot{I}'_2 z'_н;$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 z_1 + \dot{I}_1 z'_2 - \dot{I}'_2 z'_н;$$

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 (z_1 + z'_2) - \dot{I}'_2 z'_н;$$

$$\dot{U}_1 - \dot{I}_1 (z_1 + z'_2) + \dot{I}'_2 z'_н = 0; \quad (4.7)$$

$$\dot{U}_1 - \dot{I}_1 z_к = -\dot{U}'_2, \quad (4.8)$$

где  $z_к = z_1 + z'_2$  — полные сопротивления: короткого замыкания  $z_к$ ; первичной обмотки  $z_1$ ; вторичной обмотки  $z'_2$ , приведенное к первичной обмотке.

В соответствии с выражением (4.8) соотношения между первичными и вторичными напряжениями каждой фазы могут быть представлены равенствами:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A \cdot z_к = -\dot{U}'_a;$$

$$\dot{U}_B = \dot{I}_B \cdot z_к = -\dot{U}'_b;$$

$$\dot{U}_C = \dot{I}_C \cdot z_к = -\dot{U}'_c.$$

$$(4.9)$$

Известно, что если одна из обмоток (например, вторичная) соединена в «треугольник», то сумма фазных ЭДС в ней равна нулю:

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = \mathbf{0}; \quad (4.10)$$

и, учитывая равенства (4.2) и (4.9), сумма фазных ЭДС в другой обмотке, соединенной независимо в «звезду» или в «треугольник», также равна нулю: для схемы «звезда»:

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = \mathbf{0}; \quad (4.11)$$

для схемы «треугольник»:

$$\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = \mathbf{0}.$$

В обмотке, соединенной в «звезду» (в рассматриваемой системе в «звезду» соединены первичные обмотки высшего напряжения трансформаторов), линейные и фазные ЭДС связаны известными равенствами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{AB} &= \dot{E}_A - \dot{E}_B; \\ \dot{E}_{BC} &= \dot{E}_B - \dot{E}_C; \\ \dot{E}_{CA} &= \dot{E}_C - \dot{E}_A. \end{aligned} \right\} \quad (4.12)$$

Из решения равенств (4.11) и (4.12) получим фазные ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= \frac{1}{3}(\dot{E}_{AB} - \dot{E}_{BC}) \\ \dot{E}_B &= \frac{1}{3}(\dot{E}_{BC} - \dot{E}_{CA}) \\ \dot{E}_C &= \frac{1}{3}(\dot{E}_{CA} - \dot{E}_{AB}) \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Во вторичной обмотке силового трансформатора, соединенной в «треугольник» (рис. 4.4), центр тяжести «треугольника» линейных ЭДС совпадает с центром «звезды» фазных ЭДС этой же обмотки.

К фазам  $A$ ,  $B$  и  $C$  первичной обмотки тягового трансформатора подводятся соответственно линейные ЭДС  $E_{ab}$ ,  $E_{bc}$ ,  $E_{ca}$  вторичной обмотки силового трансформатора, а с учетом сопротивлений вторичных обмоток и питающих линий — напряжения  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$ .

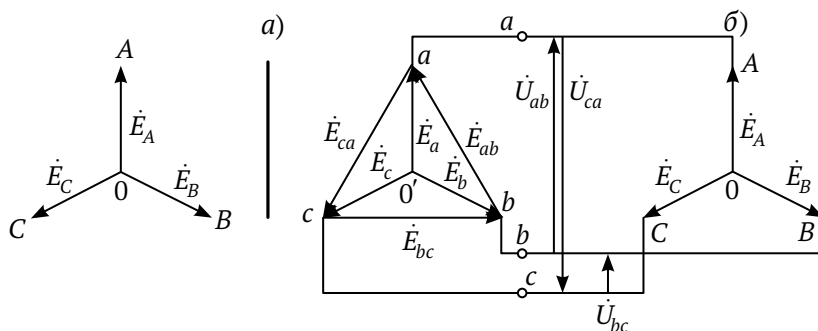


Рис. 4.4. Векторная диаграмма фазных и линейных ЭДС трансформаторов:  
*a* — первичной и вторичной обмоток силового трансформатора;  
*б* — первичной обмотки тягового трансформатора

Нагрузкой тягового трансформатора является трехфазный мостовой выпрямительный блок. Полные сопротивления фаз тягового трансформатора с учетом сопротивлений нагрузки каждой фазы  $Z = Z_1 + Z_2' + Z_H$  равны между собой

$$Z_A = Z_B = Z_C. \quad (4.14)$$

Если система питающих напряжений  $\dot{U}_{ab}$ ,  $\dot{U}_{bc}$  и  $\dot{U}_{ca}$  является симметричной, то при одинаковом сопротивлении фаз приемника  $Z_A = Z_B = Z_C$  система токов  $\dot{I}_A$ ,  $\dot{I}_B$  и  $\dot{I}_C$  также будет симметричной.

Известно, что симметрия векторов токов (напряжений) может быть показана с использованием «оператора трехфазной системы *a*» — комплексное число  $e^{j2\pi/3} = e^{j120^\circ}$  по модулю, равное единице.

Умножение какого-либо вектора на *a* поворачивает его без изменения модуля на угол  $120^\circ$  против часовой стрелки, тогда  $a^2 = (e^{j120^\circ})^2 = e^{j240^\circ}$  и система токов будет представлена в виде

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_A + \dot{I}_A \cdot a^2 + \dot{I}_A \cdot a = \dot{I}_A(1 + a^2 + a), \quad (4.15)$$

где система векторов  $(1 + a^2 + a) = 0$ .

Тогда система векторов

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0 \quad (4.16)$$

является симметричной и обеспечивает равенство потенциалов нейтральных точек *O* тягового трансформатора и *O'* «воображаемого» силового трансформатора.

При симметричном режиме принято, что расчет трехфазной системы сводится к расчету одной фазы. В рассматриваемой системе интересна в первую очередь мощность трехфазных трансформаторов, которая в симметричном трехфазном режиме равна

$$S_T = 3U_\phi I_\phi = 3 \frac{U_\phi}{\sqrt{3}} \cdot I_\phi = \sqrt{3} U_\phi I_\phi, \quad (4.17)$$

где  $U_\phi$  — фазное напряжение первичных обмоток трансформатора  $\dot{E}_A = \dot{E}_B = \dot{E}_C$ ;  $I_\phi$  — фазные токи первичных обмоток  $\dot{I}_A = \dot{I}_B = \dot{I}_C$  трансформатора равны между собой и заданы характером симметричной нагрузки — системой линейных токов  $\dot{I}_a, \dot{I}_b$  и  $\dot{I}_c$  вторичной обмотки тягового трансформатора.

#### 4.1.3. Несимметричный режим работы трехфазной системы тягового электроснабжения

Несимметричный режим работы трехфазной системы тягового электроснабжения наступает при разрыве контактного провода питания одной из фаз первичной обмотки (фазы  $B$  или фазы  $A$ ) тягового трансформатора или возникающего при вынужденном отключении токоприемника от контактного провода КП2 или КП1 (в дальнейшем разрыв питания).

На рис. 4.5 представлена электрическая схема соединения силового трансформатора с тяговым трансформатором при наличии разрыва провода питания фазы  $B$  тягового трансформатора.

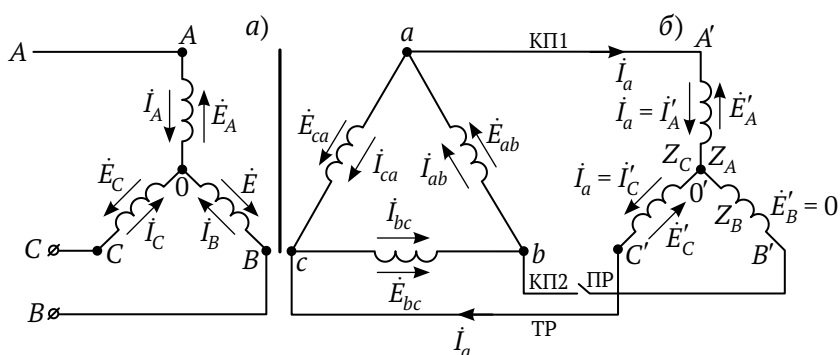


Рис. 4.5. Электрическая принципиальная схема силового и тягового трансформаторов в неполнофазном режиме:  $a$  — первичная и вторичная обмотки силового трансформатора;  $б$  — первичная обмотка тягового трансформатора

Между точками  $b$  (вывод вторичной обмотки силового трансформатора) и нейтралью  $0$  тягового трансформатора находится, с учетом разрыва цепи питания, «вынужденное» сопротивление  $Z'_B = \infty$  с проводимостью  $Y'_B = 1/Z'_B = 0$ , откуда напряжение  $U_B$  и ток  $I_B$  в фазе равны нулю.

К тяговому трансформатору от вторичной обмотки  $ac$  силового трансформатора, пренебрегая сопротивлениями контактной подвески КП1 и тягового рельса ТР, подается напряжение, равное линейной ЭДС  $\dot{E}_л = \dot{E}_{ca}$ .

Сопротивления  $Z_A$  и  $Z_C$  двух обмоток тягового трансформатора равны между собой, в рассматриваемом случае соединены последовательно, к ним приложено с учетом сопротивлений КП1 и ТР напряжение  $\dot{U}'_{CA}$ . На каждом из этих сопротивлений будет напряжение  $\dot{U}'_{CA} / 2$ , нейтраль тягового трансформатора (точка  $0$ ) на топографической диаграмме будет расположена на середине вектора (рис. 4.6) в точке  $0'$ , т.е. произойдет смещение нейтрали.

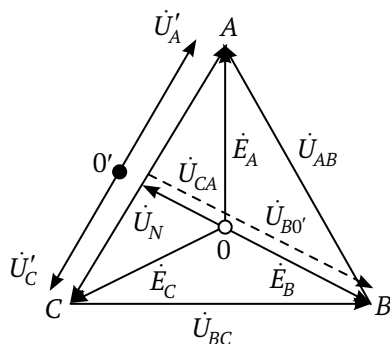


Рис. 4.6. Топографическая диаграмма цепи питания первичной обмотки тягового трансформатора, изображенной на рис. 4.5

Из диаграммы видно, что смещение нейтрали равно

$$\dot{U}_N = \dot{U}_{0'0} = -\dot{E}_B / 2$$

Напряжение в месте разрыва цепи питания фазы  $B$  (КП2-ПР) или равное ему напряжение между точками  $B$  и  $0'$

$$\dot{U}_{B0'} = \dot{E}_B - U_N = \dot{E}_B - (-\dot{E}_B / 2) = \frac{3}{2} \dot{E}_B. \quad (4.18)$$

Учитывая, что  $Z_A = Z_C$ , ( $Y_A = Y_C$ ),  $\dot{E}_A + \dot{E}_C = -\dot{E}_B$ , и применив «метод узлового напряжения», напряжение нейтрали можно определить по формуле

$$\dot{U}_N = \frac{\sum \dot{E}Y}{\sum Y} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B 0 + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + 0 + Y_C} = \frac{Y_A (\dot{E}_A + \dot{E}_C)}{2Y_A} = \frac{\dot{E}_A + \dot{E}_C}{2} = -\frac{\dot{E}_B}{2}. \quad (4.19)$$

Получено то же смещение нейтрали  $\dot{U}_N$ , что и по топографической диаграмме.

Таким образом, при разрыве цепи питания фазы *B* тягового трансформатора в трехфазной системе тягового электроснабжения (см. рис. 4.5) на оставшиеся с цепью питания фазы *A* и *C* тягового трансформатора от вторичной обмотки силового трансформатора подводится линейное напряжение  $U_{ac}$ , при этом на каждую первичную обмотку фаз *A* и *C* тягового трансформатора подводятся напряжения соответственно  $\dot{U}_A$  и  $\dot{U}_C$  (см. рис. 4.6), равные  $\dot{U}_{CA}/2 = \dot{U}_л/2$ , т.е. половина линейного напряжения вторичной обмотки (от отводов *a-c*) силового трансформатора, являющегося, по сути, для тягового трансформатора с изолированной нейтралью однофазным напряжением. Откуда следует, что трехфазная система электроснабжения с тяговым трансформатором с изолированной нейтралью при разрыве провода питания одной фазы первичной обмотки превращается в однофазную систему с общими методами расчета цепей синусоидального тока.

При симметричном режиме на фазы *A*, *B* и *C* (см. рис. 4.4) первичной обмотки тягового трансформатора поступают от силового трансформатора, с учетом сопротивлений вторичных обмоток и питающих линий, линейные напряжения  $\dot{U}_л = \dot{U}_{ab} = \dot{U}_{bc} = \dot{U}_{ca}$ , а на каждую фазу — соответственно  $U_л/\sqrt{3}$ .

Разрыв питания одной из фаз первичной обмотки тягового трансформатора электровоза, соединенной по схеме «звезда», вызывает снижение до нуля тока и напряжения на этой фазе и уменьшение тока и напряжения на двух других фазах первичной обмотки тягового трансформатора в

$$\frac{U_л / \sqrt{3}}{U_л / 2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{ раз} \quad (4.20)$$

или на  $\frac{U_л / \sqrt{3} - U_л / 2}{U_л / \sqrt{3}} 100\% = \frac{1/\sqrt{3} - 1/2}{1/\sqrt{3}} 100\% = 13,4\%$ .

В схеме соединения обмоток трансформатора *Y/Y*, при разрыве питания одной фазы, схема питания и величина сопротивления нагрузки других фаз не изменяются, поэтому ток, как и напряжение, снижается также в  $2/\sqrt{3}$  раза.

Во вторичной обмотке трансформатора, соединенной по схеме «звезда», в обмотке фазы, соответствующей фазе первичной обмотки с «разрывом» провода питания, напряжение и ток, так же как и в первичной обмотке, снижаются до нуля. В обмотках других фаз также происходит уменьшение напряжения и тока, как и в первичной обмотке, в  $2/\sqrt{3}$  раз.

Во вторичной обмотке трансформатора, соединенной по схеме «треугольник» в обмотке фазы, соответствующей фазе первичной обмотки с «разрывом» провода питания, напряжение снижается до нуля. Напряжение холостого хода (ЭДС) в обмотках фаз снижается, как и в фазах схемы соединения обмоток  $Y/Y$ , в  $2/\sqrt{3}$  раз. В таком же соотношении ( $2/\sqrt{3}$ ) должны уменьшаться и токи в других фазах, но в схеме соединения вторичной обмотки «треугольник» изменяется схема питания и изменяется величина сопротивления нагрузки, что приводит к уменьшению токов в других фазах более чем в  $2/\sqrt{3}$  раз. Рассмотрим подробнее такое положение.

На рис. 4.7 представлена схема трехфазного трехстержневого трансформатора с направлением магнитных потоков в стержнях магнитопровода и токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора при обрыве провода питания одной фазы  $B$  или  $A$  первичной обмотки, а на рис. 4.8 — принципиальная электрическая схема тягового преобразовательного агрегата с разрывом питания фазы  $B$  первичной обмотки тягового трансформатора.

В стержнях фаз  $B$  (рис. 4.7, *a*) или  $A$  (рис. 4.7, *б*) магнитопровода суммарный магнитный поток от двух встречно направленных магнитных потоков  $\Phi_A$  и  $\Phi_C$  (рис. 4.7, *a*) или  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$  (рис. 4.7, *б*) равен нулю. Соответственно, равна нулю и ЭДС во вторичной обмотке фазы  $bu$  или  $ax$ . В дальнейшем приведена для пояснения схема 4.7, *a*.

К объяснению снижения тока в катушках других фаз за счет исключения из работы трансформатора одной фазы добавляется дополнительное снижение тока за счет включения в однофазный контур ЭДС каждой из оставшихся фаз дополнительной нагрузки фазы вторичной обмотки, соответствующей фазе первичной обмотки с оборванным проводом питания.

На рис. 4.7 ЭДС каждой из двух обмоток  $ax$  и  $cz$  нагружены на сопротивления нагрузки соответственно  $(z_{на} + z_{nb})$  и  $(z_{nc} + z_{на})$ , соединенные по схеме «звезда».



## Основные соотношения трансформатора

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 = \dot{U}_{ca} = \dot{I}_1(Z_A + Z_C) - (\dot{E}_A + \dot{E}_C) \\ E'_{ax} = I'_{ax}Z'_{ax} + I'_{ax}(Z'_{hb} + Z'_{ha}) \\ E'_{cz} = I'_{cz}Z'_{cz} + I'_{cz}(Z'_{hc} + Z'_{ha}) \end{aligned} \right\}, \quad (4.21)$$

где:  $U_{ax} = I_{ax}(Z_{hb} + Z_{ha})$ ,  $U_{cz} = I_{cz}(Z_{hc} + Z_{ha})$ .

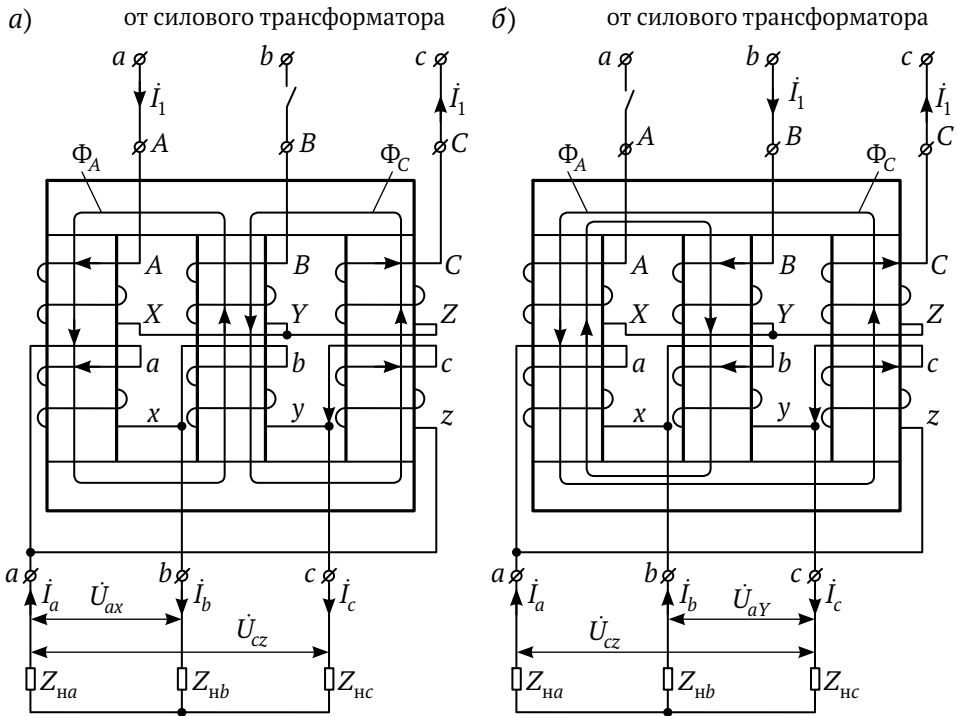


Рис. 4.7. Магнитные потоки в магнитопроводе и токи в обмотках трехфазного трансформатора с разрывом питания фазы первичной обмотки: а — фазы В; б — фазы А

На рис. 4.8 ЭДС каждой из двух обмоток  $ax$  и  $cz$  нагружены на сопротивление нагрузки постоянного тока  $Z_H$  через два двухпульсовых мостовых выпрямителя с одним общим анодно-катодным плечом трехфазного диодного моста.

На рис. 4.7 и 4.8 при переходе трансформатора из трехфазного режима работы в однофазный режим изменяется схема питания нагрузки каждой из оставшихся двух фаз вторичной обмотки.

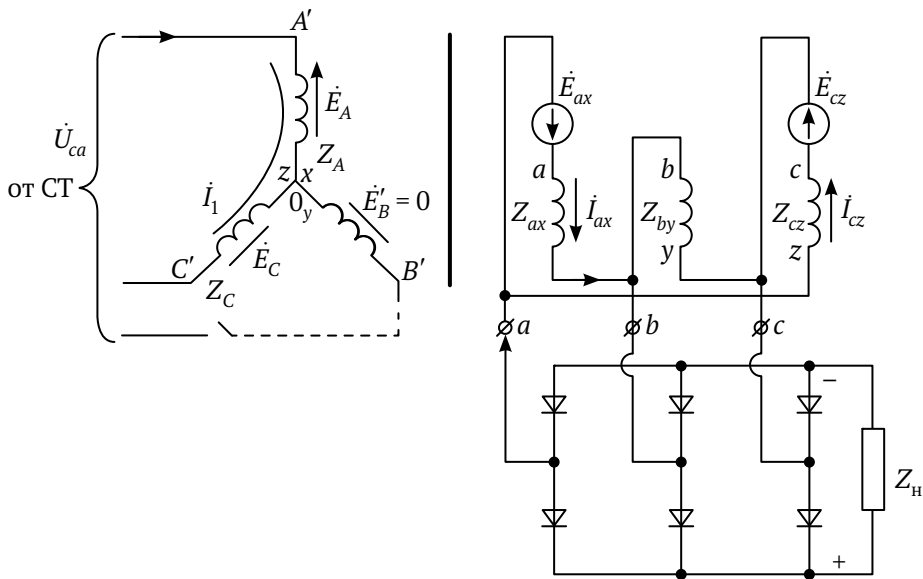


Рис. 4.8. Принципиальная электрическая схема преобразовательного агрегата с разрывом питания фазы *B* первичной обмотки трансформатора

Следует иметь в виду, что трехфазная система питания тягового трансформатора при разрыве провода одной фазы, как отмечено ранее, переходит в режим работы однофазной системы. От вторичной обмотки силового трансформатора тяговой подстанции подается линейное напряжение, например  $\dot{U}_{ca}$  при разрыве провода КП2 (см. рис. 4.5), но для двух последовательно соединенных катушек первичной обмотки тягового трансформатора с сопротивлениями  $Z_A$  и  $Z_C$  (см. рис. 4.7 и 4.8) это напряжение является обычным однофазным напряжением. Токи вторичной обмотки тягового трансформатора (с разрывом питания одной фазы первичной обмотки) хотя и обозначенные в схемах и в формулах соотношений комплексной величиной  $\dot{I} = I \cdot e^{j\varphi}$ , но в однофазной системе представляются модулем (действительным значением) синусоидально изменяющейся величиной без оператора трехфазной системы  $e^{j2\pi/3}$ .

Изменение тока в фазах вторичной обмотки происходит в соответствии с законом электромагнитной индукции (две катушки на одном сердечнике магнитопровода) и расчету разветвленной цепи однофазного переменного тока.

Таким образом:

1. Трехфазная система электрической тяги при обрыве одного контактного провода (провода питания одной фазы первичной обмотки тягового

трансформатора) переходит из работы основного трехфазного (симметричного) режима в вынужденный однофазный (несимметричный) режим работы.

2. При соединении обмоток трансформатора по схемам  $Y/Y$ ,  $Y/\Delta$  «разрыв» провода питания одной (любой) фазы первичной обмотки приводит к прекращению подачи напряжения и протекания тока в этой обмотке (т.е. снижение напряжения и тока до нуля):

— в других фазах первичной обмотки напряжение и ток уменьшаются в  $2/\sqrt{3}$  раз (на 13,4 %);

— аналогично изменению тока и напряжения в первичной обмотке изменяются напряжение и ток в фазах вторичной обмотки, соединенной по схеме  $Y$ .

3. Во вторичной обмотке, соединенной по схеме  $\Delta$ , напряжение в обмотке фазы, соответствующей «разрывной» фазе первичной обмотки, снижается до нуля, а в других фазах этой обмотки напряжение уменьшается в  $2/\sqrt{3}$  раз (на 13,4 %):

— токи в линейном проводе и в фазах вторичной обмотки тягового трансформатора, соединенной по схеме  $\Delta$ , изменяются в соответствии с законом электромагнитной индукции и первым и вторым законами Кирхгофа.

4. Линейные провода питания ВИБ от вторичной обмотки тягового трансформатора, соединенной по схеме  $Y$  или  $\Delta$ , рассчитываются на протекание линейного тока вторичной обмотки при трехфазном симметричном режиме.

## **4.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА**

### **4.2.1. Токи и напряжения преобразовательного агрегата в трехфазном и в однофазном режимах работы тягового трансформатора**

Экспериментальная проверка режимов работы тягового трансформатора в трехфазном и в однофазном режимах работы проведена на физической модели преобразовательного агрегата с трансформатором мощностью 30 кВ·А напряжением 380 В.

Таблица 4.1

Результаты измерений токов и напряжений преобразовательного агрегата в трехфазном симметричном режиме работы трансформатора с соединением обмоток по схеме Y/Y

$Z_{дт}$ , Ом	Напряжение сети, В			$U_{A1Y}$ , В	$U_{B1Y}$ , В	$U_{C1Y}$ , В	$I_{A1Y}$ , А	$I_{B1Y}$ , А	$I_{C1Y}$ , А	$U_{опр}$ , В	$U_{bпр}$ , В	$U_{спр}$ , В	$I_{опр}$ , А	$I_{bпр}$ , А	$I_{спр}$ , А	$U_{дт}$ , В	$I_{дт}$ , А
	$U_{Aф}$	$U_{Bф}$	$U_{сф}$														
xx	221	221	221	221	221	221	0,1	0,1	0,1	42,1	42,4	42,3	0	0	0	99	0
7,8	221	221	221	219	220	220	1,9	1,94	1,98	40,5	40,6	41,1	9,6	9,7	9,6	93	23
2	221	221	221	214	215	215	6,5	6,5	6,5	37,6	37,6	37,8	32,4	32,4	32,4	82	84
1	221	221	221	208	209	209	11,1	11,2	11,3	34	34,7	34,5	56,4	56,4	56,4	73	146

Таблица 4.2

Результаты измерений токов и напряжений преобразовательного агрегата в однофазном несимметричном режиме работы трансформатора с соединением обмоток по схеме Y/Y

$Z_{дт}$ , Ом	Напряжение сети, В			$U_{A1Y}$ , В	$U_{B1Y}$ , В	$U_{C1Y}$ , В	$I_{A1Y}$ , А	$I_{B1Y}$ , А	$I_{C1Y}$ , А	$U_{опр}$ , В	$U_{bпр}$ , В	$U_{спр}$ , В	$I_{опр}$ , А	$I_{bпр}$ , А	$I_{спр}$ , А	$U_{дт}$ , В	$I_{дт}$ , А
	$U_{Aф}$	$U_{Bф}$	$U_{сф}$														
xx	221	221	221	191	0,4	193	0,1	0	0,1	36,7	0,4	36,4	0	0	0	66	0
7,8	221	221	221	189	1	190	1,7	0	1,7	34,8	0,4	35,4	8,1	0	8	61,5	16
2	221	221	221	184,7	1,7	184	5,2	0	5,2	32,5	0,4	32,8	28,4	0	28,5	53,8	54
1	221	221	221	179,7	2,4	178,4	8,8	0	8,7	29,8	0,6	30,1	48	0	48	46,5	94

Соединение обмоток тягового трансформатора, представленного на рис. 4.9, выполнено по схеме  $Y/Y$ . В табл. 4.1 представлены величины токов и напряжений трехфазного симметричного режима, в табл. 4.2 — однофазного несимметричного режима. На рис. 4.9, а реализуется трехфазная шестипульсовая мостовая схема выпрямления, для которой выпрямленное напряжение холостого хода

$$U_{d0} = 2,34 \cdot U_2,$$

где  $U_2$  — фазное напряжение вентильной обмотки, равные

$$U_2 = U_{aY} = U_{bY} = U_{cY}.$$

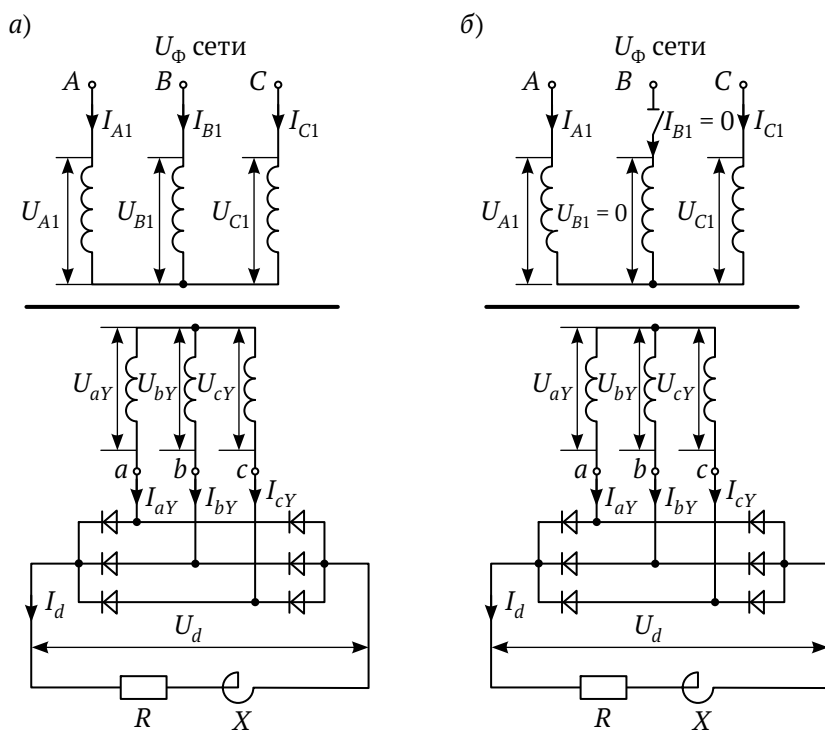


Рис. 4.9. Принципиальная схема физической модели

преобразовательного агрегата с соединением обмоток трансформатора  $Y/Y$ :

а — трехфазный симметричный режим работы трансформатора; б — однофазный несимметричный режим работы трансформатора;  $U_{A\phi}, U_{B\phi}, U_{C\phi}$  — фазные напряжения питающей сети;  $U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}$  — фазные напряжения первичной обмотки трансформатора;  $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}$  — фазные токи первичной обмотки трансформатора;  $U_{aY}, U_{bY}, U_{cY}$  — фазные напряжения вторичной обмотки трансформатора со схемой соединения « $Y$ »;  $I_{aY}, I_{bY}, I_{cY}$  — фазные (линейные) токи фаз  $A, B, C$  вторичной обмотки преобразовательного трансформатора со схемой соединения « $Y$ »;  $Z_d = \sqrt{R^2 + X^2}$  — сопротивление нагрузки;  $U_d$  — выпрямленное напряжение преобразовательного агрегата;  $I_d$  — выпрямленный ток преобразовательного агрегата

Из табл. 4.1 значение  $U_{aY}$  равно 42,1 В, откуда расчетное значение  $U_{d0} = 2,34 \cdot 42,1 = 99$  В соответствует экспериментальному значению 99 В.

Разрывом питающего провода первичной обмотки одной фазы, например В (рис. 4.9, б), реализуется однофазная двухпульсовая мостовая схема выпрямления, для которой выпрямленное напряжение холостого хода

$$U_{d0} = 0,9 \cdot 2U_2,$$

где  $U_2$  — напряжение вентиляных обмоток  $U_{aY} = U_{cY}$  при разрыве питающего провода первичной обмотки фазы В; напряжение вентиляных обмоток  $U_{2bY} = U_{2cY}$  при разрыве питающего провода первичной обмотки фазы А; напряжение вентиляных обмоток  $U_{aY} = U_{bY}$  при разрыве питающего провода первичной обмотки фазы С.

Из табл. 4.2 среднее значение  $U_{aY}$  и  $U_{cY}$  равно 36,6 В, откуда расчетное значение  $U_{d0} = 0,9 \cdot 2 \cdot 36,6 = 65,88$  В соответствует экспериментальному значению 66 В.

Соединение обмоток тягового трансформатора, представленного на рис. 4.10, выполнено по схеме Y/Δ. В табл. 4.3 представлены величины токов и напряжений трехфазного симметричного режима, в табл. 4.4 — однофазного несимметричного режима. На рис. 4.10, а реализуется трехфазная шестипульсовая мостовая схема выпрямления, для которой выпрямленное напряжение холостого хода

$$U_{d0} = 1,35U_2,$$

где  $U_2$  — фазное (линейное) напряжение вентиляных, равные

$$U_2 = U_{a\Delta} = U_{b\Delta} = U_{c\Delta}.$$

Из табл. 4.4 значение  $U_{a\Delta}$  равно 68,1 В, откуда расчетное напряжение  $U_{d0} = 1,35 \cdot 68,1 = 92$  В соответствует экспериментальному значению 92 В.

При разрыве питающего провода первичной обмотки одной фазы, например В (рис. 4.10, б), реализуется однофазная двухпульсовая мостовая схема выпрямления, для которой выпрямленное напряжение холостого хода:

$$U_{d0} = 0,9 \cdot U_2,$$

где  $U_2$  — напряжение вентиляных обмоток  $U_{2a\Delta} = U_{2c\Delta}$  при разрыве питающего провода первичной обмотки фазы В;

– напряжение вентиляльных обмоток  $U_{2b\Delta} = U_{2c\Delta}$  при разрыве питающего провода первичной обмотки фазы А;

– напряжение вентиляльных обмоток  $U_{2a\Delta} = U_{2b\Delta}$  при разрыве питающего провода первичной обмотки фазы С.

Из табл. 4.4 значение  $U_{a\Delta}$  равно 60 В, откуда расчетное напряжение  $U_{d0} = 0,9 \cdot 60 = 54$  В, и практически соответствует экспериментальному значению 53,2 В.

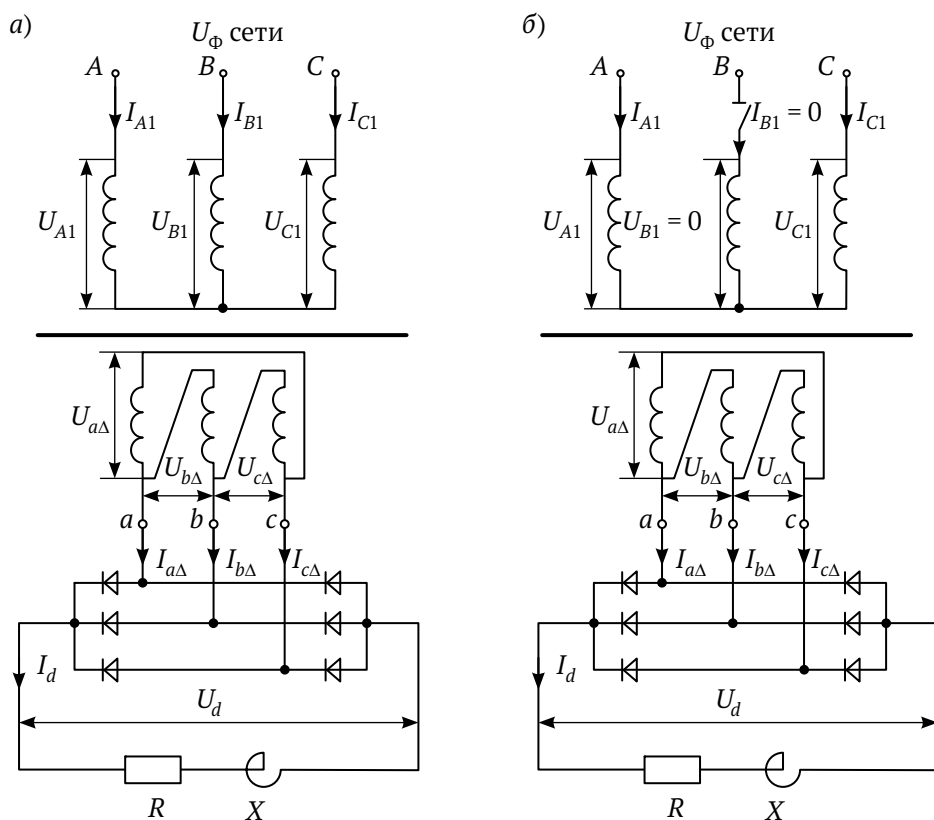


Рис. 4.10. Принципиальная схема физической модели

преобразовательного агрегата с соединением обмоток трансформатора Y/Δ:

а — трехфазный симметричный режим работы трансформатора; б — однофазный несимметричный режим работы трансформатора;  $U_{A\Phi}, U_{B\Phi}, U_{C\Phi}$  — фазные напряжения питающей сети;  $U_{A1}, U_{B1}, U_{C1}$  — фазные напряжения первичной обмотки трансформатора;  $I_{A1}, I_{B1}, I_{C1}$  — фазные токи первичной обмотки трансформатора;  $U_{a\Delta}, U_{b\Delta}, U_{c\Delta}$  — фазные (линейные) напряжения вторичной обмотки трансформатора со схемой соединения «Δ»;  $I_{a\Delta}, I_{b\Delta}, I_{c\Delta}$  — линейные токи фаз А, В, С вторичной обмотки преобразовательного трансформатора со схемой соединения «Δ»;  $Z_d = \sqrt{R^2 + X^2}$  — сопротивление нагрузки  $U_d$  — выпрямленное напряжение преобразовательного агрегата;  $I_d$  — выпрямленный ток преобразовательного агрегата

Таблица 4.3

Результаты измерений токов и напряжений преобразовательного агрегата в трехфазном симметричном режиме работы трансформатора с соединением обмоток по схеме Y/Δ

$Z_{дт}$ , Ом	Напряжение сети, В			$U_{A1Y}$ , В	$U_{B1Y}$ , В	$U_{C1Y}$ , В	$I_{A1Y}$ , А	$I_{B1Y}$ , А	$I_{C1Y}$ , А	$U_{оΔY}$ , В	$U_{bΔY}$ , В	$U_{cΔY}$ , В	$I_{оΔY}$ , А	$I_{bΔY}$ , А	$I_{cΔY}$ , А	$U_{дт}$ , В	$I_{дт}$ , А
	$U_{Aф}$	$U_{Bф}$	$U_{Cф}$														
xx	221	221	221	221	221	221	0,15	0,15	0,15	68,1	68,1	68,2	0	0	0	92	0
7,8	221	221	221	219	219	219	1,7	1,7	1,8	67,6	67,9	67,3	9,7	9,8	9,7	88,7	23
2	221	221	221	213,5	214	214	6,17	6,21	6,24	63,5	63,7	63,5	33	33	33,3	81,6	82
1	221	221	221	206	207	207	10,6	10,7	10,7	58,8	58,6	58,6	58	58	58	74,1	146

Таблица 4.4

Результаты измерений токов и напряжений преобразовательного агрегата в однофазном несимметричном режиме работы трансформатора с соединением обмоток по схеме Y/Δ

$Z_{дт}$ , Ом	Напряжение сети, В			$U_{A1Y}$ , В	$U_{B1Y}$ , В	$U_{C1Y}$ , В	$I_{A1Y}$ , А	$I_{B1Y}$ , А	$I_{C1Y}$ , А	$U_{оΔY}$ , В	$U_{bΔY}$ , В	$U_{cΔY}$ , В	$I_{оΔY}$ , А	$I_{bΔY}$ , А	$I_{cΔY}$ , А	$U_{дт}$ , В	$I_{дт}$ , А
	$U_{Aф}$	$U_{Bф}$	$U_{Cф}$														
xx	220	220	220	190	2	190	0,16	0	0,16	60	0	60	0	0	0	53	0
7,8	220	220	220	189	0	189	1,2	0	1,2	59	0	59	3,9	3,8	7,7	52,1	12
2	220	220	220	185	0	186	3,8	0	3,8	56	0	56	12,4	12,4	24,8	47	46
1	220	220	220	161	0	161	5,9	0	5,9	52	0	52	21,5	21,5	43	43	86



При разрыве провода питания одной фазы первичной обмотки трансформатора со схемой соединения обмоток трансформатора  $Y/Y$  или  $Y/\Delta$  уменьшение напряжения в обмотках фаз, соседних с отключившейся обмоткой, происходит практически в  $2/\sqrt{3}$  раз, одинаковое для первичной и вторичной цепей. Так, при исчезновении напряжения  $U_{B1}$  в фазе  $B$  первичной обмотки происходит уменьшение фазного напряжения холостого хода (см. табл. 4.1 и 4.2) в фазах  $U_{A1}$  и  $U_{C1}$  с 221 В до 191–193 В (в 1,15 и 1,145 раз). Во вторичных цепях напряжение, например в вентильной обмотке фазы «а»  $U_{2aY}$  уменьшается с 42,1 В до 36,7 В (в 1,147 раз) и  $U_{a\Delta}$  (табл. 4.3 и 4.4) — с 68,1 В до 60 В (в 1,135 раз).

Также происходит уменьшение токов в первичной обмотке трансформатора со схемами соединения обмоток  $Y/Y$  или  $Y/\Delta$  и во вторичных обмотках схемы  $Y/Y$ . При этом коэффициент снижения токов остается на уровне  $2/\sqrt{3}$ . Так, отношение токов  $I_{aY} = 9,6$  А (см. табл. 4.1) к току 8,1 А (см. табл. 4.2), с учетом погрешности измерений токовой нагрузки, равно 1,185, что практически соответствует коэффициенту  $2/\sqrt{3} = 1,1547$ .

Рассмотрим отношение токов во вторичной обмотке трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  и его соответствие коэффициенту снижения  $2/\sqrt{3}$ . Фазный ток во вторичной обмотке  $I_{a\Delta}$  до обрыва провода первичной обмотки фазы  $B$  был равен  $9,7/\sqrt{3} = 5,6$  А (см. табл. 4.3), после обрыва имеем ток вторичной обмотки  $I_{a\Delta} = 3,9$  А (см. табл. 4.4). Произошло значительное снижение тока во вторичной обмотке с коэффициентом снижения в  $\frac{5,6}{3,9} = 1,435$  раз, превышающим коэффициент  $2/\sqrt{3}$ . Такое снижение тока во вторичной обмотке вызвано не только изменением электромагнитного состояния стержней сердечника с катушками фаз, соседними с фазой вторичной обмотки, связанной с фазой с оборванным питанием первичной обмотки и вызывающим снижение тока в  $2/\sqrt{3}$  раз, но и увеличением сопротивления короткого замыкания трансформатора при переходе из трехфазного режима работы в однофазный.

Таким образом, разрыв питания одной фазы первичной обмотки приводит к снижению фазных токов во вторичной обмотке, соединенной по схеме  $Y$  в 1,185 раз, что практически соответствует  $2/\sqrt{3}$ ; во вторичной обмотке, соединенной по схеме  $\Delta$  в 1,435 раз, превышающее значение  $2/\sqrt{3}$ .

#### 4.2.2. Мощность тягового трансформатора при разрыве провода питания одной фазы первичной обмотки

Расчет мощности трансформатора произведен по результатам измерений токов и напряжений вторичных (вентильных) обмоток для трехфазного (симметричного) и однофазного (несимметричного) режимов работы трансформатора с соединением обмоток по схемам  $Y/Y$  (а) и  $Y/\Delta$  (б).

Без разрыва цепи питания катушек первичной обмотки мощность трансформатора в трехфазном режиме, как известно, равна утроенной мощности одной фазы

$$S_T^{(3)} = 3U_\Phi^{(3)} \cdot I_\Phi^{(3)},$$

где  $U_\Phi^{(3)}$ ,  $I_\Phi^{(3)}$  — фазные напряжение и ток одной фазы, например фазы А, в трехфазном режиме работы трансформатора.

При разрыве питающего провода катушки одной фазы (например, рассмотренной фазы В) мощность трансформатора в однофазном режиме снижается и равна:

$$S_T^{(1)} = U_A^{(1)}I_A^{(1)} + 0 + U_C^{(1)}I_C^{(1)} = 2\sqrt{3}/2U_\Phi^{(1)} \cdot \sqrt{3}/2I_\Phi^{(3)} = 2 \cdot 3/4U_\Phi^{(3)} \cdot I_\Phi^{(3)} = 1,5U_\Phi^3 \cdot I_\Phi^3,$$

т.е. снижается в два раза.

В качестве примера приведем расчеты мощности по вторичной (вентильной) стороне трансформатора по исходным данным табл. 4,1–4.4 для режима сопротивления нагрузки  $Z_d = 7,8$  Ом.

*Схема соединения обмоток  $Y/Y$ .*

В трехфазном режиме (см. табл. 4.1) фазный ток вентильной обмотки  $\dot{I}_{2\phi}(\dot{I}_{aY}) = 9,6$  А, фазное напряжение  $\dot{U}_{2\phi}(\dot{U}_{aY}) = 40,5$  В, мощность трансформатора равна:

$$S_T^{(3)} = 3U_{2\phi}^{(3)} \cdot I_{2\phi}^{(3)} = 3 \cdot 40,5 \cdot 9,6 = 1166 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

В однофазном режиме (см. табл. 4.2):

$$S_T^{(1)} = U_{2a}^{(1)} \cdot I_{2a}^{(1)} + U_{2c}^{(1)} \cdot I_{2c}^{(1)} = 34,8 \cdot 8,1 + 35,4 \cdot 8 = 565 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Соотношение экспериментальных величин по мощности вентильных обмоток трансформатора:

$$S_T^{(3)}/S_T^{(1)} = 1166/565 = 2,06 \text{ ед,}$$

т. е. мощность трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/Y$  снизилась в 2,06 раза, что соответствует ранее приведенному теоретическому расчету.

*Схема соединения обмоток  $Y/\Delta$ .*

В трехфазном режиме (см. табл. 4.3) фазный ток вентильной обмотки  $\dot{I}_{2\phi}(\dot{I}_{a\Delta}) = 9,7/\sqrt{3} = 5,6 \text{ А}$ , фазное напряжение  $\dot{U}_{2\phi}(\dot{U}_{a\Delta}) = 67,6 \text{ В}$ , мощность трансформатора равна:

$$S_T^{(3)} = 3 \cdot 67,6 \cdot 5,6 = 1136 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

В однофазном режиме (табл. 4.4):

$$S_T^{(3)} = U_{2a}^{(1)} \cdot I_{2a}^{(1)} + U_{2c}^{(1)} \cdot I_{2c}^{(1)} = 2 \cdot 59 \cdot 3,9 = 460 \text{ В}\cdot\text{А.}$$

Соотношение экспериментальных величин по мощности вентильных обмоток трансформатора:

$$S_T^{(3)}/S_T^{(1)} = 1136/460 = 2,47 \text{ ед,}$$

т. е. мощность трансформатора со схемой соединения обмоток снизилась практически в 2,5 раза.

Таким образом, мощность тягового трансформатора в трехфазном режиме одинакова и не зависит от схемы соединения обмоток. При однофазном режиме мощность трансформатора снижается при схеме соединения обмоток  $Y/Y$  в 2 раза, а при схеме  $Y/\Delta$  в 2,5 раза. Поэтому по условиям эксплуатации электровозов тяговый трансформатор со схемой соединения обмоток  $Y/Y$  предпочтительнее, чем трансформатор со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ .

Из анализа соотношений, полученных по результатам приведенных в табл. 4.1–4.4 измерений, следует, что эти соотношения совпадают с выводами раздела 4.1 и подтверждают возможность работы электроподвижного состава при разрыве питания первичной обмотки тягового трансформатора по фазам  $A$  или  $C$ ,  $B$  или  $C$ .

### 4.3. ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

Трехфазная система электрической тяги допускает два режима работы: симметричный трехфазный и несимметричный однофазный, для исследования и расчета которых применены основные соотношения токов и напряжений и методы расчета трехфазных электрических цепей.

Результаты расчетов токов и напряжений симметричного и несимметричного режимов работы с тяговым трансформатором со схемой соединения обмоток «звезда–звезда» и «звезда–треугольник» сопоставимы с экспериментальными значениями токов и напряжений физической модели преобразовательного агрегата с тяговым трансформатором, с первичным линейным напряжением 380 В и мощностью 30 кВА.

Выявлены особенности расчета мощности преобразовательного агрегата при переходе режима работы из симметричного режима в несимметричный режим. При разрыве питания одной фазы первичной обмотки тягового трансформатора мощность трансформатора при соединении обмоток  $Y/Y$  уменьшается в 2 раза, а при соединении обмоток  $Y/\Delta$  в 2,5 раза. Поэтому схемой соединения обмоток тягового трансформатора электровоза для преобразовательной силовой цепи питания тяговых электрических двигателей рекомендуется схема —  $Y/Y$ .

# УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

## 5.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СОЗДАНИЮ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

При создании системы должны быть учтены следующие требования:

1. Максимальное использование технических решений и устройств существующей однофазной системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ 50 Гц.

2. Для высокоскоростных железнодорожных магистралей со скоростью от 200 км/ч до 400 км/ч основные технические нормы и требования к проектированию и строительству определяются специальными техническими условиями, разработанными «ФГБОУ ВПО ПГУПС императора Александра I» в 2014 году.

3. Для создания электроподвижного состава грузового движения трехфазной системы электрической тяги используется база существующего локомотивного парка, например электровозов 2ЭС5 [96] и 2ЭС7 [97].

4. Повышение работоспособности трехфазной системы электрической тяги в условиях эксплуатации должно быть направлено на обеспечение преимущества технико-энергетических показателей трехфазной системы электрической тяги относительно однофазной системы электрической тяги переменного тока и, кроме того, на введение резервирования движения по устройствам контактной сети, когда при снятии питания с одного контактного провода движение поезда не должно прекращаться.

5. Взаимное расположение в горизонтальной плоскости двух контактных проводов фаз  $a$  и  $b$  с соблюдением габаритных размеров должно предусматривать возможность производства и упрощения погрузочно-разгрузочных работ.

Предварительная разработка схемы и устройств секционирования контактной сети произведена с учетом схем и устройств, применяемых до 1976 года на железных дорогах Италии и рассмотренных в главе 2, а также в предварительном варианте применения — в главе 3.

На рис. 5.1 представлена в качестве примера схема расположения токоприемников и контактных проводов при боковом токосъеме, а также вариантов поддерживающих конструкций, применяемых в устройствах электроснабжения систем электрической тяги постоянного и однофазного переменного тока.

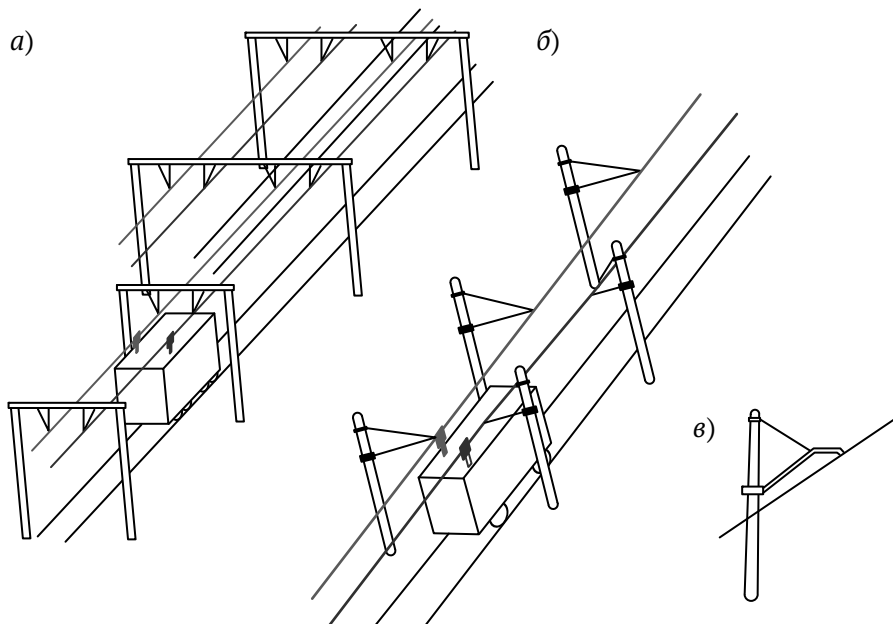


Рис. 5.1. Схемы поддерживающих устройств контактных проводов при боковом токосъеме:

- а* — ригельный вариант подвески контактных проводов на однопутном и двухпутном участках;  
*б* — траверсный вариант подвески контактных проводов;  
*в* — консольный вариант подвески контактного провода

## **5.2. СХЕМЫ ПОЛОЖЕНИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ И КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ НА ПЕРЕГОНЕ, НА ГЛАВНОМ ПУТИ И НА БОКОВЫХ ПУТЯХ СТАНЦИИ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОГО УЧАСТКА**

Положение токоприемников и контактных проводов при езде на перегоне, на главных и боковых путях станций, при пересечении двух путей и при переходе с одного пути на другой путь приведено на рис. 5.2–5.4 и в [91, 98, 99].

На перегонах и на главных путях станций производится монтаж двух контактных подвесок (двух контактных проводов или шин) со схемами секционирования контактной сети, а также проведение работ по расчету стрелы провеса контактных проводов, по повышению ветроустойчивости проводов контактной подвески двух фаз «а» и «б» и по расчету длины пролета контактной подвески. Тяговые преобразовательные трансформаторы электроподвижного состава работают на этих путях в полнофазном режиме (рис. 5.2).

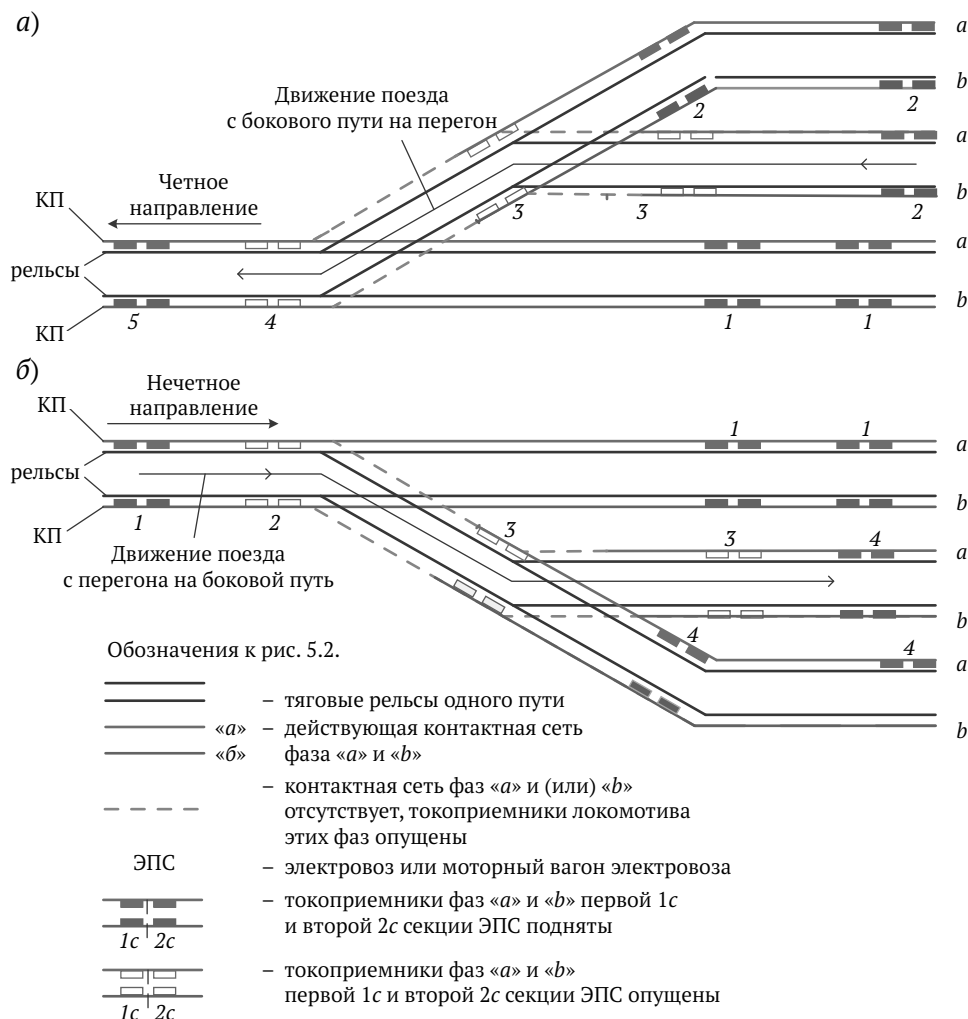


Рис. 5.2. Схемы положения контактных проводов и токоприемников электровозов при движении по перегону, по главным и боковым путям станции: а — четное направление; б — нечетное направление

На рис. 5.2 приведены обозначения к рис. 5.2–5.4:

- тяговые рельсы одного пути;
- действующая контактная сеть фаз «а» и «b»;
- – – контактная сеть фаз «а» и (или) «b» отсутствует, токоприемники локомотива этих фаз опущены;
- электровоз или моторный вагон электропоезда;
- токоприемники фаз «а» и «b» первой 1с и второй 2с секций ЭПС подняты;
- токоприемники фаз «а» и «b» первой 1с и второй 2с секций ЭПС опущены.

Режим работы с боковыми путями рассмотрен на примере рис. 5.2.

#### *Пояснение к рис. 5.2, а*

На боковых путях станции четного направления контактная сеть смонтирована с фазами «а» и «b».

Позиции:

- 1 — движение по перегону и по главным путям станции производится с поднятыми токоприемниками фаз «а» и «b»;
- 2 — движение по боковым путям — на ЭПС подняты токоприемники в фазе «а» и в фазе «b»;
- 3 — перевод токоприемников фазы «а» и «b» в опущенное положение;
- 4 — выход на пути перегона с опущенными токоприемниками «а» и «b»;
- 5 — перевод токоприемников фаз «а» и «b» в поднятое положение при движении по перегону.

#### *Пояснение к рис. 5.2, б*

На боковых путях станции нечетного направления контактная сеть смонтирована с фазами «а» и «b».

Позиции:

- 1 — движение по перегону и по главным путям станции производится с поднятыми токоприемниками фаз «а» и «b»;
- 2 — перед съездом на боковые пути токоприемники фаз «а» и «b» опущены;
- 3 — после въезда на боковой путь с опущенными токоприемниками фаз «а» и «b»;
- 4 — при движении по боковому пути токоприемники фаз «а» и «b» переводятся в поднятое положение.



### Режим работы при пересечении участков двух путей

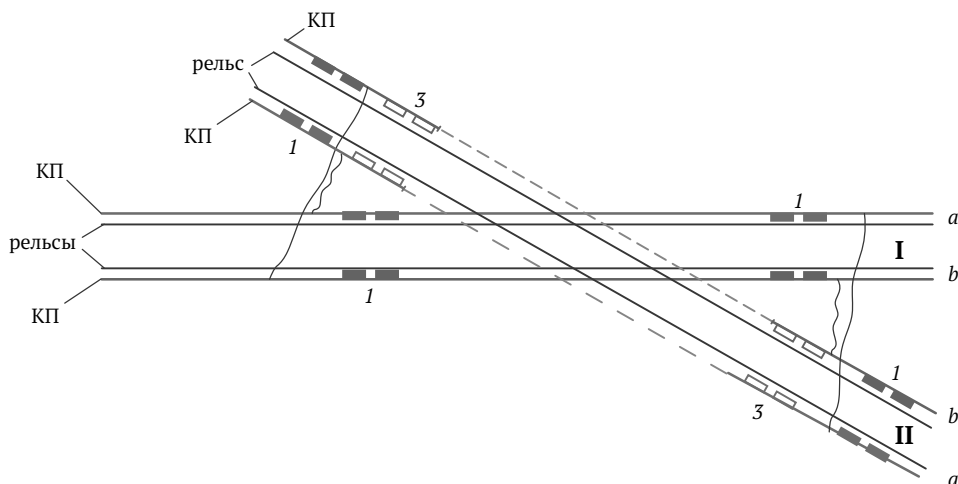


Рис. 5.3. Схемы положения контактных проводов и токоприемников электровозов в процессе их движения при пересечении путей двух железнодорожных участков с контактной сетью «а» и «b»

#### Пояснение к рисунку 5.3

Рассматривается пересечение путей двух участков: пересекаемого I и пересекающего II, на которых контактная сеть смонтирована для двух фаз *a* и *b*.

Позиции:

1 — движение по перегонам на пересекаемом I участке и на пересекающем II участке производится с поднятыми токоприемниками локомотивов фаз «а» и «b»;

2 — при подходе локомотива на пересекающем II участке к месту пересечения токоприемники опускаются и проходят зону пересечения участка «на выбеге» и после прохода зоны пересечения локомотив поднимает токоприемники «а» и «b» на пересекающем II участке.

#### Режим работы при переходе с одного пути на другой путь (рис. 5.4)

На рис. 5.4 показаны четный и нечетный пути перегона или главные пути станции. Рассмотрен порядок перехода движения поезда с опущенными токоприемниками электровозов («на выбеге»), например с четного пути на нечетный путь с исходным движением поезда в четном направлении по четному пути *a*) и с исходным движением поезда в нечетном направлении по нечетному пути *б*).

При возникновении препятствия «X» (см. рис. 5.4) в четном направлении *а*) или в нечетном направлении *б*) производится обход движения поезда с опущенными токоприемниками электровоза и позициям 1–2–3–4.

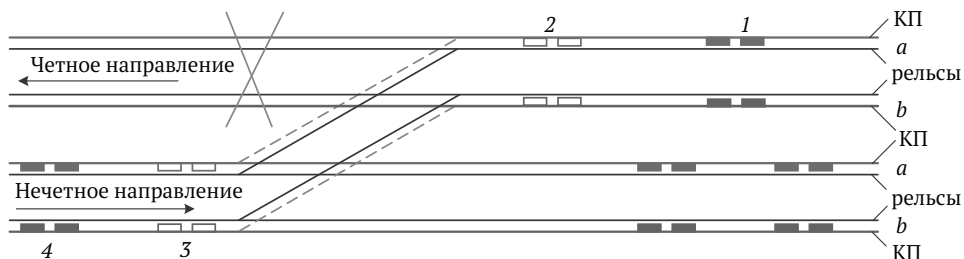


Рис. 5.4. Схемы положения контактных проводов и токоприемников электровозов в процессе их движения по перегону, по главным путям станции и при переходе, например, с пути четного направления на путь нечетного направления

### 5.3. УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДЪЕМА И ОПУСКАНИЯ ТОКОПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОВОЗА

Необходимость в опускании и подъеме токоприемника (устройства токосъема) может возникнуть в однофазной и трехфазной системах электрической тяги при постоянных рабочих режимах, предусмотренных в процессе эксплуатации (остановки, стоянки), и кратковременных режимах при ликвидации, например, повреждений (аварий). Это предусматривает прохождение электровозом части участка железной дороги «на выбеге» с опущенными токоприемниками.

Правилами технической эксплуатации железных дорог разрешается в существующей однофазной системе пропуск электроподвижного состава с опущенными токоприемниками. Участок ограждают временными сигнальными знаками: «Подготовиться к опусканию токоприемника», «Опустить токоприемник», «Поднять токоприемник» [97].

В трехфазной системе электрической тяги в местах съезда с главного пути на боковой путь или с бокового пути на главный путь, при переходе с одного пути на другой путь или в месте пересечения путей одного направления с другим направлением прохождение локомотива должно производиться только с опущенными токоприемниками, т.е. в режиме «выбега». Такое требование обусловлено наличием в трехфазной системе электрической тяги в контактной сети двух контактных проводов, соединенных с электровозом через устройства токосъема, включающие

токоприемники, соединенные механически с размещенными на электровозе блоками управления перемещением этих устройств [91].

В существующей однофазной системе электрической тяги отсоединение (опускание) устройства токосъема от контактного провода с последующим его присоединением (подъемом) осуществляется машинистом электровоза в ручном режиме после прочтения им предупреждающих плакатов, установленных в зоне нахождения контактной сети: «Подготовиться к опусканию токоприемника», «Опустить токоприемник», «Поднять токоприемник».

В трехфазной системе электрической тяги рассмотрен вариант системы «Опустить, поднять токоприемники» с автоматическим управлением.

В автоматической системе «Опустить, поднять токоприемники» имеется блок управления устройством токосъема, выполненный в виде двух частей, первая — передающая — закрепляется в зоне контактной сети, а вторая — принимающая — размещается на электровозе и связана с передающей частью сигналами телеуправления по радиоканалу, обеспечивая подъем и опускание устройства токосъема.

На рис. 5.5 представлена функциональная схема системы с прямолинейными путями *а* и с пересекающимися путями *б*.

Система трехфазной электрической тяги железных дорог содержит рельсы *1*, электровоз *2*, тяговую подстанцию *3*, соединенную с контактной сетью *4* и рельсами *1*.

Контактная сеть *4* содержит два контактных провода *5*, размещенных на опорах *6* и соединенных с электровозом *2* посредством устройства токосъема *7*, связанного с блоком *8* перемещения устройства токосъема *7*, расположенного на электровозе *2*.

Устройство токосъема *7* содержит блок управления этим устройством, выполненный из двух частей: первая часть *9* — передающая, размещена и закреплена в зоне контактной сети *4* на опоре *6*.

Вторая часть *10* блока управления устройства токосъема *7*, принимающая, закреплена на электровозе *2* и связана с блоком перемещения *8* устройства токосъема *7* и с первой частью *9* устройства токосъема *7* посредством передающего устройства *11*.

Связь двух частей: первой *9* и второй *10* блока управления устройства токосъема *7* по сигналам телеуправления с использованием радиоканала — обеспечивает оперативное опускание *12* и подъем *13* устройства токосъема *7* электровоза *2* на заданных отрезках пути с рельсами *1* и с отсутствием проводов *5* контактной сети *4*.



На части участка пути, например на зоне перехода с одного пути на другой путь, контактные провода отсутствуют (не монтируются), и электровоз проходит эту зону с опущенными устройствами токосъема с использованием запасенной кинетической энергии с так называемой ездой «на выбеге». При подходе электровоза к этой зоне устройства токосъема опускаются, а после прохода этой зоны — поднимаются.

Такое же положение имеет место при пересечении двух путей (рис. 5.5, б). На одном из путей (любом), например на главном I, монтируются (устанавливаются) оба контактных провода. На другом пути, пересекающем II, также монтируются оба контактных провода, но на участке 14 этого пути II в зоне пересечения контактные провода 5 отсутствуют (не монтируются). Независимо от направления движения на пересекающем участке перед подходом к зоне пересечения с отсутствием контактных проводов на части участка сначала, электровозом производится опускание устройств токосъема, а после прохода электровозом этой зоны пересечения «на выбеге» производится подъем устройств токосъема.

На боковых путях станции устанавливаются (монтируются) оба контактных провода. И только в зоне примыкания бокового пути к главному пути станции (перед въездом с бокового пути станции на главный путь и при съезде с главного пути на боковой путь) контактные провода на боковом пути не монтируются. Электровоз проходит эти зоны с опущенными устройствами токосъема с ездой на «выбеге». После прохода зоны — устройства токосъема переводятся в поднятое положение.

## **5.4. ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПЕЗДОВ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОМ УЧАСТКЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

### **5.4.1. Организация движения поездов на участке трехфазной системы электрической тяги с контактной сетью на боковых путях станции**

В разделе 5.3 отмечено, что при движении поезда по перегону и по главным путям станции у электровозов подняты токоприемники, обеспечивая боковой токосъем в трехфазном симметричном режиме.

В разделе 5.2 отмечено, что при въезде с перегона на боковой путь и, наоборот, при выезде с бокового пути на перегон в месте примыкания бокового пути к перегону контактная сеть на боковом пути отсутствует (не монтируется). Также контактная сеть не монтируется на пути перехода с одного пути на другой и на одном из двух путей при пересечении этих путей. Места въезда-выезда, перехода и пересечения электровоз проходит с опущенными токоприемниками.

Отсутствие контактной сети на боковом пути в местах его примыкания к главному пути станции или к перегону вносит особенности в организации движения поезда между боковым и главным путями станции.

Для прохождения зоны съезда с пути перегона на боковой путь «на выбеге» имеется запас кинетической энергии, определяемый перед съездами задаваемой скоростью, которой достаточно для организации съезда. Так, при начальной скорости 50 км/ч электровоз с составом на участке с нулевым уклоном 0 ‰ проходит путь до остановки длиной 1600 м [97].

После остановки поезда на боковом пути и последующем его въезде на главный путь, запас энергии разгона после трогания с места остановки до момента опускания токоприемника перед въездом на главный путь локомотив может не обеспечить этот въезд, что потребует необходимость введения на станции локомотива-толкача или при удлинении станционных путей предусмотреть длину бокового пути для обеспечения необходимой скорости для разгона.

Применение локомотива-толкача вызовет незначительное снижение достоинств применения трехфазной системы электрической тяги, определяемое технико-экономическими расчетами.

В качестве локомотива-толкача может быть использован другой электровоз, но учитывая устройство контактной сети на боковых путях, одним из решений может быть применение тепловозной тяги. При этом количество боковых путей для каждого направления (четного и нечетного) определяется потребностью для обеспечения, например, обгона, отстоя при повреждениях и т.п. или принимается — не более одного-двух.

На остальных боковых путях, в том числе и на путях со значительным объемом маневровой работы, контактная сеть не монтируется (ликвидируется) с обеспечением работы тепловозной тягой. Снижаются капитальные затраты без монтажа контактной сети на боковых путях станции и, соответственно, снижаются эксплуатационные расходы на ее обслуживание. Кроме того, снижается находящийся под постоянным контролем удельный расход электрической энергии.

Для сотрудников эксплуатационной работы создаются дополнительные заботы, трудности, но и создаются возможности для снижения энергетических затрат при разработке новых «прорывных технологий» маневровой работы.

Предпочтение тепловозной тяге перед электрической тягой отдается и на магистральных направлениях при снижении объема эксплуатационной работы и других условий (гололед, стоимость топлива и электроэнергии, сооружение и содержание инфраструктуры электрификации). В [2] приводится: «В Соединенных Штатах использование электровозов уменьшилось ввиду дизелизации. Дизели поделились некоторыми преимуществами электрического локомотива над паром, а стоимость строительства и поддержания инфраструктуры электроснабжения, которая всегда сбавлялась, чтобы препятствовать новым установкам, привела к устранению большинства электрических сетей за пределами северо-востока. За исключением некоторых невостребованных систем (например, черная Меса и озеро Пауэлл), к 2000 году электрификация ограничивалась Северо-Восточным коридором и некоторыми пригородными службами; даже грузовые перевозки обрабатывались дизелями». В США в 80-е годы [2] «были деэлектрифицированы, т.е. переведены на тепловозную тягу 3000 км». «В Бразилии, например, демонтировали контактную сеть на 460 км из 581 км..., продали 131 электровоз и приобрели 40 тепловозов». «Аналогично поступили в Чили, деэлектрифицировав участок длиной 400 км».

Электрификация железных дорог в России и в мире является основной стратегией, но передача деятельности тепловозной тяге в конкретных необходимых ситуациях, в том числе и при маневровой работе, является правильным и допустимым решением.

Другим решением может быть создание локомотива-толкача с электрическими двигателями с питанием от аккумуляторной батареи, размещенной на локомотиве. Такой локомотив может быть использован не только в виде толкача, но и при проведении маневровых работ на станции.

Локомотивы с аккумуляторной батареей допущены к коммерческой эксплуатации в Швейцарии с получением допуска на обращение на сетях Федеральных железных дорог Австрии и железных дорог Германии [журнал «Железнодорожный транспорт», 2015, № 12, с. 80].

## ШВЕЙЦАРИЯ

По заказу компании Railpool компания Bombardier изготовила 8 электровозов с функцией Last Mile.

Функция Last Mile позволяет локомотиву проходить по небольшим неэлектрифицированным участкам за счет включения в работу аккумуляторных батарей большой емкости. Для зарядки этих батарей на локомотиве установлен дизель-генераторный агрегат. К примеру, локомотив, эксплуатируемый компанией Swiss Rail Traddic, проходит в сутки не менее 5 км по неэлектрифицированным участкам. Емкости аккумуляторной батареи и топлива дизеля хватает на 8 ч работы с большой силой тяги, но с низкой скоростью.



Электровоз серии 187 с функцией Last Mile

В любом случае применение локомотива-толкача ведет к усложнению технологии процесса организации движения поездов.

Лучшим решением может быть создание магистрального электровоза с установкой на нем аккумуляторной батареи или конденсатора с подзарядным электрическим устройством с питанием от контактной сети, исключая дизель-генераторное подзарядное устройство в Швейцарском электровозе с функцией «Last Mile».

Мощность батареи или конденсатора должна обеспечить проход поезда с минимальной скоростью пути, длиной от стоянки поезда на боковом пути до выхода электровоза на главный путь с возможностью подъема токоприемников и включения подзарядного устройства.

На базе программного расчетного комплекса «КОРТЭС», для определения мощности батареи или конденсатора, проведены тяговые расчеты с определением расхода электрической энергии на тягу поездов с одинаковым составом массой 6235 т, с электровозами 2ЭС6, с коллекторными тяговыми двигателями постоянного тока и 2ЭС6, с асинхронными тяговыми двигателями на пути протяженностью 2 км, с уклоном 0 ‰ и с регулируемой скоростью движения 9 км/ч.

В приложении П. 1 представлены результаты тяговых расчетов, выполненные по тяговым характеристикам электровоза 2ЭС6 «Синара» с коллекторными тяговыми двигателями, представленными локомотивной службой Свердловской железной дороги (расчет 1), заводом-изготовителем



«Уральские локомотивы» (расчет 2) и по тяговым характеристикам этого же завода для электровоза 2ЭС6 с асинхронными тяговыми двигателями АД с короткозамкнутым ротором (расчет 3).

Регулирование скорости при движении электровоза 2ЭС6 на уровне 9 км/ч производится переключением (включение-отключение) тягового тока. Так, при движении электровоза 2ЭС6 на однокิโลметровом участке производится переключение токов 224 А 9 раз через 110–120 м (расчет 1) и переключение токов 276 А 11 раз через 110 м (расчет 2).

Регулирование скорости электровозом 2ЭС6 с АД на уровне 9 км/ч производится непрерывно (плавно) за счет изменения частоты напряжения переменного тока, подаваемого на асинхронные двигатели от преобразователя напряжения постоянного тока в переменный ток.

В приложении П. 1 для каждого из трех расчетов приведены электрические расчеты о поездках поездов с составами массой 6235 т, с электровозами 2ЭС6, с коллекторными тяговыми двигателями и с АД со скоростью 9 км/ч на участках от стоянки протяженностью 0–0,5 км, 0–1 км, 0–2 км, с расходом электрической энергии на тягу на каждом участке с учетом разгона поезда. Результаты этих расчетов приведены в сводной табл. 5.1.

Таблица 5.1

Таблица расчета мощности аккумуляторной батареи

Электровоз, № расчета	Длина участка отстоянки, км	Регулируемая скорость, км/ч	Время хода, мин		Расход электри- ческой энергии локомотивом, $A_{элс} \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч}$	Мощность $P = \frac{A_{элс} \cdot 60}{t_T}, \text{кВт}$	Удельный расход ЭЭ с учетом на разгон состоянки, $a = \frac{A_{элс}}{Ql}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т} \cdot \text{км}}$ , $Q$ — масса поезда, $l$ — длина хода
			полное $t_n$	под током $t_T$			
2ЭС6, расчет 1	0–0,5	9	3,6	0,9	35	2333	0,01123
	0–1		6,8	1,2	52,6	2640	0,00844
	0–2		13,4	1,9	85,4	2697	0,00685
2ЭС6, расчет 2	0–0,5	9	3,6	0,9	42,3	2820	0,01357
	0–1		6,8	1,2	60,1	3005	0,00964
	0–2		13,3	1,9	101,8	3215	0,00816
2ЭС6 с асинхронны- ми тяговыми дви- гателями, расчет 3	0–0,5	9	3,4	3,4	25,8	455	0,00828
	0–1		6,5	6,5	42,8	395	0,00687
	0–2		12,8	12,8	76,9	360	0,00617

Без учета расхода ЭЭ на разгон со стоянки на участке 0–0,5 в расчетах чистый удельных расход электрической энергии на участке 0–1 составит: в расчете 1 —  $\frac{52,6 - 35}{6235 \cdot 0,5} = 0,00565$ ; в расчете 2 —  $\frac{60,1 - 42,3}{6235 \cdot 0,5} = 0,00571$ ; в расчете 3 —  $\frac{42,8 - 25,8}{6235 \cdot 0,5} = 0,00545$ . Удельный расход электрической энергии с учетом и без учета расхода ЭЭ на разгон со стоянки поезда с электровозом 2ЭС6 и АТД имеет меньшее значение, чем с электровозом 2ЭС6 с коллекторными тяговыми двигателями.

Мощность аккумуляторной батареи, с учетом работы электровоза 2ЭС6 с асинхронными тяговыми двигателями, может быть принята равной 360 кВт. При разгоне поезда со скоростью менее 9 км/ч мощность батареи, естественно, может быть снижена.

#### **5.4.2. Организация движения поездов на электрифицированном участке трехфазной системы электрической тяги без контактной сети на боковых путях станции**

По перегону и по главному пути станции электровоз с составом идет с поднятыми токоприемниками. На боковых путях, включая примыкания к главному пути станции, контактная сеть отсутствует.

Перед съездом с главного пути станции на боковой путь опускание токоприемников может быть выполнено по двум вариантам. По первому варианту опускание токоприемников производится машинистом электровоза в ручном режиме по плакатам: «Подготовиться к опусканию токоприемника», «Опустить токоприемник», указанным в графике движения поездов, по радиосвязи между диспетчером и машинистом при возникновении ситуации, требующей очистки пути главного хода станции.

Второй вариант опускания токоприемников является автоматическим по радиомаяку и рассмотрен в разделе 5.3. Для этого варианта необходим дополнительный комплект оборудования — напольного передающего (радиомаяк) и приемного на электровозе. Работа комплекта оборудования может быть осуществлена в следующем режиме: напольные радиомаяки работают постоянно, т.е. постоянно выдают радиосигнал, при этом приемный комплект на электровозе включается в работу машинистом в начале межстанционной зоны, на которой предусматривается опускание токоприемников.

На рис. 5.5 в представлено продолжение функциональной схемы рис. 5.5, а, б с соблюдением нумерации элементов функциональной схемы с введением нового элемента — бортового компьютера 12 на электровозе 2.

Опора 6 с передающим устройством 9 устанавливается в зоне контактной сети перед съездом с главного хода на боковой путь, при переходе с одного пути на другой путь или при пересечении двух магистральных путей. Передающее устройство 9, 11 передает радиосигнал через приемное устройство 11, 10 бортовому компьютеру 12 — приказ о переводе токоприемников в опущенное положение.

С целью обеспечения надежного перевода токоприемников в опущенное положение, машинистом электровоза токоприемники повторно в ручном режиме переводятся в опущенное положение.

При невыполнении приказа «Опустить токоприемники» машинист электровоза и бортовой компьютер останавливают движение поезда.

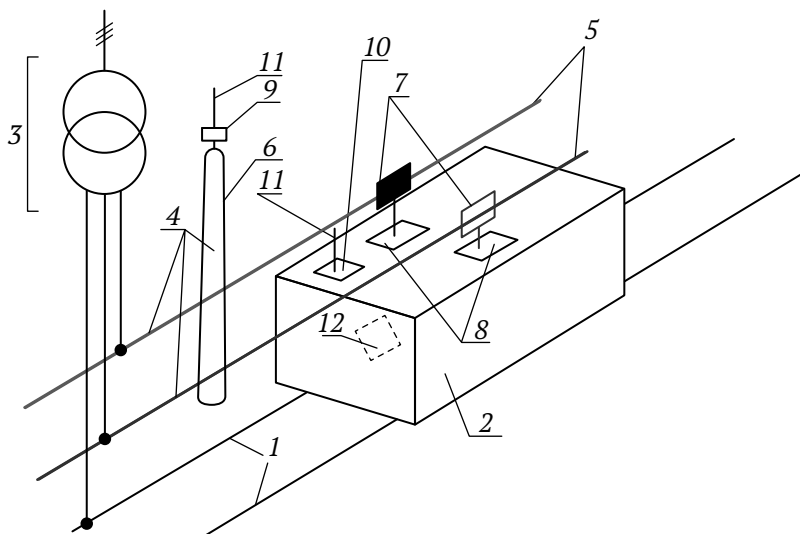


Рис. 5.5, в. Функциональная схема трехфазной системы электрической тяги с автоматической системой управления переводом токоприемников в опущенное состояние через бортовой компьютер 12

После успешного перевода токоприемников в опущенное положение въезд электровоза с составом на боковой путь и его движение по боковому пути происходит по инерции за счет запасенной кинетической энергии или от аккумуляторной батареи, установленной на электровозе, материал о которой рассмотрен и приведен в разделе 5.4.1.

После остановки (стоянки) электровоза с составом, например на боковом пути, для осуществления движения включается в работу аккумуляторная батарея.

После выхода на главный путь станции или на перегон отключается аккумуляторная батарея и машинистом электровоза в ручном режиме токоприемники переводятся в поднятое положение с включением подзарядного устройства аккумуляторной батареи.

По материалам раздела 5.3. 09 января 2020 года в ФИПС поступила заявка № 2020/00540 «Система электрической тяги железных дорог» на выдачу патента на изобретение.

ФИПСом, затем «Арбитражным судом по интеллектуальной собственности» отказано в выдаче патента на изобретение со ссылкой на патент КНР. Приведено несовместимое сравнение движения трамвайного вагона на аккумуляторной батарее без контактной сети между остановками с движением поезда с составом, весом 6000 тонн, в межподстанционной зоне с контактной сетью и использованием тепловоза-толкача или аккумуляторной батареи при выходе на главный путь с малой скоростью после стоянки по боковому пути.

После перевода токоприемников в опущенное положение по первому или второму вариантам и съезде поезда на боковой путь приведем по формуле предполагаемого изобретения на процессы при движении электровоза по электрифицированному и неэлектрифицированному участкам.

Система тягового электроснабжения железной дороги включает неэлектрифицированный участок, содержащий рельсы и электрифицированный участок, содержащий контактную сеть: два контактных провода, тяговые подстанции с трехфазными трансформаторами, рельсы, соединенные с одной из фаз трехфазного трансформатора, электроподвижной состав с тяговыми двигателями и с устройствами токосъема, закрепленными на электроподвижном составе с возможностью отделения их от контактных проводов, отличающаяся тем, что при отключенных от контактных проводов тяговые двигатели получают питание от аккумуляторной батареи, установленной на электроподвижном составе и подключенной через подзарядное устройство, установленное на электроподвижном составе к одному токоприемнику.

## **5.5. УСТРОЙСТВА КОНТАКТНОЙ СЕТИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПРИ «БОКОВОМ» ТОКОСЪЕМЕ**

### **5.5.1. Схема питания контактной сети станции и поста секционирования**

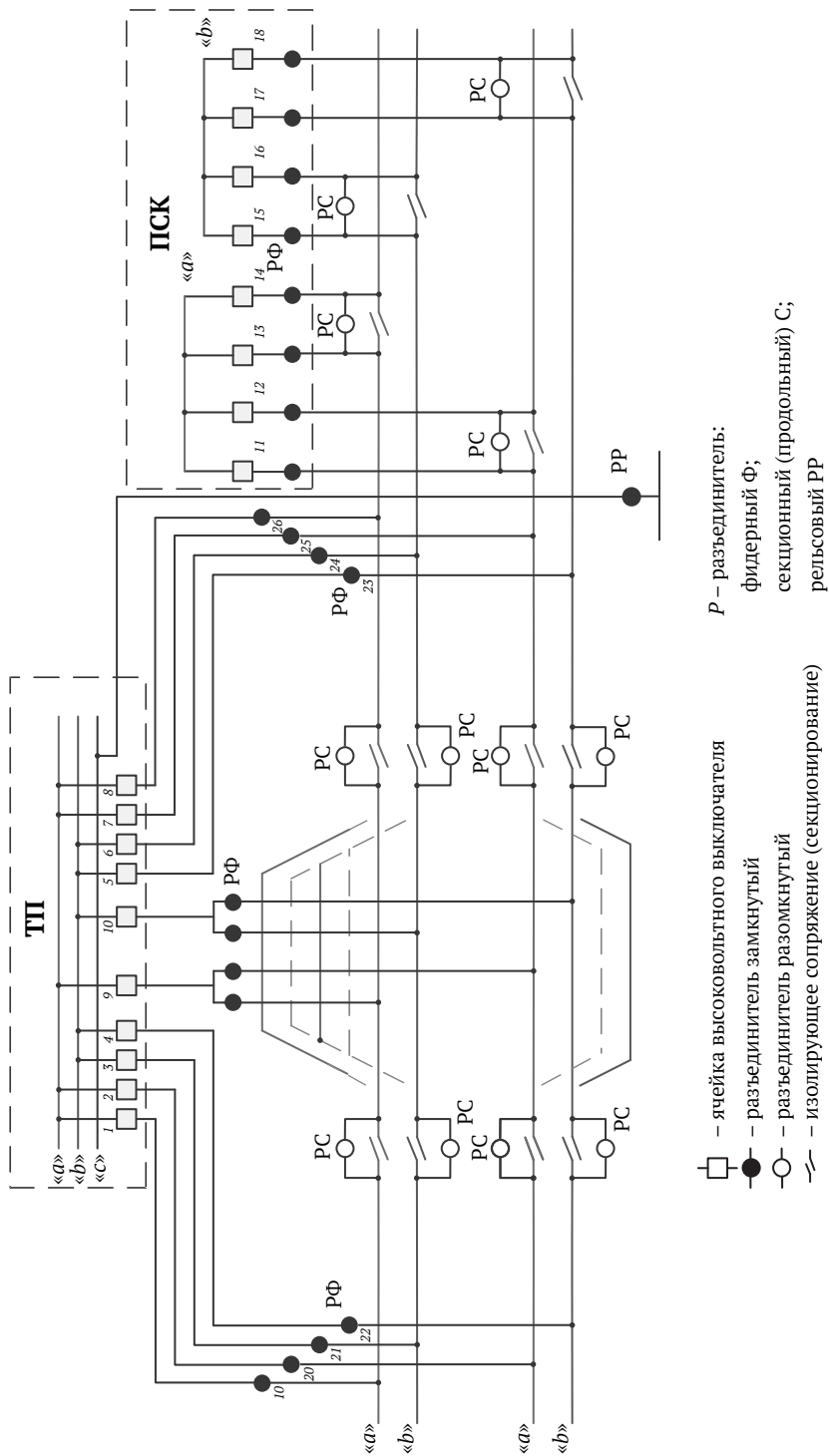
На рис. 5.6 показана упрощенная схем питания двухпроводной контактной сети двухпутного участка с тяговой подстанцией и постом секционирования (ПСК). Два воздушных (контактных) провода подключены к двум фазам «а» и «b», третий провод (тяговые рельсы) подключен к фазе с сборных шин 27,5 кВ тяговой подстанции. К сборным шинам питающие фидеры подключены через блок высоковольтных выключателей (представлены на рис 5.6: разъединитель РНД31–35/1000У1, выключатель ВВС-27,5||-20/630УХЛ1, РНД31–35/1000У1), а к контактными проводам — через фидерные разъединители РФ. Для контактных проводов перегонов двухпутного участка применено восемь питающих фидеров и два блока высоковольтных выключателей с четырьмя фидерными разъединителями для питания контактной сети четного и нечетного участков станции.

Секции контактных проводов главных путей станции отделены от проводов контактной сети перегонов изолирующими сопряжениями (схемы секционирования) с шунтирующими секционными разъединителями РС.

Боковые пути (рис. 5.6) схематично представлены только рельсами, контактная сеть на боковых путях отсутствует.

Электрическая схема образования двух узлов (двух сборных шин фаз «а» и «b») в ПСК использует для каждого узла по четыре высоковольтных выключателя и по четыре фидерных разъединителя. Изолирующие сопряжения шунтированы секционными разъединителями РС.

Схема питания и секционирования контактной сети, показанная на рис. 5.6, позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение даже в случае перерыва (сбоя) питания любой секции контактной сети между двумя тяговыми подстанциями.



- – ячейка высоковольтного выключателя
- – разъединитель замкнутый
- – разъединитель разомкнутый
- ⋈ – изолирующее сопращение (секционирование)
- Р – разъединитель;
- Ф – фидерный Ф;
- С – секционный (продольный) С;
- РР – рельсовый РР

Рис. 5.6. Упрощенная схема питания двухпроводной контактной линии двухпутного участка с тяговой подстанцией ТП и постом секционирования ПСК

### 5.5.2. Секционирование контактной сети

Секционирование контактной сети станции и перегона производится при помощи воздушного промежутка.

На рис. 5.7 и 5.8 показано секционирование контактной сети в пределах 3-х и 5-ти пролетов. В центральном пролете П два провода станции и перегона проходят параллельно в вертикальной плоскости отдельно каждой фазы «а» и «b», причем провода одноименных фаз находятся на расстоянии не более 100 мм друг от друга и, следовательно, одновременно находятся во взаимодействии (контакте) с движущимися ползками токоприемников, обеспечивая боковой токосъем.

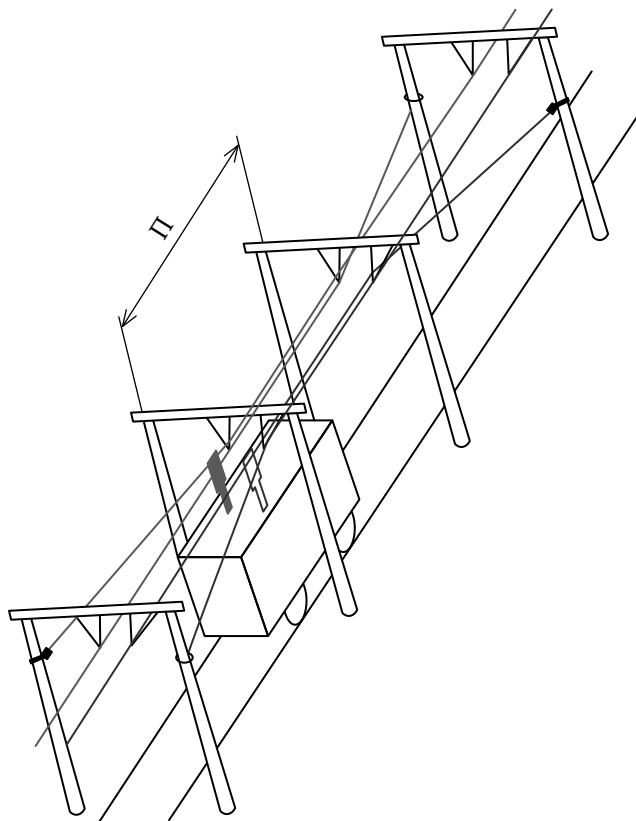


Рис. 5.7. Схема секционирования двух секций контактной сети в трех пролетах

После пролета П в направлении перегона провода станции в промежутке одного (рис. 5.7) или двух (рис. 5.8) пролетов от центрального пролета П постепенно уходят в сторону на анкеровку к опорам контактной

сети: провода одной фазы, например «а», через натяжитель (ретрактор), провода другой фазы «b» к глухой анкерровке. Аналогичная ситуация происходит с проводами перегона к станции с разницей в том, что провод фазы «а» уходит к опоре контактной сети на глухую анкерровку, а провод фазы «b» — через натяжитель (ретрактор).

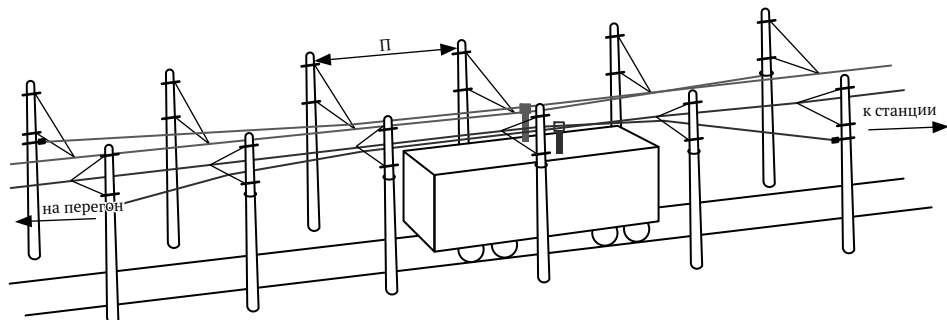


Рис. 5.8. Схема секционирования двух секций контактной сети в пяти пролетах

### 5.5.3. Профиль сечения и особенности определения износа контактного провода в однофазной и в трехфазной системах электрической тяги

В главе 3 приведены трехфазные системы электрической тяги ТСЭТ: система с горизонтальным расположением полоза токоприемника под контактным проводом, обеспечивающая токоъем «понизу», и система с вертикальным расположением полоза токоприемника относительно контактного провода, обеспечивающая «боковой» токоъем.

В однофазной системе электрической тяги ОСЭТ, также как и в трехфазной системе ТСЭТ с токоъемом «понизу», в качестве контактного провода могут быть применены медный и реже со сплавом бронзы контактные провода.

На рис. 5.9 представлены два вида профиля медных контактных проводов фасонного МФ и фасонного овального МФО, применяемых в системе ОСЭТ. Основные данные контактных проводов приведены в табл. 5.2.

У фасонных МФ и фасонных овальных МФО проводов в верхней части имеются две продольные канавки для захвата провода зажимами (рис. 5.10) при подвешивании контактного провода медными струнками к несущему тросу.



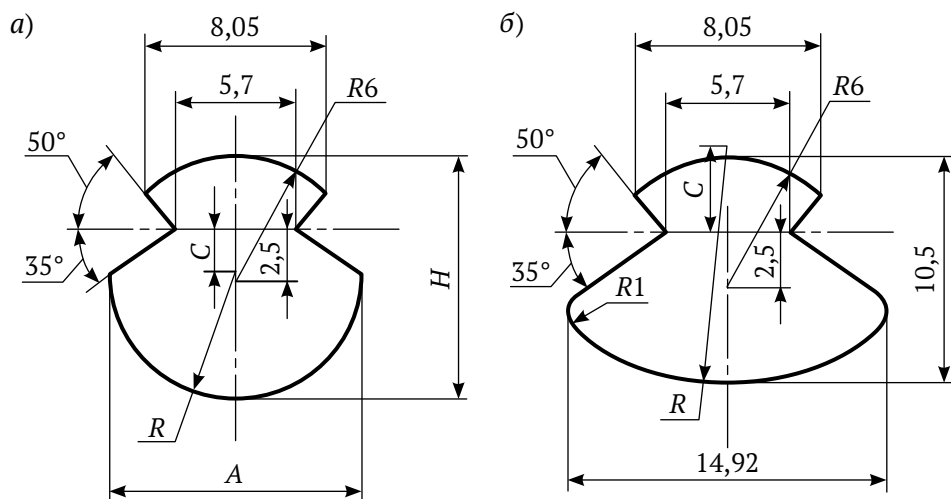


Рис. 5.9. Профили сечения контактных проводов:  
 а – фасонный; б – фасонный овальный 100 мм<sup>2</sup>

Таблица 5.2

### Основные данные медных контактных проводов

Площадь сечения провода, 100 мм <sup>2</sup>	Размеры, мм				Временное сопротивление разрыву медного провода, Гпа	Масса 1 км провода, кг
	A	H	C	R		
85	11,76	10,8	1,3	6,0	0,368	755
100	12,81	11,8	1,8	6,5	0,363	890
150	15,50	14,5	3,2	7,8	0,353	1335

Известно, что несущий трос в системе ОСЭТ служит: для подвешивания через струнки контактного провода, для увеличения сечения контактной подвески с целью пропуска значительных токов нагрузки и снижения потерь электрической энергии в подвеске. Кроме того, несущий трос участвует в обеспечении зигзага и, главное, при скоростном движении — беспровесного положения контактного провода.

В системе с токо съемом «понизу» происходит износ нижней части контактного провода с допустимым максимальным износом площади [97] профиля сечения контактного провода  $S$ , равном  $0,35S$ .

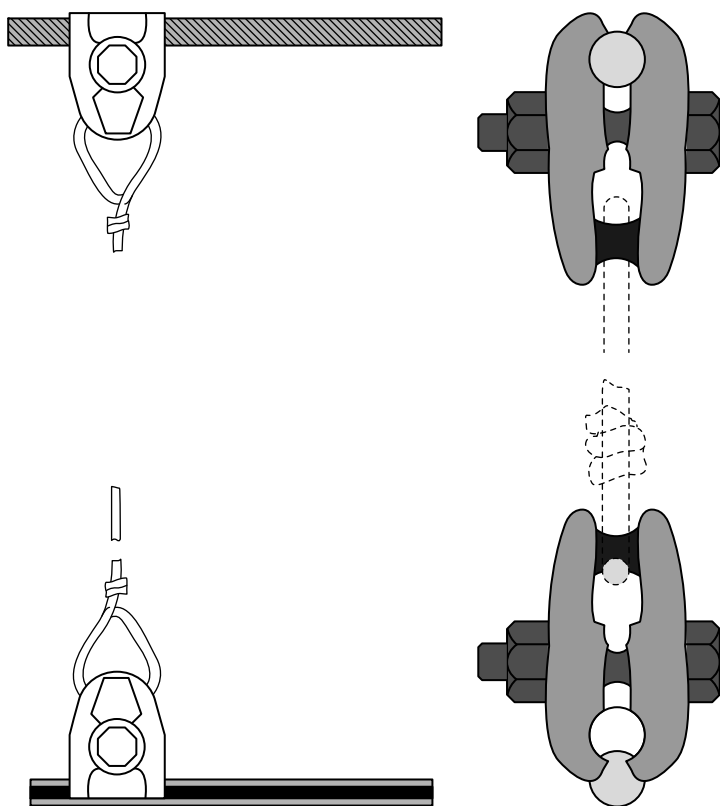


Рис. 5.10. Схема устройств подвешивания контактного провода к несущему тросу

В трехфазной системе электрической тяги (ТСЭТ) имеются особенности профиля сечения контактного провода, зажимов и устройств крепления провода к поддерживающим конструкциям опоры. В системе ТСЭТ с «боковым» токосъемом из-за сложности бокового крепления контактный провод с указанным профилем не может быть использован. Нужен другой профиль контактного провода.

На рис. 5.11 представлена схема круга профиля сечения контактного провода без износа и профиль сегмента сечения износа контактного провода.

Принятый в однофазной системе тягового электроснабжения износ контактного провода  $\Delta S$  составляет 0,35 площади его расчетного сечения. Износ контактного провода по [97] и ПУТЭКС предлагается провести по системе сложных замеров высоты  $H$  (см. рис. 5.9) контактного провода.

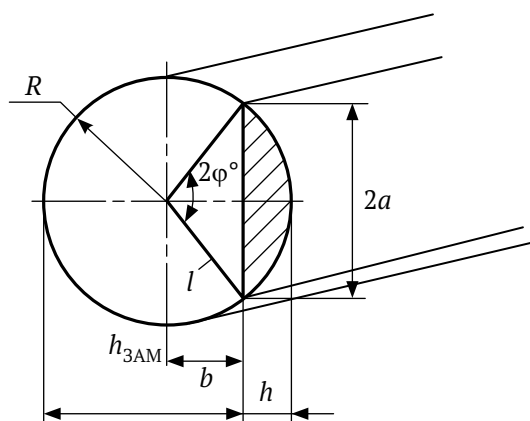


Рис. 5.11. Схема круга профиля сечения контактного провода с заштрихованным сегментом:  
 $R$  — радиус круга;  $h$  — высота сегмента износа;  $2\varphi^\circ$  — угол дуги сегмента;  
 $2a$  — длина основания сегмента износа;  
 $l$  — образующая конуса с основанием  $2a$  и равная  $R$ ;  $b$  — высота конуса

Рассмотрим путь оценки износа контактного провода с использованием видеокамеры, установленной на подвижном составе, направленной на контактный провод со стороны токосъема и соединенной с бортовым компьютером.

По результатам замеров следов износа на контактном проводе по компьютерной программе определяются величины  $a$ ,  $\varphi^\circ$ , затем расчеты  $\sin \varphi^\circ = \frac{a}{R}$ ,  $\varphi^\circ$ ,  $b = \cos \varphi^\circ R$  и результат  $h = R - b$  — высота сегмента износа.

Проверка соответствия допустимому уровню износа 0,35:

$$\text{При } S = \pi R^2 = 3,14 \cdot 5,645^2 = 100 \text{ мм}^2$$

$$S_{\text{изн}} = 0,35 \cdot S = 35 \text{ мм}^2.$$

$$S_{\text{ост,доп}} = 65 \text{ мм}^2.$$

Определение  $h_{\text{ост}}$  по  $S_{\text{ост,доп}} = 65 \text{ мм}^2$ :

$$h_{\text{ост}} = \sqrt{\frac{S_{\text{ост,доп}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{65}{3,14}} = \sqrt{20,7} = 4,55 \text{ мм.}$$

По принятой допустимой потере износа площади сечения круга  $S_{\text{кр}}$  — 0,35 о.е. допустимое снижение радиуса  $R_{\text{круга}}$  (высоты износа  $h$ ) соответствует  $5,645 \text{ мм} - 4,55 \text{ мм} = 1,095 \text{ мм} \approx 1,1 \text{ мм}$ , что составляет  $1,095/5,645 = 0,194 \approx 0,2$  о.е.

Таким образом, уменьшение площади круга на 35 % соответствует уменьшению диаметра круга (уменьшению высоты сегмента износа на 20 %).

Износ контактного провода, снижающий площадь сечения провода  $S$ , вызывает увеличение электрического сопротивления протекания тока на грузки и происходит увеличение потери электрической энергии.

Кроме увеличения потери электрической энергии при вертикальном токосъеме, износ контактного провода влияет и на конструктивные особенности подвешивания контактного провода.

#### **5.5.4. Выбор профиля контактного провода с зажимом для вертикального подвешивания к консоли опоры через гибкие или жесткие струнки**

При вертикальном токосъеме возникают затруднения при подвешивании контактного провода. Зажим провода должен обеспечивать не только надежное присоединение к устройству крепления на опоре (стойке), но и не должен соприкасаться с ползком токоприемника. При этом необходимо выполнение следующих требований: использование максимальной площади сечения контактного провода, допускающего износ не более 35 %; простое конструктивное исполнение и легкий монтаж зажима на контактном проводе; минимальное нарушение профиля сечения контактного провода. Эти требования учтены в вариантах выбора профиля контактного провода и зажимов, представленных на рис. 5.12 с приведенными краткими показателями:

*а* — снижение площади профиля сечения контактного провода из-за 2-х прорезей (канавок) сверху и снизу по всей длине контактного провода; площадь сечения сегмента возможного токосъема определяется высотой сегмента  $h-R$ ; простое изготовление скобы зажима (соответствует вариантам *а*, *б*, *в*);

*б* — увеличенная (наибольшая среди вариантов *а*, *в*, *г*, *д*) площадь сечения сегмента возможного токосъема за счет смещения прорезей (канавок) влево от вертикальной оси профиля сечения контактного провода и определяется высотой сегмента  $h = R$ ; две прорези (канавки) сверху и снизу по всей длине контактного провода, снижающие площадь профиля сечения контактного провода;

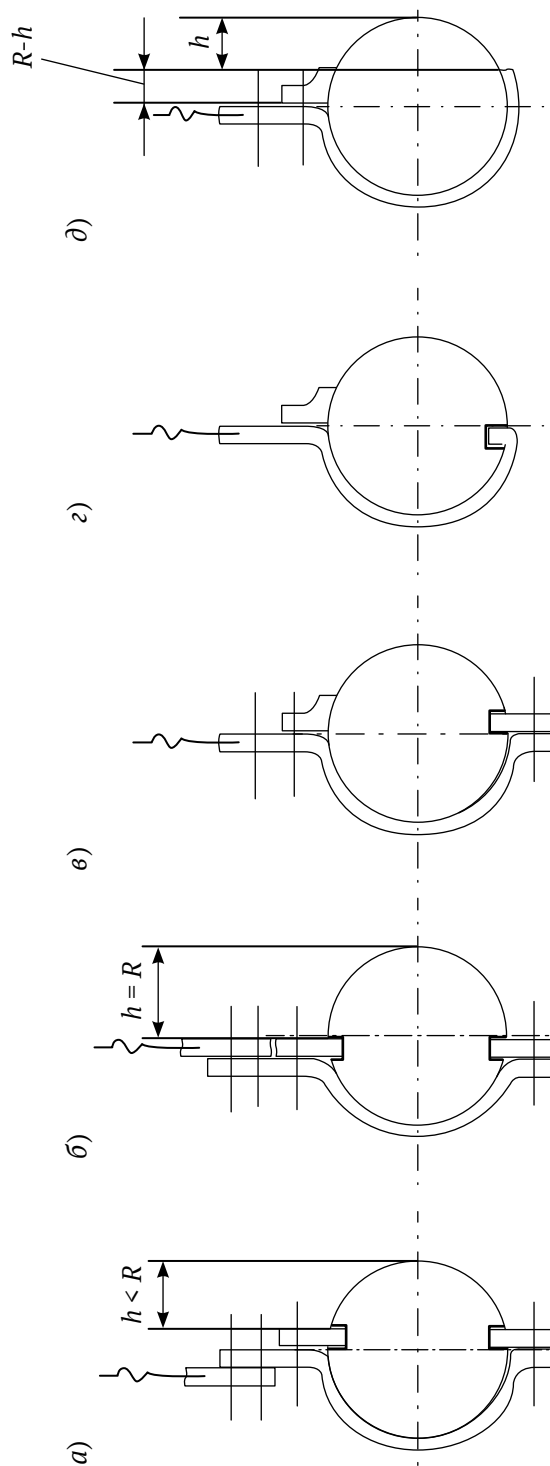


Рис. 5.12. Схемы профилей сечения контактного провода и зажимов для вариантов крепления копоре

*в* — увеличение площади сечения контактного провода — одна прорезь (канавка) по всей длине снизу контактного провода; появление фиксирующей накладки зажима (варианты *в*, *г*, *д*);

*г* — увеличение площади сечения контактного провода — одна прорезь (канавка) по всей длине внизу контактного провода; сложности изготовления скобы зажима и ее монтажа на контактном проводе;

*д* — более простое по сравнению с вариантами *а*, *б*, *в*, *г* изготовление скобы зажима; профиль сечения контактного провода без нарушения; длина (вдоль контактного провода) зажима (скобы и фиксирующей накладки) и количество болтовых соединений определяются механическим расчетом механической нагрузки контактного провода на зажим.

Из сравнения показателей рассмотренных вариантов наиболее приемлемым, казалось бы, является вариант *д*. Однако крепление контактного провода в указанной скобе зажима может нарушить надежность работы токосъема, тем более с незначительной величиной площади сечения сегмента токосъема.

Схему крепления зажима на контактном проводе можно принять по варианту *б* на рис. 5.12. При боковом токосъеме (см. рис. 3.8) происходит нажатие полоза токоприемника на контактный провод, который при дополнительной ветровой нагрузке в горизонтальном направлении может отклоняться от вертикальной оси (рис. 5.13) на некоторые углы  $\alpha$ , принятые на рис. 5.13, *б* —  $15^\circ$  на рис. 5.13, *в* —  $20^\circ$  и на рис. 5.13, *г* —  $30^\circ$ .

Стержень зажима в верхней части имеет ушко с отверстием для подвижной насадки на ось конструкции крепления к консоли опоры. Возможность вращения контактного провода со стержнем зажима на оси конструкции при одновременном боковом нажатии полоза токоприемника и воздействии ветровой нагрузки на контактный провод ведет к его отклонению с уменьшением величины зазора  $\Delta x$  между верхней частью полоза и стержнем. При отклонении контактного провода на угол  $\alpha$  величина площади допустимого износа остается постоянной, т.е. площадь допустимого износа при отклонении контактного провода равна площади допустимого износа  $S_{ABCE}$  контактного провода без отклонения. Допустимая площадь износа (контактного провода) (см. раздел 5.5.3) от площади круга контактного провода равна  $S_{\text{доп}} = 0,35 S_{\text{круга}}$  при равенстве высоты сегмента износа  $h$ .

Одновременно с появлением угла отклонения контактного провода  $\alpha$  происходит его повышение относительно исходной горизонтальной линии при  $\alpha = 0$  на величину  $\Delta y$  (рис. 5.13, *б*, *в*, *г*).

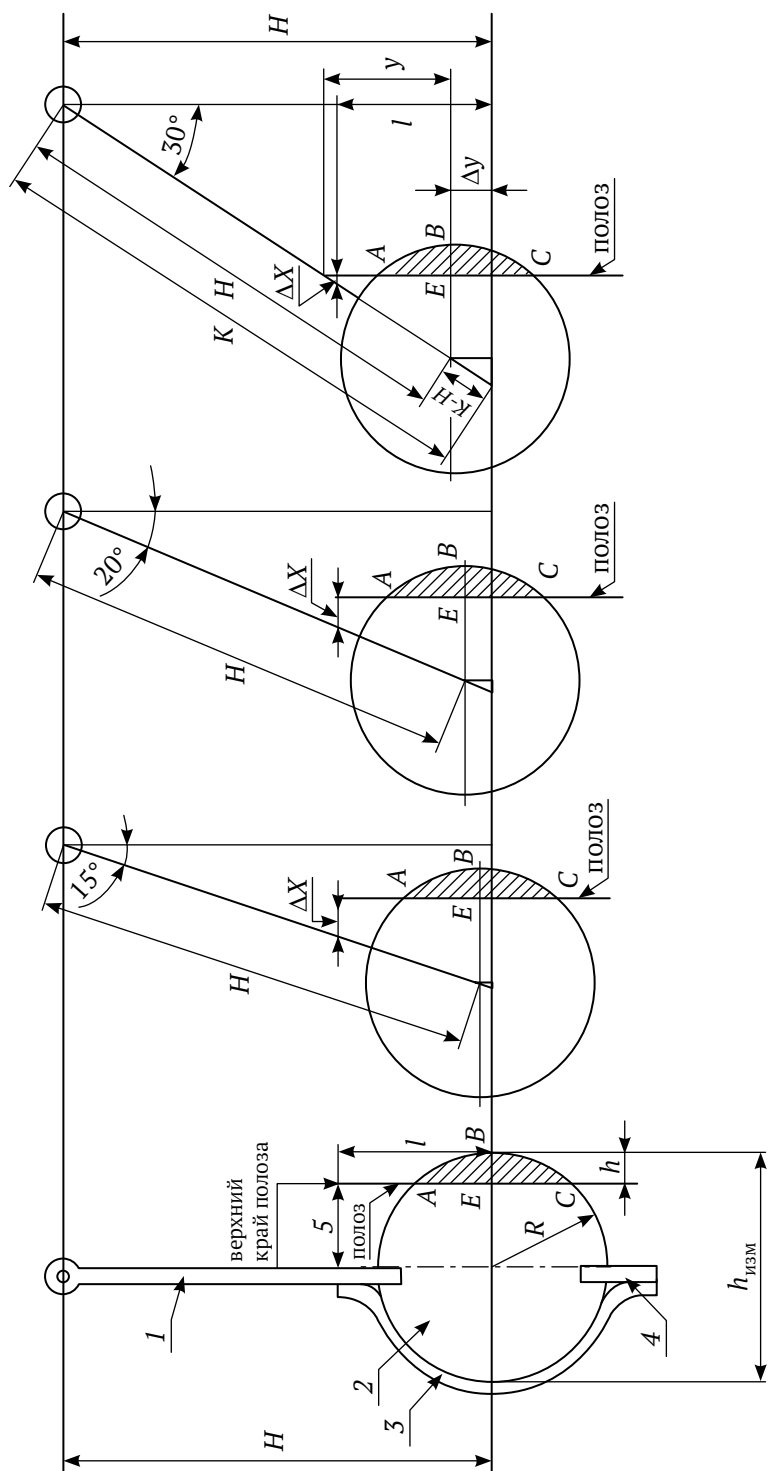


Рис. 5.13. Фрагменты схемы взаимного положения полоза токоприемника и контактного провода при его отклонении от вертикального положения на угол  $\alpha - 0^\circ$ ;  $\beta - 15^\circ$ ;  $\gamma - 20^\circ$ ;  $\delta - 30^\circ$ :

1 — стержень зажима; 2 — контактный провод; 3 — скоба; 4 — закладка верхом полоза и стержнем зажима ( $\Delta x$ )

Расчет повышения контактного провода  $\Delta y$  и зазора  $\Delta x$  в зависимости от угла отклонения  $\alpha$  может быть определен с использованием графического построения и числовых значений тригонометрических функций. В выражении формулы расчета зазора  $\Delta x$  используется значение повышения контактного провода (см. рис. 5.13, з).

$$\Delta y = (K - H) \cdot \cos \alpha, \quad (5.1)$$

где:  $H$  — высота подвешивания контактного провода равна длине линии от точки подвешивания (стержень конструкции крепления к конструкции опоры до горизонтальной оси контактного провода);  $K$  — длина линии стержня зажима от точки подвешивания до пересечения с горизонтальной осью контактного провода;

$$K = \frac{H}{\cos \alpha}. \quad (5.2)$$

После подстановки формулы (5.2) в формулу (5.1) получим:

$$\Delta y = H(1 - \cos \alpha). \quad (5.3)$$

С использованием рис. 5.11 формула определения зазора:

$$\Delta X = \frac{(y + \Delta y) - l}{\operatorname{ctg} \alpha}, \quad (5.4)$$

где  $l$  — длина высоты верхнего края полоза относительно горизонтальной оси контактного провода и после подстановки  $\Delta y$  (формулы 5.3) величина зазора:

$$\Delta X = \frac{y + H(1 - \cos \alpha) - l}{\operatorname{ctg} \alpha}. \quad (5.5)$$

Из расчетов следует, что при отклонении  $\alpha = 30^\circ$  контактного провода радиусом  $R$  и высотой подвеса  $H = 4R$  верхний край полоза токоприемника практически (с зазором 1,97 о.е.) касается стержня зажима контактного провода. Такой угол отклонения ( $\alpha = 30^\circ$ ) при указанных размерах (радиусе контактного провода, высоте подвеса и положения верхней части полоза токоприемника) недопустим.



Проверка формул (5.3) и (5.5) на примере рис. 5.11, г.

Исходные данные	Решение
$\alpha = 30^\circ;$ $H = 100;$ $\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866;$ $\operatorname{ctg} 30^\circ = \sqrt{3} = 1,73;$ $y = 28;$ $l = 38$	$\Delta y = H(1 - \cos \alpha) = 100 \cdot 0,134 = 13,4 \text{ о.е.}$ (на рис. 5.11, г — $\Delta y = 13 \text{ о.е.}$ ) $\Delta X = \frac{28 + 13,4 - 38}{1,73} = 1,97 \text{ о.е.}$ (на рис. 5.11, г — $\Delta X = 2 \text{ о.е.}$ )

На величину зазора  $\Delta X$ , кроме угла отклонения  $\alpha$ , влияет и высота подвеса  $H$ . При уменьшении высоты подвеса (с неизменным радиусам  $R$  контактного провода и положением верхней части полоза токоприемника) пропорционально уменьшается величина зазора  $\Delta X$ . Уменьшение  $H$  (5.5) в два раза, по сравнению с  $H$  (см. рис. 5.13, а), приводит к снижению величины зазора  $\Delta x$  также в два раза.

Рассмотренные формулы и положения могут быть использованы при расчете параметров подвеса контактного провода при свободном его подвешивании к консоли (траверсе) опоры.

Для уменьшения угла отклонения контактного провода при одновременном воздействии ветровой нагрузки и нажатия полоза в устройстве подвешивания необходимо применение демпфера, действие которого аналогично действию демпфера, рассмотренного в разделе 5.5.5.

### 5.5.5. Жесткое и полужесткое крепление контактного провода к консоли опоры

При подвешивании к консоли (траверсе) опоры зажима с контактным проводом во всех рассмотренных вариантах (см. рис. 5.13, а, б, в, г, д) возможно касание ползком токоприемника элементов зажима. Для исключения такого касания возможно применение жесткого крепления зажима к консоли (траверсе) опоры.

Рассмотрим вариант горизонтального расположения зажима по отношению к контактному проводу, представленному на рис. 5.14. Контактный

провод выполняется с двумя прорезями (канавками) по всей длине контактного провода слева от вертикальной оси, представленный на рис. 5.12, б. Две скобы зажима болтовым соединением жестко крепятся на консоли опоры. Длина зажима вдоль контактного провода, количество болтовых соединений двух скоб зажима определяется расчетом механической нагрузки контактного провода на зажим.

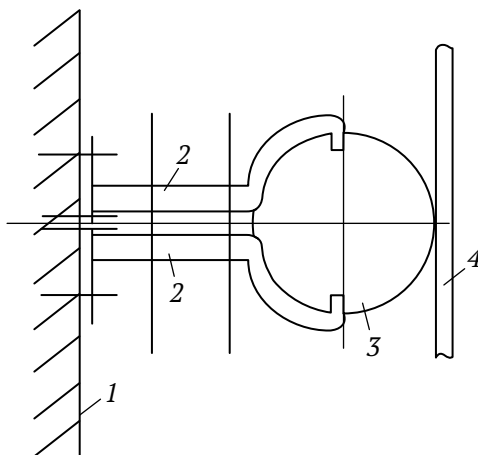


Рис. 5.14. Схема горизонтального расположения зажима с жестким креплением контактного провода к консоли опоры:  
1 — консоль опоры; 2 — скобы зажима; 3 — контактный провод; 4 — полз токоприемника

С другой стороны, включение в систему токосяема жесткой точки крепления контактного провода ухудшит процесс токосяема, особенно при скоростном движении.

Для снижения жесткости крепления к консоли опоры контактного провода в конструкцию зажима необходимо ввести механическое демпферное устройство, представленное на рис. 5.15, которое имеет возможность перемещения провода перпендикулярно оси пути. Причем перемещение должно происходить только в сторону, противоположную от оси пути (в поле). Это необходимо, чтобы полз токоприемника при проходе «отжал» КП в сторону оси пути. Перемещение точки подвеса к оси пути должно быть ограничено, чтобы не допустить возможность схлестывания двух КП с разными фазами при раскачке ветром.

Механические нагрузки от массы контактного провода, от ветровых и гололедных воздействий через зажим и поршень передается через блоки шарикоподшипников на внутреннюю поверхность корпуса цилиндра. Кроме того, блоки шарикоподшипников служат для облегчения

перемещения поршня внутри цилиндра и ограничивают перемещение контактного провода в сторону полоза токоприемника при воздействии ветровой нагрузки, направленной против силы нажатия полоза на контактный провод.

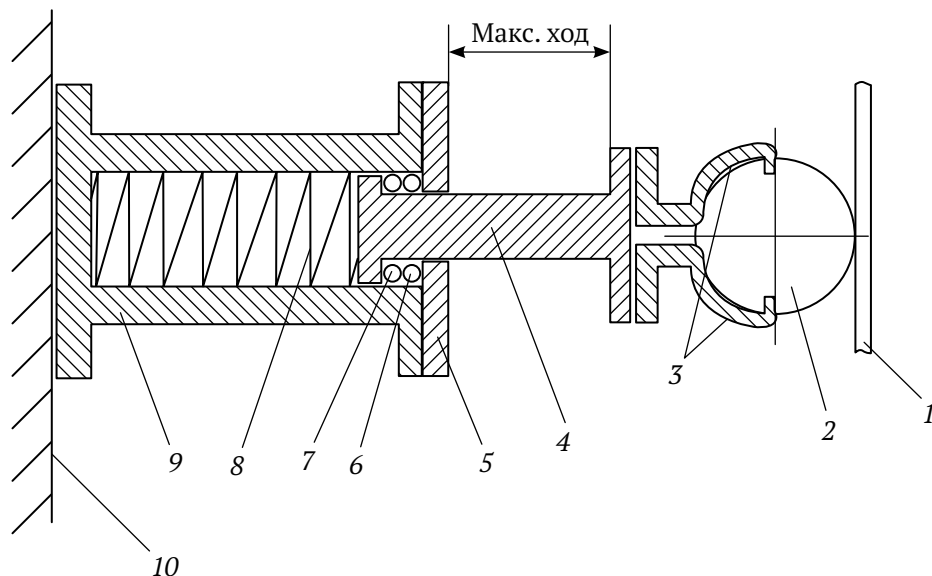


Рис. 5.15. Схема крепления контактного провода к консоли опоры через демпферное устройство:  
 1 — полоз токоприемника; 2 — контактный провод; 3 — зажим;  
 4 — поршень; 5 — флянец; 6 (7) — шарикоподшипник неподвижный (подвижный);  
 8 — пружина; 9 — корпус цилиндра; 10 — консоль опоры

Положение элементов устройства крепления контактного провода на рис. 5.15 показано при отсутствии давления со стороны токоприемника на контактный провод. Пружина демпферного устройства находится в свободном состоянии, поршень — в исходном правом положении. При нажатии полоза токоприемника на контактный провод через зажим происходит сжатие пружины, что ведет к снижению жесткости крепления контактного провода и к улучшению токосъема. Жесткость пружины по мере сжатия увеличивается от нуля до максимального значения.

Недостатком действия демпферного устройства (см. рис. 5.15) является возникновение жесткости пружины при незначительных горизонтальных нагрузках. Состояние свободного подвешивания контактного провода при таких незначительных нагрузках производится введением свободного хода поршня в демпферном устройстве.

Фрагмент состояния пружины и поршня, обеспечивающих нахождение КП в рабочей области и их отжатие при проходе токоприемника, схематично показан рис. 5.16.

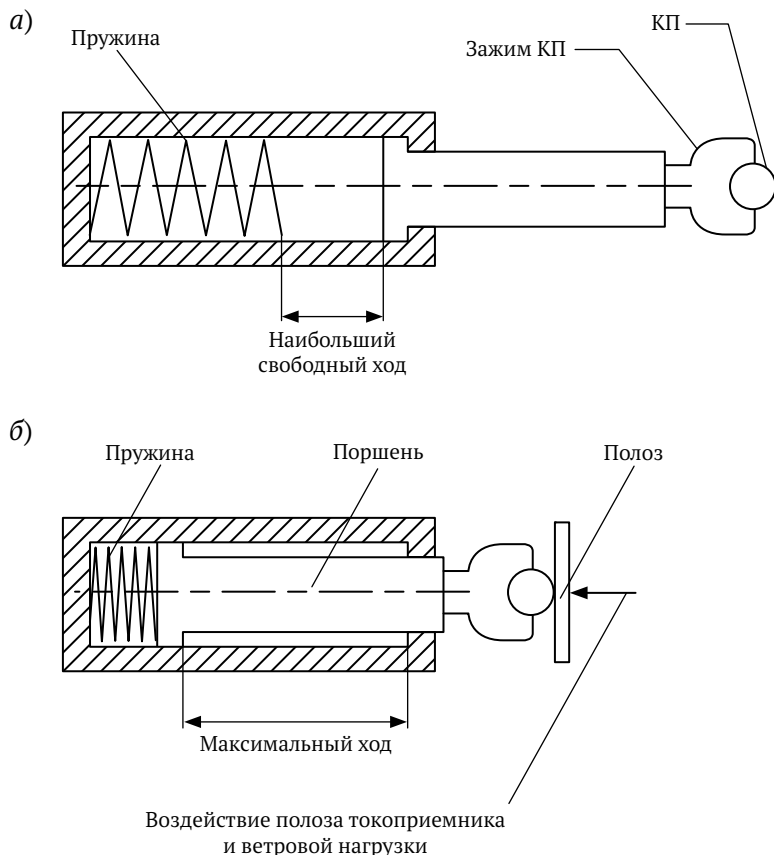


Рис. 5.16. Схема положения поршня и состояния пружины:  
а — свободное; б — сжатое

Положение КП и поршня при отсутствии горизонтальных сил показано на рис. 5.16, а, а при действии нажатия полза токоприемника и ветра от оси пути показано на рис. 5.16, б при максимальном ходе поршня, который равен максимальному горизонтальному смещению КП от оси пути в точке подвеса. Смещение провода в сторону к оси пути в точках подвеса конструктивно ограничено. Для рассматриваемой точки подвеса необходимо выбрать минимальную жесткость пружины и максимальных ход поршня, равный такой величине, при которой отклонение КП в середине пролета не должно превышать максимальную величину.

Минимальная жесткость пружины должна обеспечить возвращение поршня при проходе токоприемника электровоза и при отсутствии ветра направлением от оси пути.

При жестком и полужестком креплении по схемам на рис. 5.14 или 5.15 в качестве варианта может быть рассмотрено применение существующего профиля сечения контактного провода, например МФ-100 с модернизированным креплением контактного провода.

#### **5.5.6. Организация вертикального зигзага контактного провода при боковом токосъеме**

При боковом токосъеме трехфазной системы электрической тяги важной задачей является разработка способа обеспечения равномерного износа полоза токоприемника.

В существующей системе постоянного тока 3,0 кВ и в однофазной системе переменного тока 25 кВ 50 Гц полоз токоприемника электроподвижного состава (ЭПС) располагается под подвешенным с натяжением контактным проводом, обеспечивая токосъем «понизу» с горизонтальным расположением полоза. С увеличением натяжения контактного провода уменьшается стрела провеса, снижается количество отрывов полоза токоприемника от контактного провода, что ведет к улучшению процесса токосъема. Контактный провод монтируется зигзагообразно с отклонением от оси пути в разные стороны у соседних опор на глубину 300 мм, обеспечивая равномерный износ вставок полоза токоприемника по его длине.

Для трехфазной системы электрической тяги устройства вертикального зигзага контактного провода с боковым токосъемом характеризуются двумя состояниями натяжения контактного провода:

- с незначительным натяжением, допускающим организацию вертикального зигзага в одном пролете;
- с максимальным натяжением при организации вертикального зигзага в нескольких пролетах.

#### **Устройство вертикального зигзага контактного провода с боковым токосъемом и с незначительным натяжением контактного провода**

Рассмотрим простую контактную подвеску одного контактного провода с незначительным его натяжением и закрепленного непосредственно на поддерживающих конструкциях.

При боковом токосъеме равномерный износ вставок вертикально расположенного полоза токоприемника [91] достигается стрелой провеса контактного провода, верхний уровень которой расположен в точке подвеса (крепления) провода двух соседних опор, а нижний — в середине пролета.

Однако при простой контактной подвеске со слабым натяжением контактного провода под воздействием ветровой нагрузки и давления полоза токоприемника возможно значительное (недопустимое) отклонение от нейтрального положения контактного провода без нагрузки (ветра и давления полоза), вызывающего ухудшение токосъема и необходимость снижения длины пролета.

Поскольку разрабатываемая контактная подвеска принципиально отличается от существующей, многие параметры и требования, устанавливаемые в нормативных документах, таких как «СП Тяговое электроснабжение» [100], «Нормы проектирования контактной сети» [101], не могут быть применены. В частности, допустимая величина бокового смещения КП от оси пути для существующей контактной сети принята на прямом участке и на кривой с радиусом  $> 2000$  м — 300 мм, а на кривой с радиусом  $\leq 2000$  м — 400 мм с максимальной величиной, соответственно 400 мм и 500 мм. Данное значение выбрано для исключения возможности попадания КП под полоз токоприемника.

При боковом токосъеме КП может выйти за пределы полоза при воздействии ветровой и гололедной нагрузок в результате несоблюдения основных требований при расчете взаимного расположения контактного провода и полоза токоприемника.

Для обоснования указанных выше основных конструктивных параметров контактной подвески для ТСТЭ нужно исходить из общих требований, предъявляемых к габариту подвижного состава и габариту приближения строений, а также из общих требований к контактной подвеске как таковой. Иначе можно отменить требование обеспечения качества токосъема, что должно быть исключено.

При выборе размеров рабочей области полоза токоприемника, его расположения в поперечной плоскости и высоты точек подвеса КП необходимо чтобы полоз токоприемника был в существующих габаритах подвижного состава. Предлагаемый вариант с размерами показан на рис. 5.17, размеры указаны в миллиметрах.

Расчеты взаимного расположения контактного провода с боковым токосъемом и с вертикальным зигзагом и полоза токоприемника в пределах габарита подвижного состава выполнены канд. техн. наук А. В. Параниным [102, 103].

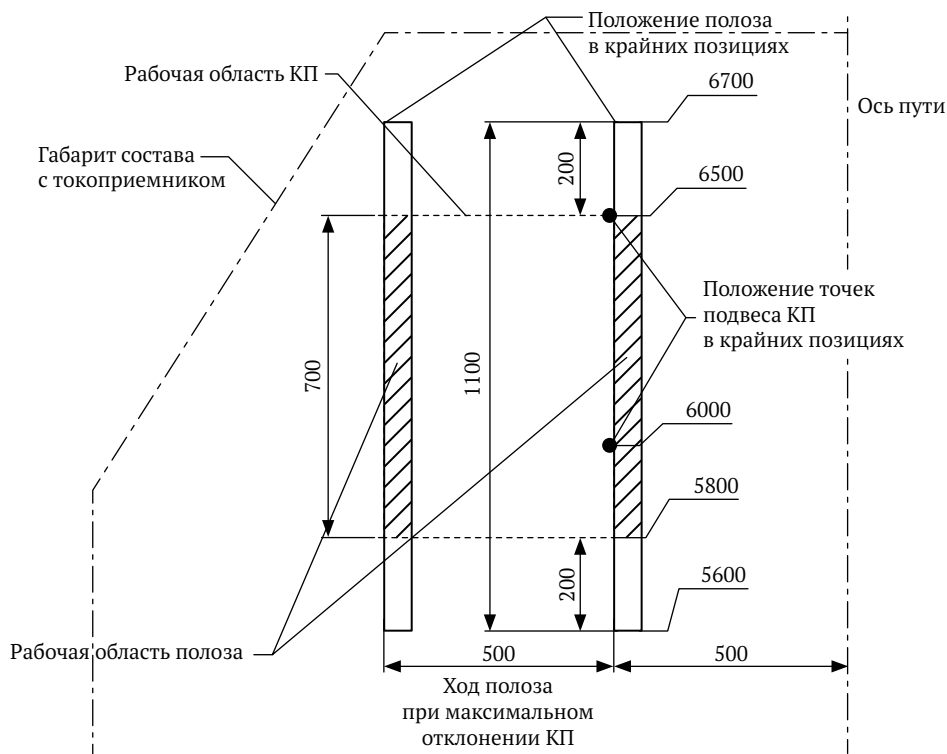


Рис. 5.17. Размеры рабочей области полоза токоприемника, его расположение в поперечной плоскости и высоты точек подвеса КП

Расположение полоза (рис. 5.17) в двух крайних позициях: ближе к оси пути — в нейтральном (без нагрузок ветра и давления полоза) положении токоприемника и дальше от оси пути — при максимальном отклонении КП и при этом ход токоприемника при максимальном отклонении КП составляет не более 500 мм. Данная величина выбрана таким образом, чтобы полоз находился в существующих габаритах подвижного состава.

Максимальная высота точки подвеса КП составляет 6500 мм, минимальная 6000 мм. При этом длина рабочей области (показана на рис. 5.17 штриховкой) полоза принята 700 мм. Сверху и снизу данной области установлено расстояние 200 мм, необходимое для предотвращения попадания КП за полоз. В нормальной эксплуатации КП не должен выходить за границы рабочей области. Вся длина полоза токоприемника составляет 1100 мм. Так как воздушных стрелок в контактной сети для ТСТЭ не предусмотрено, то необходимости в устройстве подхвата КП на воздушных стрелках в данном полозе нет.

Контактный провод в поперечном сечении к оси пути должен находиться от нее на расстоянии от 500 до 1000 мм, а по высоте — от 5800 до 6500 мм над уровнем головки рельсов УГР (см. рис. 5.17, рабочая область КП). Максимальное горизонтальное отклонение КП в сторону от оси пути составляет 500 мм и равно ходу полоза. Это означает, что КП должен касаться полоза во всех рабочих режимах. Ситуация, когда КП выходит за рабочую область в сторону от оси пути, не должна возникать.

### **Устройство вертикального зигзага контактного провода с боковым токосъемом и усиленным натяжением при простой контактной подвеске**

Рассмотрим вариант бокового токосъема при значительном натяжении контактного провода, обеспечивающим горизонтальное положение контактного провода с минимальной стрелой провеса, достигнутой при существующей скоростной контактной подвеске однофазной системы 25 кВ 50 Гц. При таком горизонтально натянутом контактном проводе и вертикальном положении полоза токоприемника будет происходить быстрый износ вставок полоза, так как контактный провод контактирует с поломом практически в одном месте.

Для снижения износа вставок в вертикально расположенном полозе токоприемника натянутый контактный провод монтируется зигзагом в вертикальном положении — с отклонением 500 мм по высоте узлов крепления контактного провода у соседних опор в одном пролете (рис. 5.18, а) и принятом в горизонтальном зигзаге существующих систем постоянно 3,0 кВ и переменного 25 кВ 50 Гц токов.

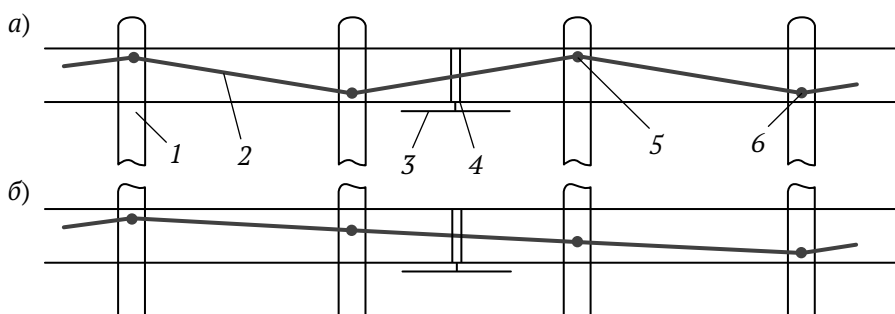


Рис. 5.18. Фрагмент схемы бокового токосъема вертикального полоза токоприемника и натянутого контактного провода с вертикальным зигзагом:

а — в одном пролете; б — в трех пролетах; 1 — опора; 2 — контактный провод; 3 — крыша электровоза; 4 — полз токоприемника; 5 — узел крепления верхнего положения зигзага контактного провода; 6 — узел крепления нижнего положения зигзага контактного провода



Отклонение узлов крепления контактного провода, равное 500 мм, может быть получено в одном пролете с незначительным натяжением контактного провода, влияющим на качество токосъема. Отклонение 500 мм может быть получено в пределах нескольких пролетов контактной подвески (рис. 5.18, б), позволяющих увеличить натяжение контактного провода и уменьшить соответственно отклонение контактного провода под воздействием ветровой нагрузки поперек оси пути.

Недостатком схем монтажа контактного провода с вертикальным зигзагом является увеличение высоты контактного провода от уровня головки рельса на величину зигзага, а также превышение верхней части полоза токоприемника над верхним положением узла крепления контактного провода, что создает дополнительные трудности при пропуске ЭПС в мостовых и туннельных переходах.

Другой вариант бокового токосъема может быть представлен при усиленном, также как и в системе 25 кВ 50 Гц, натяжении контактного провода, но без монтажа вертикального, тем более горизонтального зигзага, а с изменением схемы положения полоза токоприемника.

Полоз устанавливается на токоприемнике в наклонном положении под углом  $\alpha$  (рис. 5.19), к горизонтально расположенному контактному проводу с возможностью вертикального перемещения.

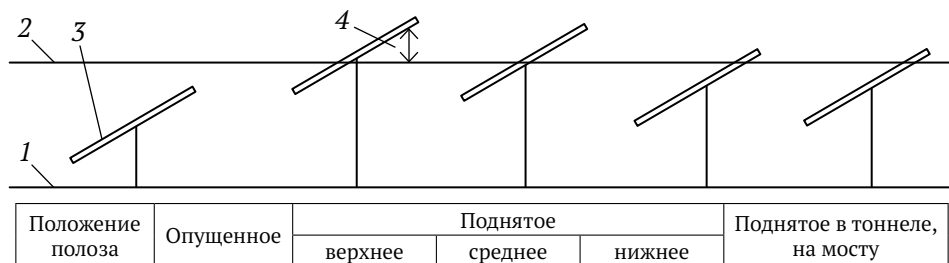


Рис. 5.19. Схема положения полоза токоприемника:  
 1 — уровень крыши электровоза; 2 — контактный провод;  
 3 — полоз; 4 — угол ( $\alpha$ ) наклона полоза относительно контактного провода

При движении электровоза полоз токоприемника относительно контактного провода автоматически переводится из нижнего положения в верхнее и обратно с постоянной частотой или частотой, зависящей от скорости движения электровоза (определяется расчетом износа вставок, в зависимости от длины и угла наклона полоза токоприемника).

Из рассмотренных двух вариантов бокового токосъема при значительном натяжении контактного провода следует, что устройство по второму

варианту устраняет основной недостаток первого, связанного с пропуском в мостовом и тоннельном переходах, но требует усложнения конструкции и введения блока управления полоза токоприемника.

### **5.5.7. Простая подвеска контактного провода с «боковым» токосъемом**

При простой подвеске контактного провода с боковым токосъемом стрела провеса используется при организации вертикального зигзага провода (см. раздел 5.5.6), но наличие жесткой точки подвеса ухудшает качество токосъема.

Боковое давление полоза токоприемника и наличие ветровой нагрузки, перпендикулярной контактному проводу, вызывает при простой подвеске свободное отклонение контактного провода от его нейтрального положения, ограниченное только в точках подвеса. При движении токоприемника в пролете между опорами обеспечивается качественный токосъем полозом токоприемника с контактной сети. В точке жесткого подвеса происходит удар полоза токоприемника с дальнейшим его отрывом от контактного провода и после прохода жесткой точки подвеса — жесткое соединение с проводом. При этом ухудшается качество токосъема.

Улучшению качества токосъема при жестком горизонтальном креплении контактного провода при боковом токосъеме (см. рис. 5.14) направлена схема полужесткого горизонтального крепления контактного провода к консоли опоры через демпферное (поршневое) устройство (см. рис. 5.15). Другим вариантом снижения жесткого крепления является схема маятникового подвешивания контактного провода к консоли опоры не мягкими медными струнками, а стержнями зажима (см. рис. 5.13) с ограничителем горизонтального отклонения, установленного между стержнем зажима и консолью опоры.

Схема несложного, по сравнению с демпфером на рис. 5.15, пружинного ограничителя отклонения маятниковой конструкции схематично показана на рис. 5.20.

Конструкция подобного устройства [104], применяемого, например, в пружинных ограничителях подъема дополнительного относительно основного стержня фиксатора в фиксаторном узле подвески контактного провода с токосъемом «понизу», представлена на рис. 5.21.

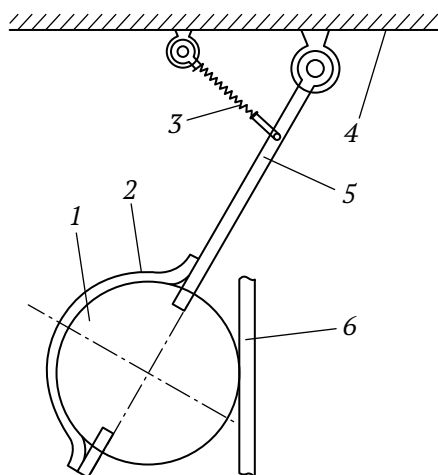


Рис. 5.20. Схема маятникового подвешивания контактного провода к консоли опоры жесткой стрункой с ограничителем отклонения:

1 — контактный провод; 2 — скоба зажима; 3 — пружина; 4 — консоль опоры; 5 — стержень зажима; 6 — полз

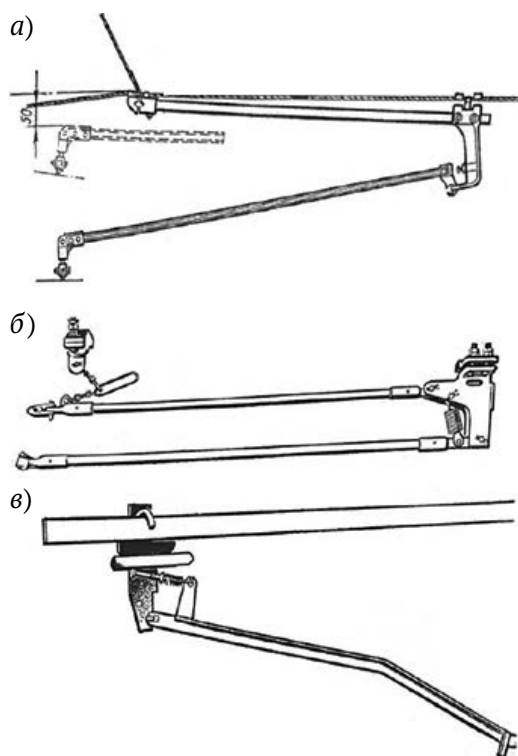


Рис. 5.21. Пружинный ограничитель подъема фиксатора:  
а — ФРГ; б — Япония; в — Северо-Кавказская дорога (СССР)

### 5.5.8. Цепная несвязанная контактная подвеска двух фаз *a* и *b* контактных проводов с «боковым» токосъемом

Подвеска каждого из двух контактных проводов включает несущий трос с подвешенным к нему с помощью регулируемых гибких или жестких струнок (стержней) контактного провода с «боковым» токосъемом со стороны оси крыши электровоза.

На рис. 5.22 показан вариант взаимного расположения (соединения) несущего троса и контактного провода цепной подвески без указания вида схемы — компенсированная или полукompенсированная.

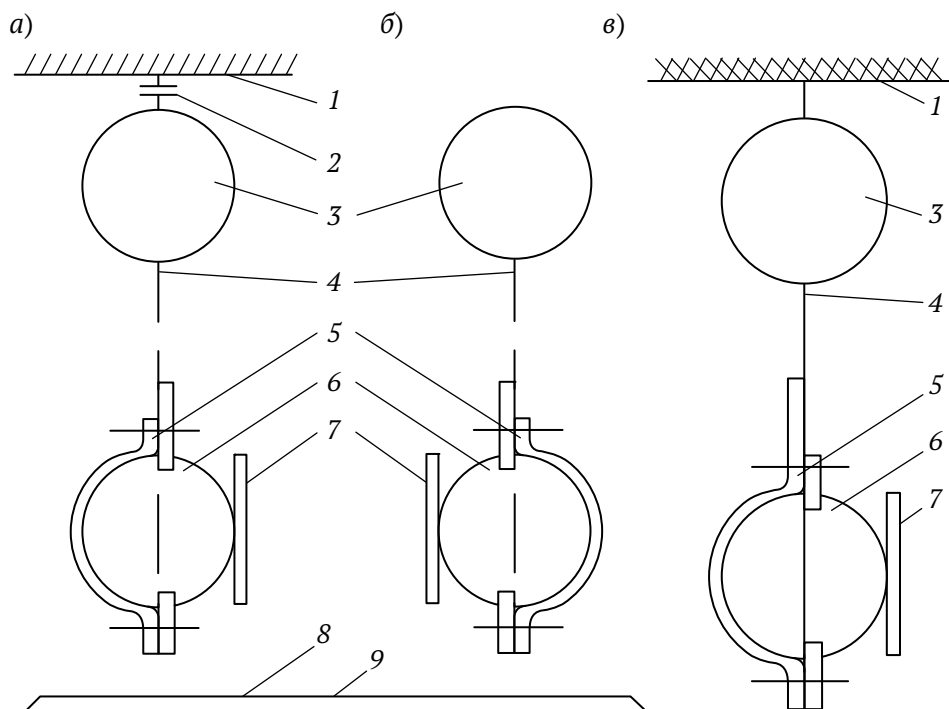


Рис. 5.22. Точка подвеса к несущему тросу контактного провода с «боковым» токосъемом: *a* — опоры; *б* — в пролете между опорами; 1 — поддерживающая конструкция (1, *a* — металлическая; 1, *в* — композитная); 2 — изолятор; 3 — несущий трос; 4 — токопроводящая регулируемая струнка (стержень); 5 — зажим контактного провода; 6 — контактный провод; 7 — полоз токоприемника; 8 — условное поперечное положение крыши электровоза; 9 — условное обозначение места прохождения продольной оси крыши электровоза

При таком варианте соединения несущего троса и контактного провода с боковым токосъемом при выполнении требований: вертикального зигзага; отклонения контактного провода 300 мм на прямом участке

пути и на кривых с радиусом  $R > 2000$  м и 400 мм с радиусом  $R \leq 2000$  м при максимальных значениях, соответственно 400 мм и 500 мм [101]; качественного токосъема и эластичности провода — допустимо применение схем полукompенсированной или компенсированной цепной подвески.

Несущий трос у опор обеспечивает вертикальный зигзаг контактного провода в одном или нескольких пролетах, а в пролетах между опорами удерживает контактный провод в пределах указанных отклонений.

Контактный провод может быть в полукompенсированной подвеске с натяжением, допускающим организацию вертикального зигзага в одном пролете или в компенсированной подвеске с максимальным натяжением при организации вертикального зигзага в нескольких пролетах.

Если при механическом расчете контактной подвески отклонение контактного провода превышает установленную норму [101], тогда могут быть рассмотрены два варианта цепной подвески с механическими ограничителями. По первому варианту — подвеска контактного провода к несущему тросу у опор с помощью жесткого стержня с пружинным ограничителем в соответствии со схемами на рис. 5.13 и 5.20. По второму варианту в пролете между несущими опорами может быть применена фиксирующая стойка. На рис. 5.23 показана схема фиксирующей стойки с фиксаторным узлом, обеспечивающим: фиксацию контактного провода фаз «а» и «b» с недопущением перемещения контактного провода поперек оси пути при воздействии ветровой нагрузки; допущение горизонтального перемещения контактного провода с зажимом вдоль оси пути при изменении температуры или натяжения контактного провода, а также поворот дополнительного стержня и контактного провода с зажимом в вертикальном направлении при изменении стрелы провеса контактного провода.

#### **5.5.9. Цепная связанная контактная подвеска бокового токосъема с жестким соединением контактных проводов фаз а и b между собой изоляционными жесткими стержнями с одним несущим тросом**

Цепная связанная трехфазная подвеска с общим несущим тросом для двух контактных проводов отличается от цепной несвязанной трехфазной подвески двух контактных проводов наличием между контактными проводами изоляционных жестких стержней.

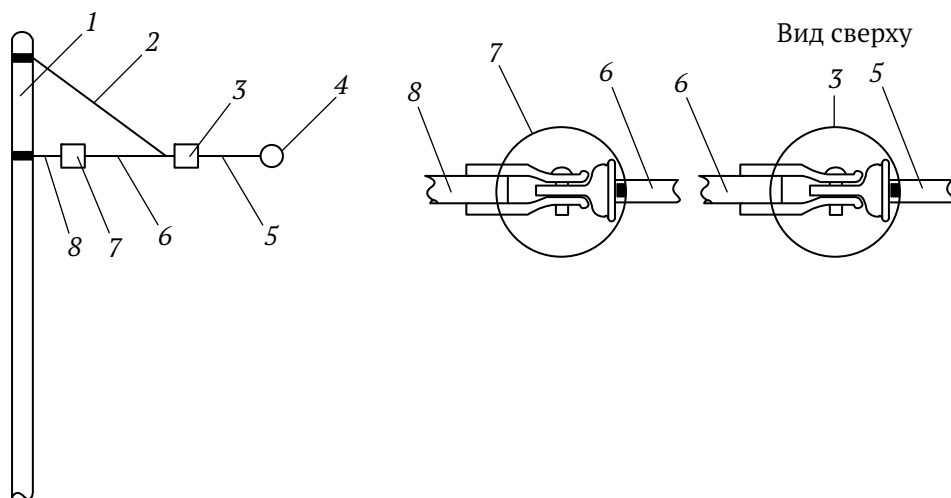


Рис. 5.23. Схема фиксирующей стойки с фиксаторным узлом:  
 1 — стойка; 2 — тяга; 3 — блок вертикального перемещения; 4 — контактный провод;  
 5 — дополнительный стержень; 6 — главный стержень фиксатора;  
 7 — блок горизонтального перемещения; 8 — стержень крепления

При связанной цепной подвеске из-за жестких изоляционных стержней между контактными проводами фаз *a* и *b* токоприемники устанавливаются на крыше с боковых сторон электровоза. Зона токосъема и, соответственно, износ контактного провода происходят с боковой (полевой) стороны электровоза.

При несвязанной подвеске токоприемник каждой фазы *a* и *b* устанавливается между контактным проводом и осью крыши электровоза, а зоны токосъема и износ контактного провода происходят со стороны оси крыши электровоза.

На рис. 5.24 представлен план схемы расположения одного несущего троса и двух объединенных поперечными изоляционными механическими соединителями контактных проводов связанной цепной контактной подвески.

При симметричном расположении токоприемников на крыше секции электровоза и соответственно симметричное расположение полозов токоприемников обеспечивают соприкосновение и давление при боковом токосъеме с наружной стороны одновременно на контактные провода в одном их месторасположении (рис. 5.24, *a*).

При ветровом горизонтальном воздействии на цепную контактную подвеску противовоздействие создается двумя контактными проводами, подвешенными к несущему тросу изолирующими струнками.

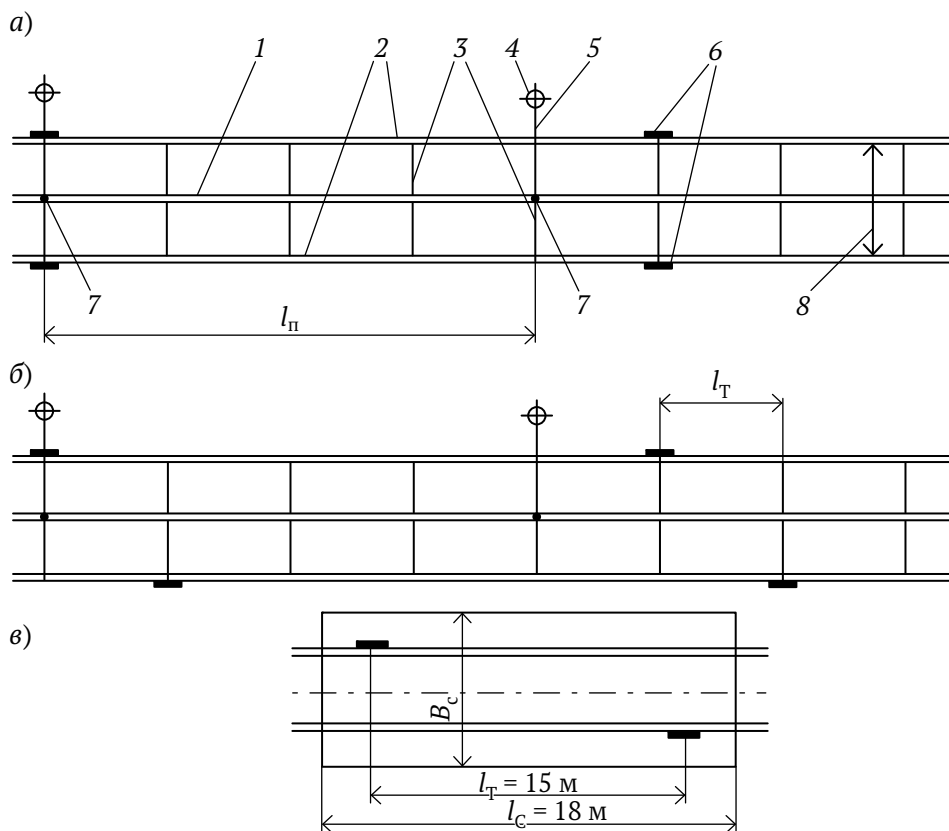


Рис. 5.24. План устройств контактной сети и расположения полозов токоприемников одной секции электровоза относительно проводов контактной подвески:

- а — симметрично; б — несимметрично; в — несимметрично на крыше секции электровоза;  
 1 — несущий трос; 2 — контактные провода; 3 — поперечный изоляционный механический соединитель контактных проводов; 4 — несущая опора; 5 — консоль контактной сети;  
 6 — полозы токоприемников; 7 — места подвешивания консоли к несущему тросу;  
 8 — расстояние между контактными проводами;  $l_n$  — длина пролета;  $l_T$  — расстояние между полозами токоприемников;  $l_C, B_C$  — длина и ширина кузова секции электровоза

Чтобы устранить «состояние жесткого крепления» контактных проводов, токоприемники на крыше секции электровоза монтируются на взаимном друг от друга расстоянии  $l_T$  (рис. 5.24, в), обеспечивая смещение по длине подвески и одновременное давление полозов токоприемников на контактные провода (рис. 5.24, б).

Противодействие ветровому воздействию создается, как отмечено, двумя контактными проводами, соединенными между собой механическими изоляционными стержнями через, например, 10–15 м (определяется расчетом обеспечения изоляционного промежутка между фазами).

Общий вид механических изоляционных стержней с контактными проводами нового вида (рис. 5.12, б) показаны на рис. 5.25.

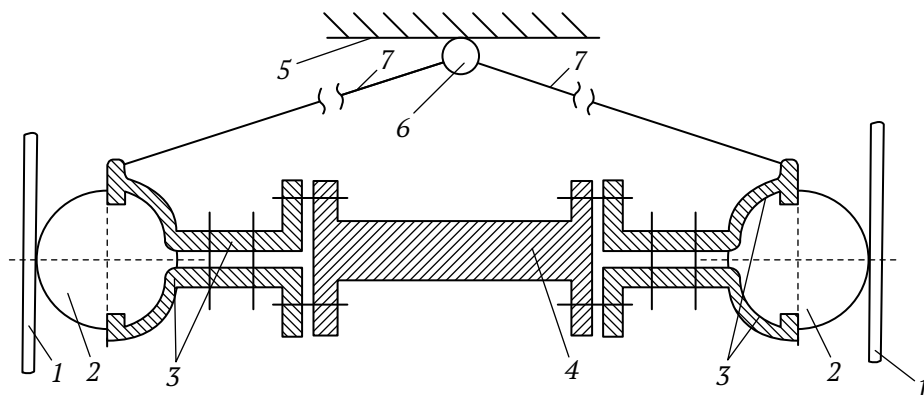


Рис. 5.25. Устройство поперечного изоляционного механического соединителя контактных проводов с подвеской к несущему тросу через гибкие изоляционные струнки (условное изображение):  
1 — полоз токоприемника; 2 — контактный провод; 3 — скобы зажима; 4 — изоляционный стержень; 5 — консоль (траверса); 6 — несущий трос; 7 — гибкая изоляционная струнка

Расчет массы поперечного соединителя определяется в основном массой изоляционного стержня, выполненного из композитного материала — стекло-волокна.

Длина стержня зависит от наименьшего расстояния между фазами воздушной линии ВЛ, принимаемого из табл. 5.4 (2.203 [105]) при напряжении ВЛ 35 кВ и равного не менее 500 мм.

Таблица 5.4

#### Наименьшие расстояния между фазами ВЛ

Расчетные условия	Наименьшие расстояния между фазами, см, при напряжении ВЛ, кВ					
	До 10	20	35	110	150	220
По атмосферным перенапряжениям	20	45	50	135	175	250
По внутренним перенапряжениям	22	33	44	100	140	200
По рабочему напряжению	–	15	15	45	60	95

Масса стержня зависит не только от его длины, но и от его диаметра, определяемая механическим расчетом при подвешивании к его концам по одному контактному проводу. Вертикальная нагрузка на каждом конце



стержня определяется собственным весом контактного провода, равным массе одного погонного метра контактного провода (например, МФ-100, БрЗФ-100), умноженного на длину между соседними поперечными соединителями (например, для существующей контактной подвески с двумя контактными проводами 8 м).

Предварительный механический расчет показал, что при длине стержня 1–1,5 м и расстоянии между поперечными механическими соединителями до 10 м с подвеской к несущему тросу двумя струнами (рис. 5.23) диаметр стержня из стекловолокна может быть принят равным 25 мм при массе одного погонного метра 1,06 кг.

### **5.5.10. Расчет параметров простой контактной подвески с боковым токо съемом контактного провода**

Во второй главе представлены результаты экспериментальных испытаний [2] в 1903 г. движения электрического вагона с достигнутой скоростью 210,2 км/ч на участке Мариенфелде-Цоссен протяженностью 23,4 км с простой подвеской 3-х фаз *a*, *b*, *c* контактных проводов с боковым токо съемом (см. рис. 2.4, 2.5). В процессе экспериментальных испытаний поставленная задача получения скорости 200 км/ч была достигнута. В дальнейшем получила применение 3-фазная система электрической тяги с подвеской двух контактных проводов (фаз *a* и *b*) и тягового рельса — фаза *c*, при этом контактные провода использовались с «боковым» токо съемом.

При разработке 3-фазной системы электрической тяги с простой контактной подвеской двух контактных проводов с «боковым» токо съемом проведен расчет параметров этой подвески с учетом скорости движения поезда и скорости бокового ветра.

Разработка программы и проведение по этой программе расчета конструкций контактной сети простой подвески выполнены кандидатом технических наук Параниным А. В. [102, 103]. Расчет по разработанной программе параметров простой контактной подвески произведен при «боковом» токо съеме со скольжением полоза токоприемника по боковой поверхности контактного провода со стороны оси крыши электровоза.

При расчетах по применению в 3-фазной системе электрической тяги простой контактной подвески с «боковым» токо съемом рассмотрены существующие марки контактных проводов сечением 100 мм<sup>2</sup>: МФ-100 (натяжение 10 кН), Бр1Ф-100 (натяжение 11,5 кН), Бр2Ф-100 (натяжение

14 кН), Бр3Ф-100 (натяжение 16 кН). Приняты погонный вес каждого провода 8,73 Н/м, длины пролетов от 30 до 50 м с шагом 5 м.

Расчет простой подвески произведен при креплении контактного провода к консоли опоры через демпферное (поршневое) устройство, позволяющее контактному проводу отжиматься ползком токоприемника от оси пути и ведущее к снижению жесткости крепления контактного провода с целью улучшения качества токосъема (см. рис. 5.15 и 5.16).

С креплением контактного провода к опоре связано обеспечение вертикального зигзага провода, рассмотренного в разделе 5.5.6.

Исходя из существующих габаритов подвижного состава, выбраны размеры рабочей области ползца токоприемника, его расположения в плоскости поперек оси пути, крайние высоты точек подвеса контактного провода над уровнем головки рельса (раздел 5.5.6), приняты ход поршня точки подвеса 250 мм и жесткость пружины поршня, равная 1 Н/мм.

Также рассчитано количество пролетов, необходимое для реализации вертикального зигзага контактного провода. При этом точки подвеса должны смещаться по высоте от крайней верхней до крайней нижней позиции (см. рис. 5.17). Необходимо определить количество пролетов для такого перехода в вертикальном зигзаге. Ограничением является неравномерность вертикальных реакций в точках подвеса. Число пролетов  $n_{вз}$  в вертикальном зигзаге и соответственно разность высот  $h$  двух соседних точек подвеса будет зависеть от длины пролета  $l$  и натяжения провода  $K$ .

Кривая провисания провода  $y(x)$  [103] при точках подвеса на разных высотах описывается выражением:

$$y(x) = \frac{q \cdot x}{2 \cdot K} \left( x - \frac{2 \cdot H \cdot h}{q \cdot l} - l \right), \quad (5.6)$$

где  $q$  — нагрузка на провод, принятая равной погонному весу, Н/м.

Условие отсутствия задира провода вверх:

$$\frac{l}{2} - \frac{H \cdot h}{q \cdot l} > 0. \quad (5.7)$$

Для более равномерной загрузки точек подвеса правая часть в данном выражении принята не ноль, а  $0.25 \cdot l$ . При выбранных марках контактного провода и длинах пролетов их число  $n_{вз}$  в вертикальном зигзаге и вертикальные реакции в точках подвеса приведены в табл. 5.5.

Число пролетов для вертикального зигзага  
и вертикальные реакции в точках подвеса

$l, \text{ м}$	Число пролетов вертикального зигзага для марки КП				Величина вертикальной реакции в точке подвеса, Н		
	МФ-100	Бр1Ф-100	Бр2Ф-100	Бр3Ф-100	крайняя верхняя	крайняя нижняя	промежуточная
30	3	3	4	5	392.9	131.0	261.9
35	2	3	3	3	458.3	152.8	305.6
40	2	2	3	3	523.8	174.6	349.2
45	2	2	2	2	589.3	196.4	392.9
50	1	2	2	2	654.8	218.3	436.5

Разность высот  $h$  двух соседних точек подвеса при реализации вертикального зигзага КП в данном случае  $0.5/n_{\text{вз}}$  м. Как видно из табл. 5.5, вертикальный зигзаг за один пролет может быть реализован только для провода МФ-100 и длины пролета 50 м. Для контактных проводов Бр1Ф-100, Бр2Ф-100, Бр3Ф-100 и длин пролетов от 30 м до 50 м требуется два и более пролета.

Пример реализации вертикального зигзага КП при длине пролета 40 м и всех рассматриваемых марках проводов приведен на рис. 5.26.

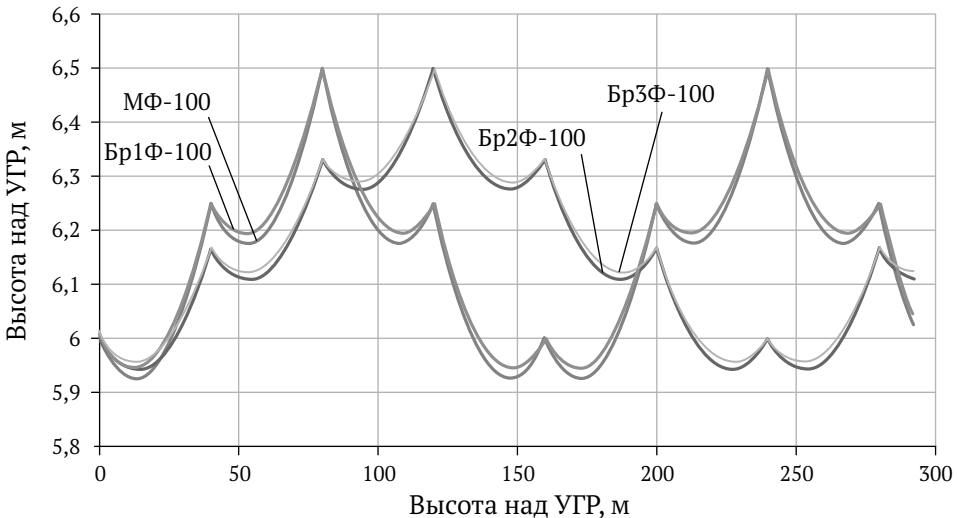


Рис. 5.26. График реализации вертикального зигзага КП при длине пролета 40 м

Как видно из рис. 5.26, контактный провод полностью находится в пределах рабочей области по высоте (верхняя граница 6.5 м, нижняя 5.8 м). В случае образования гололеда вертикальная нагрузка на провод возрастает, и стрела провеса увеличивается. Запас по расстоянию до нижней границы рабочей области достаточен во многих случаях и составляет около 0,13 м (5,93–5,8 м). Если гололедная нагрузка будет настолько велика, что провод выйдет за нижнюю границу рабочей области, то длину пролета необходимо будет сократить.

На основании разработанных численных математических моделей в статике рассчитана допустимая длина пролета по условию нахождения контактного провода в пределах расчетной области при воздействии ветра и нажатия токоприемника.

Допустимая длина пролета по условиям нахождения КП и полоза в пределах рабочей области оказывается при рассматриваемых условиях воздействия ветра и нажатия полоза токоприемника больше, чем аналогичная величина, ограниченная по качеству токосъема. То есть именно качество токосъема является основным фактором, ограничивающим длину пролета.

Учитывая, что расчетная скорость ветра менее 5,56 м/с встречается при проектировании крайне редко, из полученных результатов можно сделать вывод, что контактный провод марки МФ-100 обеспечивает движение со скоростями не более 75 км/ч и при малых ветровых нагрузках.

Провод Бр1Ф-100 можно использовать для этой скорости движения 75 км/ч при больших скоростях ветра. Возможно его применение при скорости ЭПС 100 км/ч, но при малых ветрах и пролетах — не более 35 м.

Провод марки Бр2Ф-100 позволяет осуществлять движение поездов с данной скоростью уже при пролетах до 45 метров.

Провод с наибольшим натяжением марки Бр3Ф-100 можно использовать на скорости 100 км/ч при всех рассматриваемых длинах пролетов от 30 до 50 м. Эта марка КП позволяет обеспечить эксплуатацию при скорости движения 125 км/ч, но при малых ветрах и пролетах — не более 35 метров.

При исследовании было подтверждено, что качество токосъема существенно ухудшается: при увеличении жесткости поршня в точке подвеса, при увеличении скорости движения и длины пролета. Для рассматриваемой подвески на качество токосъема значительное влияние оказывает скорость ветра поперек оси пути со стороны полоза токоприемника. Если ветер с противоположной стороны полоза токоприемника (со стороны контактного провода), то такое влияние снижается.

Определены предельные по качеству токосъема скорости ветра поперек оси пути (табл. 5.6) при различных скоростях движения и длинах пролета при условии, что жесткость и ход поршня в точках подвеса определены.

В расчетах взаимодействия токоприемника и контактной подвески для каждого сочетания марки КП, длин пролетов, скоростей движения (75, 100, 125 и 150 км/ч) необходимо подбирать значения скорости ветра поперек оси пути, при которой качество токосъема станет неудовлетворительным. Результат определения величин поперечной скорости ветра, предельной для качества токосъема, приведен в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Результат определения величины поперечной скорости ветра  $V_{\text{в}}$  км/ч предельной для качества токосъема

Марка КП	Скорость ЭПС, км/ч	Длина пролета, м				
		30	35	40	45	50
МФ-100 ( $K = 10$ кН)	75	19.3	17.0	17.1	16.2	16.2
	100	15.7	15.0	14.3	12.7	12.3
	125	недоп.	недоп.	недоп.	недоп.	недоп.
	150	недоп.	недоп.	недоп.	недоп.	недоп.
Бр1Ф-100 ( $K = 11.5$ кН) ( $K = 14$ кН)	75	24.6	21.1	20.7	19.2	16.2
	100	16.6	16.2	14.9	14.8	13.7
	125	9.6	11.1	10.4	8.8	7.9
	150	недоп.	недоп.	недоп.	недоп.	недоп.
Бр1Ф-100 ( $K = 11.5$ кН) ( $K = 14$ кН)	100	21.6	18.4	16.7	15.9	15.0
	125	16.1	15.0	14.5	11.8	12.1
	150	12.0	10.5	9.1	8.0	7.4
Бр3Ф-100 ( $K = 16$ кН)	75	28.5	25.4	25.5	22.3	21.5
	100	23.7	21.1	18.7	18.6	17.1
	125	18.6	16.8	14.5	15.3	14.4
	150	15.0	12.6	9.3	10.8	11.2

Из табл. 5.6 видно, что для КП марки МФ-100 движение со скоростью 100 км/ч и более и для Бр1Ф-100–125 км/ч и более является недопустимым по качеству токосъема при всех рассматриваемых условиях. Увеличение скорости движения ЭПС может быть проведено при уменьшении предельной поперечной скорости ветра. При увеличении длины пролета также

наблюдается общее направление на уменьшение предельной поперечной скорости ветра. Очевидно, что с увеличением натяжения КП допустимая по качеству токосяема поперечная скорость ветра может быть увеличена.

Из анализа результатов следует, что в рассматриваемой простой контактной подвеске можно использовать марки Бр2Ф-100 и Бр3Ф-100 для скоростей движения в пределах до 100 и 125 км/ч, соответственно в пролетах от 30 до 50 метров в зависимости от расчетной скорости ветра.

Но учитывая большие стоимости бронзовых контактных проводов, можно рассматривать при простой подвеске применение контактного провода марки МФ-100 при скорости движения 75 км/ч (см. табл. 5.6) с длинами пролета от 30 м до 50 м с соответствующими скоростями поперечного ветра от 5,36 м/с до 4,5 м/с. Движение со скоростью 100 км/ч возможно при небольших скоростях ветра от 4,36 м/с до 3,42 м/с.

Кроме того, для грузового движения стремление к скоростному и тем более к высокоскоростному движению при существующем техническом состоянии устройств электрической тяги является не только малоосуществимым в условиях специфики грузового движения, но затратным и малоэффективным решением при массовых грузовых перевозках.

Скорость часового режима современных электровозов грузового движения постоянного тока ВЛ11 (3-х секц.), 2ЭС5к Ермак, 2ЭС10 составляет 48,7–49,2 км/ч; длительного режима — 51,2–51,0 км/ч. То же для электровозов переменного тока скорость часового / длительного режимов ВЛ80<sup>к, т, с</sup> — 51,9/53,6; ВЛ80<sup>р</sup> — 52,5/54,4; 2ЭС7 и перспективного 2ЭС5–50,0 км/ч.

При этом максимальная конструкционная скорость электровозов 2ЭС10 и 2ЭС5 составляет 120 км/ч.

Таким образом, с учетом указанных скоростных характеристик грузовых электровозов, ближайшей задачей проводимых механических расчетов подвесок контактной сети является проверка подвесок по реализации величин скоростей грузового движения и возможности их увеличения для пассажирского движения.

Следует отметить некорректность сравнения результатов проведенных расчетов простой подвески с конкретными значениями (марка контактного провода, устройства подвески провода к опоре, устройства вертикального зигзага, скорости боковой ветровой нагрузки, качества надежного токосяема) с неизвестными аналогичными значениями при экспериментальных идеальных условиях испытаний 3-осного электрического вагона фирмы AEG в 1903 году при получении экспериментальной скорости 210,2 км/ч на ограниченной части участка пути протяженностью 23,4 км.

Однако расчет параметров простой контактной подвески проведен как наиболее простой при монтаже и эксплуатации, обеспечивающей высокие технико-экономические показатели при 3-фазной системе и считается соответствующей контактной подвеске с боковым токо съемом.

#### **5.5.11. Ветроустойчивость контактных подвесок с «боковым» токо съемом трехфазной системы и с токо съемом «понизу» однофазной системы электрической тяги**

В разделе 1.2.1 приведены краткие сведения о контактных простой и цепных подвесках электротяговой сети с токоприемом по нижней поверхности контактного провода (токо съем «понизу»), составляющих однофазную систему тягового электроснабжения.

Кроме характеристик, приведенных в 1.2.1, цепные контактные подвески по расположению проводов в плане пути разделяются по ветроустойчивости на вертикальные, полукосые и косые.

Вертикальные подвески имеют меньшую ветроустойчивость, но проще в монтаже и регулировке. Косые подвески, наоборот, обладают бóльшей ветроустойчивостью, но сложны в монтаже и регулировке. На электрифицированных железных дорогах России наиболее распространены вертикальная и полукосая подвески, при этом последняя используется только на прямых участках пути.

Для однофазной системы электрической тяги (ОСЭТ) существующие рессорные компенсированные контактные подвески типа КС-160 с медными проводами позволяют обеспечить удовлетворительное качество токо съема для скоростей движения до 160 км/ч. Для получения бóльшей скорости движения используются бронзовые провода с повышенным натяжением (подвески типа КС-200 и КС-250).

Ветроустойчивость для существующих контактных подвесок означает способность сопротивляться выдуванию КП поперек оси пути за полоз токоприемника. Если это произойдет, то он попадет за полоз токоприемника. Это неминуемо приведет к повреждению токоприемника, а возможно, и контактного провода, вплоть до остановки движения. Поэтому при большой величине скорости ветра приходится сокращать длину пролета. Расчеты [100] показывают, что для компенсированной контактной подвески М-120+МФ-100 допустима длина пролета 65 м при скоростях ветра до 30 м/с. На кривых участках пути длина пролета уменьшается

с уменьшением радиуса кривизны пути. Чем меньше радиус кривой, тем меньше влияние скорости ветра на этот параметр.

Также следует отметить, что влияние ветра на качество токосъема для существующих подвесок ОСЭТ с токосъемом «понизу» незначительно и не связано с понятием их ветроустойчивости.

Простая подвеска контактного провода с «боковым» токосъемом вызывает свободное отклонение контактного провода от его нейтрального положения под воздействием ветровой нагрузки, скорости движения поезда и длины пролета между точками подвеса.

Длина пролета при простой подвеске контактного провода с «боковым» токосъемом вызывает его наибольшее отклонение от нейтрального положения при максимальном воздействии ветровой нагрузки перпендикулярно контактной подвеске.

Известно, что на качество токосъема влияют: тип подвески (простая, цепная), состав подвески и натяжение контактного провода, длина пролета, направление и величина ветровой нагрузки, скорость движения поезда, а также воздействие полоза токоприемника на контактный провод при «боковом» токосъеме.

Причиной наибольшего снижения качества токосъема, а тем более возникновения аварийных ситуаций при работе контактной сети в системе электрической тяги является превышение отклонения контактного провода за допустимые нормы [101], возникающие при большой величине поперечного ветра.

Снижение отклонения достигается уменьшением длины пролета, либо для всех рассматриваемых вариантов конструкции подвески с «боковым» токосъемом (простой подвески с поршневыми точками подвеса, цепной связанной подвески с изолированными между КП распорками и цепной несвязанной подвески) по результатам расчета простой подвески и предварительных расчетов цепных подвесок приходится принимать при проектировании включение бронзовых проводов с повышенным натяжением.

К примеру, для простой подвески с поршневыми точками подвеса [102] целесообразно использовать марки КП Бр2Ф-100 и Бр3Ф-100 для скоростей движения в пределах до 100 км/ч в пролетах от 30 до 50 метрах и при скорости ветра не более 25 км/ч. При скорости ветра более 25 км/ч качество токосъема для данной подвески становится неудовлетворительным даже при пролетах длиной 30 м и скорости движения 75 км/ч. В пролетах длиной 60 м качество токосъема становится неудовлетворительным даже при ветре 15 м/с.



Для цепной связанной подвески с изолированными распорками [103] показатели качества токосяема в зависимости от длины пролета и скорости ветра также неудовлетворительны. Для пролетов 60 метров с КП МФ-100, указанными распорками и скорости ветра поперек пути 20 м/с допустимая скорость движения ЭПС по качеству токосяема составляет примерно от 80 до 85 км/ч. При скорости движения ЭПС 100 км/ч качество токосяема становится неудовлетворительным даже при скорости ветра 10 м/с. Уменьшение длины пролета до 40 м не улучшает ситуацию. Поэтому скорость ЭПС 80–85 км/ч для МФ-100 скорее всего является предельной. При этом применение бронзовых проводов с повышенным натяжением не дает здесь никаких результатов.

Для цепной несвязанной контактной подвески также имеется значительное влияние скорости ветра на качество токосяема. Так, скорость ветра 25 м/с является ограничивающим фактором даже при пролетах 30 м, максимальном натяжении КП 16 кН и скорости ЭПС 80 км/ч. Если принять, что скорость ветра при токосяеме равна 75 % от расчетной скорости ветра и составляет менее 20 км/ч и она встречается крайне редко, то для типовых климатических условий (расчетная скорость ветра 27 м/с) КП должен иметь натяжение не менее 14 кН (марки Бр2Ф-100 и Бр3Ф-100) и длины пролетов возможны не более 40 м. Для районов с расчетной скоростью ветра более 30 м/с данная подвеска не применима.

Таким образом, для рассмотренных вариантов конструкции контактной подвески с «боковым» токосяемом для трехфазной системы тягового электроснабжения (ТСТЭ) происходит существенное влияние на токосяем бокового ветра. Это приводит к уменьшению длины пролета, ограничению допустимых скоростей движения, необходимости применения бронзовых проводов с повышенным натяжением. Для районов с повышенными скоростями ветра более 25 км/ч данные подвески практически не применимы. В этом плане подвески с «боковым» токосяемом существенно уступают подвескам с токосяемом «понизу».

Это принципиальное отличие от разрабатываемых (простой и цепных) подвесок с «боковым» токосяемом для ТСТЭ, в которых скорость поперечного ветра существенно влияет на качество токосяема.

## **5.6. УСТРОЙСТВО ТОКОСЪЕМА «ПОНИЗУ» КОНТАКТНОГО ПРОВОДА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

### **5.6.1. Общие положения**

В основе разработки трехфазной системы электрической тяги могут быть применены схемы и устройства взаимодействия контактных проводов и токоприемников электровоза, обеспечивающие «боковой» токосъем или токосъем «понизу».

Токосъем «понизу» применяется при однофазной системе электрической тяги (см. разд. 1.2). Начальная реализация однофазного питания произведена фирмой Ерликон в 1901 году (см. разд. 2.4) и завершена на линии Seebach-Wettingen Швейцарских железных дорог в 1904 году при однофазном напряжении в контактной сети 15 кВ 50 Гц.

Токосъем «понизу» в трехфазной системе электрической тяги с двумя воздушными линиями (контактными проводами) и тяговым рельсом в качестве третьей фазы осуществлялся в коммерческом плане с 1896 г. на трамвайной сети в Лугано (Швейцария) с трехфазным напряжением 480 В 40 Гц. На первой протяженной железнодорожной линии длиной 41 км Бургдорф-Тун в 1899 г. также использовалось низкое напряжение 750 В 40 Гц. В 1902 году была электрифицирована линия Вальтеллин с ответвлениями общей длиной 106 км (Италия), с высоким трехфазным напряжением 3000 В 15,6 Гц.

При повышении напряжения в трехфазной системе электрической тяги с токосъемом «понизу», например до 10 кВ, 25 кВ, 35 кВ и выше, возникает требование соблюдения изоляционных расстояний между фазами по условиям атмосферных перенапряжений соответственно до значений 20 см, 45 см и 50 см (табл. 2.203 [105] и табл. 5.4 разд. 5.5.9).

Существенное влияние на работу устройств токосъема кроме напряжения контактной сети оказывает величина тока. В существующей однофазной системе ток одного токоприемника электровоза 2ЭС7 равен 750 А при номинальном напряжении 25 кВ.

В трехфазной системе электрической тяги фазный ток токоприемника с одного контактного провода составит примерно одну треть однофазного номинального тока, т.е. при трехфазной системе электрической тяги мощность энергии токосъема по сравнению с однофазной системой

снижается в 3 раза. Однако при трехфазной системе с токо съемом «понизу» возникает задача размещения двух токоприемников фаз «а» и «b» на крыше секции электровоза с соблюдением изоляционных расстояний между фазами и горизонтального зигзага контактных проводов.

Известно, что кроме мощности на габарит токоприемника с токоприемом «понизу» влияет горизонтальный зигзаг контактного провода, отклонение которого от нейтрального положения составляет  $\pm 400$  мм (максимальный на прямой и на кривой с радиусом  $R \geq 2000$  мм) и  $\pm 500$  мм (максимальны на кривой с радиусом  $R \leq 2000$  мм).

### **5.6.2. Влияние тока на электроэрозию, на износ контактного провода и токовые вставки полоза токоприемника электроподвижного состава**

На рельсовом транспорте используются следующие виды токоприемников: пантограф, полупантограф (рис. 5.27), дуговой (бугельный) токоприемник, штанговый и рельсовый токоприемники.



Рис. 5.27. Общий вид полупантографного токоприемника

Независимо от конструкции, все токоприемники, осуществляющие токо съем с воздушной контактной сети, имеют четыре основные части: основание, укрепленное на опорных изоляторах; подвижную систему; контактную систему и механизм подъема и опускания. Основания всех токоприемников жестко закреплены на крыше через изоляторы и чаще всего их сваривают из тонкостенных стальных швеллеров или прямоугольных труб, на которых укрепляют подъемно-опускные механизмы [106].

Токоприемники служат для создания электрического соединения между контактным проводом или контактным рельсом и электрическими цепями электроподвижного состава (ЭПС).

В разделе использованы и указаны курсивом материалы книг [107, 108].

*На долю токоприемников приходится 16 % всех отказов электрических аппаратов. В свою очередь на долю токоъемных вставок приходится 31 % всех порч токоприемника, что позволяет характеризовать токоъемную вставку, как один из наиболее уязвимых элементов, надежность которого является определяющим фактором надежности локомотива в целом.*

*Отказы токоъемных вставок происходят в основном из-за их износа.*

*В сильноточном скользящем контакте, образованном контактным проводом и токоъемными вставками полозов токоприемников, токоъем сопровождается появлением электрических дуг и маломощных искровых разрядов, вызывающих повреждение (эрозию), т.е. протекание электрического тока через скользящие контакты сопровождается эрозионными процессами их поверхности из-за препятствий, возникающих при токоъеме. В случае постоянного тока в контактах наблюдается перенос материала с одного из них на другой.*

*Эрозия контактов объясняется вырыванием частиц под действием струй металла с противоположного электрода, бомбардировкой ионами и электронами, тепловыми процессами.*

*При этом необходимо учитывать, что тепловая энергия, выделяющаяся от электрической дуги, сосредоточена в ее опорных точках на контактах. Под действием выделяющейся тепловой энергии металл контактов расплавляется, закипает, испаряется и разбрызгивается, что приводит к их износу. При этом электроэрозия контактов возрастает при повышении длительности электрического разряда и увеличении тока.*

*По данным немецких специалистов, даже в обычных эксплуатационных условиях практически 80 % общего износа обусловлены электроэрозией и только 20 % вызваны механическими воздействиями. Таким образом, при использовании углеродных материалов решающим является электрический износ. Это подтверждается практикой их применения.*

*На железных дорогах Японии было установлено, что на тех участках, где на электроподвижном составе применялись угольные вставки, годовой износ контактного провода достигал 0,21, 0,25 и 0,171 мм, а при отсутствии токоъема соответственно 0,145, 0,131 и 0,051 мм. Средний годовой износ контактного провода с угольными токоъемными*

составил  $\frac{1}{3} \cdot (0,21 + 0,25 + 0,171) = 0,21$  мм, а при отсутствии токосъема —

$\frac{1}{3} \cdot (0,145 + 0,131 + 0,051) = 0,109$  мм, т.е. износ материала контактного

провода или токосъемной вставки под воздействием токовой нагрузки возрастает и для рассмотренного примера возрос в 1,93 раза. Также в Японии натурными испытаниями контактного провода и токосъемных элементов полозов токоприемников установлено, что износ скользящего контакта зависит от длительности воздействия дуги и тока разряда.

Аналогичные результаты были получены на Российских железных дорогах. На участках постоянного тока в случае прохождения только электропоездов, т.е. при малых снимаемых токах, износ контактного провода достигает  $0,069 \text{ мм}^2$  на  $10^4$  проходов ЭПС. Если доля электровозной тяги возрастает на 35, 50 и 67 %, т.е. снимаются большие токи, износ увеличивает соответственно до  $0,104$ ,  $0,158$ ,  $0,204 \text{ мм}^2$  на  $10^4$  проходов ЭПС.

На рис. 5.28 представлен график износа КП при увеличении тока токосъема от значений (1–1,2) о.е. на 35, 50 и 67 %. Происходит увеличение износа КП от минимального значения  $0,069 \text{ мм}^2$  на  $10^4$  проходов ЭПС, принятого за условную относительную единицу до  $0,104$ ;  $0,158$  и  $0,204 \text{ мм}^2$  на  $10^4$  проходов ЭПС, т.е. происходит увеличение износа КП соответственно

но в  $\frac{0,104}{0,069} = 1,51$ ;  $\frac{0,158}{0,069} = 2,29$  и  $\frac{0,204}{0,069} = 2,957$  раз.

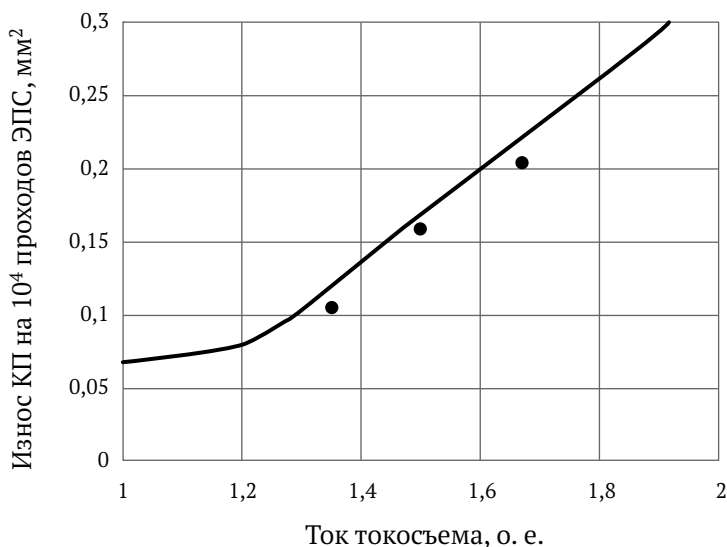


Рис. 5.28. График износа КП в зависимости от тока токосъема

Отношение износа КП измеренного в процессе эксплуатации  $S_{\text{экс}}$  к начальному износу  $S_{\text{нач}}$  называется коэффициентом износа

$$K_{\text{изн}} = S_{\text{экс}} / S_{\text{нач}},$$

где  $S$  — площадь износа, измеряемая в России в  $\text{мм}^2$  на  $10^4$  проходов ЭПС (в Японии износ контактного провода измеряется высотой провода в мм).

Ранее было указано, что эрозия соответственно и износ контактов возрастает при превышении электрического разряда и увеличении тока.

Электрический разряд — это тот же процесс протекания тока через сопротивление плазмы дуги.

При этом при повышении тока в результате *более высокого нагрева углеродных вставок и контактного провода электроэрозионные процессы усиливаются а следовательно, повышается интенсивность электрической составляющей износа контактного провода.*

Исследования, посвященные электроэрозии контактов, показали, что большинство из них связывают электроэрозии контактов с тепловой природой этого явления.

За время  $t$  протекание тока  $i$  через сопротивление контакта  $r$  между контактным проводом и токосъемной вставкой выделяется тепловая энергия, которая в соответствии с законом Джоуля-Ленца  $Q = i^2 r t$  зависит в основном от квадратичного значения тока нагрузки и может быть представлена графиком показательной функции  $y = a^x$ , где  $a$  — положительное основание,  $x$  — целое число (при  $x = 2$  функция показательная, квадратичная).

Рассмотрим возможность оценки коэффициента износа контактного провода по изменению основной величины в законе Джоуля-Ленца — квадратичной функции  $i^2$ .

На рис. 5.29 представлены экспериментальный график коэффициента износа контактного провода, определенный по ранее полученному в России износу контактного провода (см. рис. 2.28) и расчетный график квадратичной функции  $i^2$  тока токосъема при его увеличении от малых снимаемых величин (в диапазоне 1–1,2) о.е. на 35, 50, 67 %. Величины этих коэффициентов приведены в табл. 5.7.

Величины экспериментальных и расчетных значений коэффициента износа контактного провода практически совпадают и позволяют оценить в о.е. степень износа контактного провода и соответственно токосъемных вставок при изменении токов токосъема токоприемником с контактного провода.

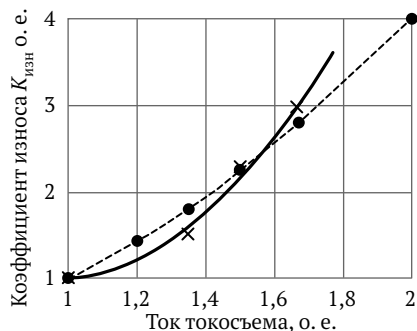


Рис. 5.29. График коэффициента износа в зависимости от токосъема:

× — экспериментальный; ● — расчетный

Таблица 5.7

Экспериментальные и расчетные величины коэффициента износа контактного провода в зависимости от тока токосъема

Коэффициент износа $K_{изн}$ , о.е.						
Ток токосъема, о.е.	1-1,1	1,2	1,35	1,5	1,67	2
Экспериментальный $K_{изн,э}$	1	—	1,51	2,29	2,957	—
Расчетный $i^2 K_{изн,р}$	1	1,44	1,8	2,25	2,8	4

Так, например, уменьшение токов токосъема с 2 о.е. до 1,2 о.е. (в 1,67 раза) ведет к снижению коэффициента износа с 4 о.е. до 1,44 о.е. (в 2,78 раза), что позволяет при разработке электровоза с трехфазной электрической тягой уменьшить габариты токоприемника и применить соответствующие токосъемные вставки полоза токоприемника.

На базе антифрикционных материалов созданы токосъемные вставки полозов токоприемников для ЭПС различной мощности,двигающихся с низкими и высокими скоростями на участках контактной сети электрифицированных железных дорог постоянного и переменного токов при различных климатических условиях.

*На электрифицированных дорогах переменного тока нашли применение токосъемные элементы из углеродных материалов, на дорогах постоянного тока — порошковые токосъемные элементы на металлической основе с твердыми смазками в своем составе. Использование таких токосъемных элементов позволило в несколько раз снизить износ контактного провода.*

*В России получили применение порошковые токосъемные элементы на железной основе в виде монослойных и биметаллических контактных*

пластин. Использование их для токосъема позволило при замене медных контактных пластин из монолитного металла снизить износ контактного провода более чем в два раза, увеличить пробеги полозов токоприемников с 30–40 тыс. км до 80 и 100 тыс. км.

## **5.7. ТЯГОВАЯ ПОДСТАНЦИЯ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

За основу разработки принята однолинейная тяговая подстанция существующей однофазной системы тягового электроснабжения 25 кВ 50 Гц.

На рис. 5.30 представлены однофазные цепи открытого распределительного устройства ОРУ-220 кВ (возможно ОРУ-110 кВ) в однофазном исполнении и ОРУ-27,5 кВ (возможно ОРУ-22кВ) в трехфазном исполнении.

Фазы А и В вторичных обмоток силовых трансформаторов подключены к сборным шинам ОРУ-27,5 кВ (ОРУ-22кВ), фаза С подключена через разъединители и воздушную линию отсоса к тяговому рельсу.

Сборные шины ОРУ-27,5 кВ (ОРУ-22кВ) разъединителями разделены на две секции, к которым подключены через разъединители и высоковольтные выключатели фидеры, питающие контактную сеть перегонов. Аналогичные фидеры питают контактную сеть станции (на рис. 5.30 не показаны).

Для примера, от 2-й секции сборных шин получает питание по фидерам контактной сети Ф-5 и Ф-6 перегон однопутного участка, а по фидерам Ф-1, Ф-2, Ф-3 и Ф-4 — четное и нечетное направление перегона двухпутного участка.

На тяговых подстанциях существующей однофазной системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ 50 Гц установлены силовые трансформаторы ТДТНЭ-25000/110 или ТДТНЖ-40000/110, основные электрические характеристики которых представлены в табл. 5.8.

Расчет расхода электрической энергии на тягу, потерь электрической энергии в тяговой сети и в оборудовании тяговых подстанций, минимального напряжения на токоприемнике электровазов, средних и максимальных токов фидеров тяговых подстанций и других технико-энергетических показателей трехфазной системы электрической тяги может производиться с использованием после незначительной доработки комплексной программы электрических расчетов системы тягового электроснабжения *Fazonord*.



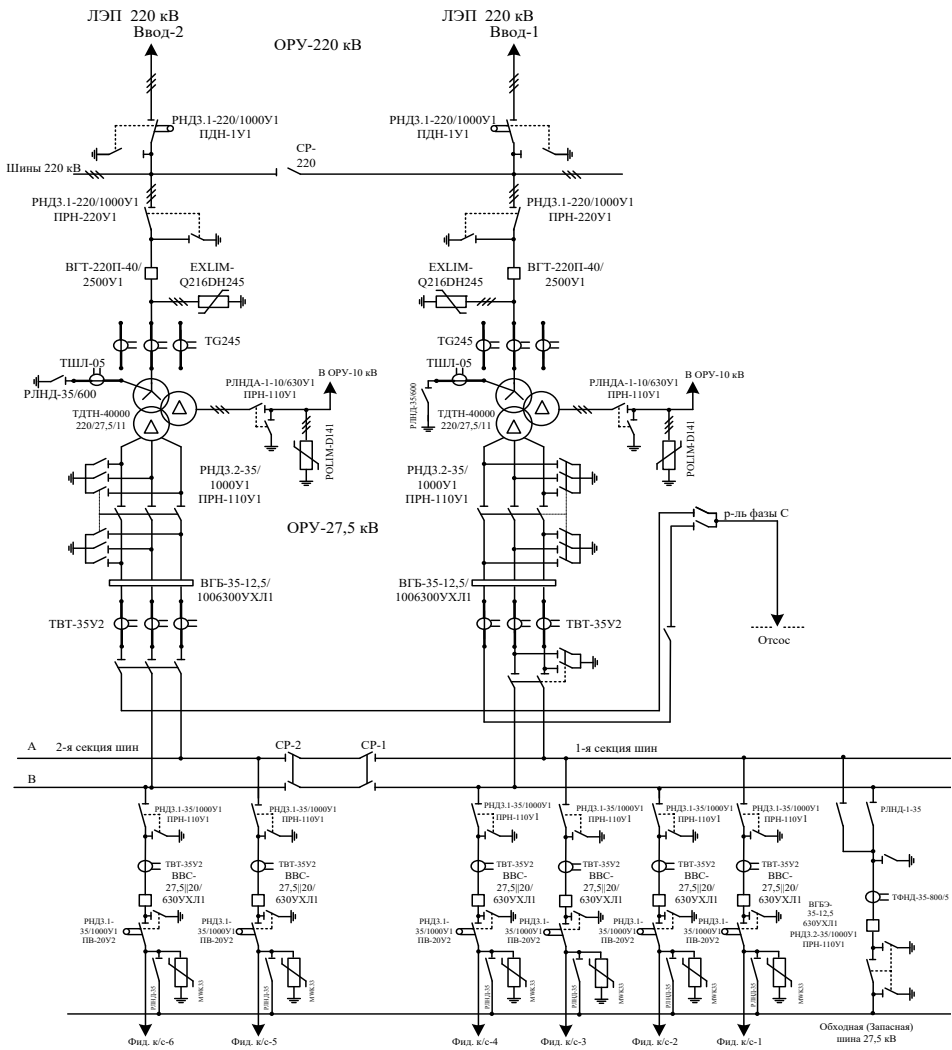


Рис. 5.30. Однолинейная схема силовых цепей тяговой подстанции питания контактной сети перегона участков: — однопутного от 1-й секции шин; — двухпутного от 2-й секции шин

Если расчет мощности и токов силового трансформатора в трехфазной системе тягового электроснабжения производится для существующих размеров движения, принятых при однофазной системе переменного тока 25 кВ 50 Гц с использованием  $2/3$  установленной мощности силовых трансформаторов, тогда для трехфазной системы СТЭ необходимая мощность нового силового трансформатора должна быть равной  $25000 \times 0,667 = 16667$  кВ·А или  $40000 \times 0,667 = 26680$  кВ·А.

Электрические характеристики силовых трансформаторов  
однофазной системы переменного тока 25 кВ 50 Гц

Наименование величин	Тип трансформатора	
	ТДТНЭ-25000/110	ТДТНЖ-40000/110
Номинальная мощность $S_T$ , МВ · А	25	40
Линейное напряжение обмоток $U_n$ , кВ		
ВН	115	115
СН	27,5	27,5
НН	6,6; 11,0	6,6; 11,0
Схема и группа соединения обмоток	Y*/Δ/Δ-11-11	Y*/Δ/Δ-11-11
Номинальный фазный ток, А		
– обмотки ВН со схемой Y — $I_\phi = \frac{S_T \cdot 10^3}{3 \cdot U_n \sqrt{3}} = \frac{S_T \cdot 10^3}{U_n \cdot \sqrt{3}}$	126	201
– обмотки СН со схемой Δ — $I_\phi = \frac{S_T \cdot 10^3}{3 \cdot U_n} (U_n = \sqrt{3} I_\phi)$	303 (525)	485 (840)
Потери, кВт		
$P_{xx}$	45	63
$P_{кз}$	145	200
Напряжение к.з. $U_{к.з.}$ , %		
между обмотками:		
ВН-СН	10,5	10,5
ВН-НН	17	17
СН-НН	6	6
Ток х.х. $I_o$ , %	1	0,9
Пределы РПН в нейтрали обмотки ВН, %	$\pm 9 \times 1,78$	$\pm 9 \times 1,78$
Масса полная, кг	67200	91200
*Выведена нейтраль обмотки ВН		

С учетом требуемой мощности силовых трансформаторов и технических данных выпускаемых промышленностью трехфазных масляных трехобмоточных трансформаторов для трехфазной системы СТЭ могут быть использованы и в табл. 5.9 представлены основные электрические характеристики силовых трансформаторов ТДТН-16000/110 или ТДТН-25000/110.

Необходимое линейное напряжение обмотки СН принимается из шкалы линейных напряжений обмотки СН.

При этом в трехфазной системе тягового электроснабжения длины межподстанционных зон принимаются из расчетов или равными, как

и в системе 25 кВ 50 Гц 45–55 км, и, естественно, количество тяговых подстанций предположительно будут соответствовать системе 25 кВ 50 Гц и, кроме того, в трехфазной системе тягового электроснабжения все же необходимо использовать силовые трансформаторы ТДТНЭ-25000/110 и ТДТНЖ-40000/110 существующей однофазной системы переменного тока 25 кВ 50 Гц, что, естественно, вызовет повышение провозной и пропускной способности участков.

Таблица 5.9

Электрические характеристики силовых трансформаторов  
для трехфазной системы переменного тока

Наименование величин	Тип трансформатора	
	ТДТН-16000/110	ТДТН-25000/110
Номинальная мощность $S_T$ , МВ · А	16	25
Линейное напряжение обмоток $U_n$ , кВ		
ВН	115	115
СН	11*; 22; 34,5; 38,5	11; 22; 34,5; 38,5
НН	6,6; 11	6,6; 11*
Схема и группа соединения обмоток	Y**/Δ/Δ-11-11	Y**/Δ/Δ-11-11
Номинальный фазный ток, А		
– обмотки ВН со схемой Y – $I_\phi = \frac{S_T \cdot 10^3}{3 \cdot U_n / \sqrt{3}} = \frac{S_T \cdot 10^3}{U_n \cdot \sqrt{3}}$ ;	80	126
– обмотки СН со схемой Δ – $I_\phi = \frac{S_T \cdot 10^3}{3 \cdot U_n}$ ( $U_n = \sqrt{3} I_\phi$ ) и		
для СН $U_n$ , кВ		
27,5	194 (336)	303 (525)
22	242 (420)	379 (656)
11	485 (840)	758 (1312)
Потери, кВт		
$P_{xx}$	21	28,5
$P_{кз}$	100	140
Напряжение к.з. $U_{к.з.}$ , %		
между обмотками:		
ВН-СН	10,5	10,5
ВН-НН	17,5	17,5
СН-НН	6,5	6,5
Ток х.х $I_o$ , %	0,8	0,7
Пределы РПН в нейтрали обмотки ВН, %	$\pm 9 \times 1,78$	$\pm 9 \times 1,78$
Масса полная, кг	51400	65000
Отмечены знаком: * по заказу потребителя; ** выведена нейтраль обмотки ВН		

# ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

## 6.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИЛОВОЙ ЦЕПИ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЭЛЕКТРОВОЗА

Развитие электроники способствует созданию принципиально нового поколения электроподвижного состава с новыми техническими решениями. Развитию железнодорожного транспорта в России также способствует сотрудничество отечественных электровозостроительных заводов с мировыми холдингами, такими как «Siemens», «Alstom», «Bombardier».

В марте 2010 года с «Трансмашхолдингом» (ТМХ) — одним из российских изготовителей подвижного состава — компания Alstom подписала соглашение о совместной разработке грузовых локомотивов.

Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ) с 2004 года серийно выпускает грузовой двухсекционный электровоз 2ЭС5К для электрифицированных железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ 50 Гц. В настоящее время выпущено более 1200 электровозов этой серии, и их большая часть эксплуатируется на Восточном полигоне железных дорог России.

На этих электровозах в качестве тяговых электродвигателей (ТЭД) используются коллекторные двигатели постоянного тока типа НБ-514Б.

Коллекторные тяговые двигатели постоянного тока относятся к числу наиболее повреждаемых узлов электровозов. Это определяется сложностью проектирования тяговых двигателей в ограниченных габаритах при значительной их мощности. Тяговые двигатели относятся также к числу наиболее напряженных машин по нагреву, механической прочности и токосяему среди электрических машин. Устранение недостатков, присущих коллекторным ТЭД, снятие ограничений по мощности, обеспечение высокого использования сцепления колеса с рельсом могут быть достигнуты переходом на асинхронные тяговые двигатели (АТД).

Преимущества асинхронного тягового привода перед коллекторным:

- повышение надежности кузовного электрического оборудования вследствие применения бесконтактных устройств преобразования мощности;
- значительное упрощение тягового двигателя по сравнению с коллекторным и повышение его надежности (отпадает необходимость ежедневного осмотра коллекторно-щеточного узла);
- улучшение тяговых свойств электровозов благодаря использованию жесткой тяговой характеристики при боксовании;
- увеличение удельных показателей — мощности и момента на валу тягового двигателя на единицу его объема;
- сокращение расхода электротехнической меди на изготовление тяговых двигателей. По результатам проектирования коллекторных тяговых двигателей и асинхронных тяговых двигателей расход меди на изготовление последних снижается в 2–2,5 раза.

Учитывая преимущества асинхронных тяговых двигателей в электрической тяге, Всероссийский научно-исследовательский и проектноконструкторский институт электровозостроения (ВЭлНИИ) произвел разработку грузового электровоза 2ЭС5 с АТД для однофазной системы электрической тяги (СЭТ) переменного тока 25 кВ 50 Гц [90].

В разделе приведены материалы модернизации силовой схемы и системы управления электровоза 2ЭС5 с питанием от трехфазной тяговой сети переменного тока напряжением 3–25 кВ частотой 50 Гц.

Как известно, режимы нагрузок тяговых двигателей определяются условиями эксплуатации для конкретного вида электроподвижного состава. Для грузового электровоза характерна наибольшая реализуемая сила тяги  $F_{\max}$  при разгоне (диапазон скорости от нуля до номинальной) и соответственно нарастание потребляемой мощности пропорционально росту скорости. В диапазоне скорости от номинальной до максимальной потребляемая электровозом мощность примерно одинакова (сила тяги уменьшается с увеличением скорости).

Грузовые электровозы характеризуются отношением максимальной скорости  $V_{\max}$  к номинальной  $V_{\text{ном}}$ , примерно равным 2. Мощность, развиваемая тяговым двигателем при максимальной скорости для грузовых электровозов, меньше номинальной и обычно составляет (0,5–0,6)  $P_{\text{ном}}$ .

Для тяговых двигателей тяговые характеристики должны удовлетворять следующим требованиям:

- а) количество характеристик должно перекрывать тяговую область с учетом ограничений;

б) система регулирования должна обеспечивать продолжительную работу в любой точке тяговой области.

Применительно к АТД вводятся дополнительные требования:

а) заданные тяговые характеристики должны быть реализованы без значительного усложнения системы регулирования;

б) система управления должна обеспечивать при боксовании колесных пар жесткость тяговых характеристик.

Возможные способы управления частотой вращения ротора асинхронного двигателя вытекают из формулы

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 \cdot f_1}{p}. \quad (6.1)$$

Согласно (6.1) частоту вращения ротора  $n_2$  двигателя можно регулировать изменением частоты вращения магнитного поля  $n_1$  или скольжения  $s$ . Частота вращения магнитного поля зависит от частоты питающего напряжения  $f_1$  и числа пар полюсов  $p$ . Скольжение является функцией параметров двигателя:

$$s = f(R_1, R_2, X_1, X_2, U_1), \quad (6.2)$$

где  $R_1, R_2$  — активное сопротивление цепей статора и ротора, Ом;

$X_1, X_2$  — индуктивное сопротивление цепей статора и ротора, Ом;

$U_1$  — напряжение на обмотке статора двигателя, В.

Из формул (6.1), (6.2) следует, что частота вращения ротора асинхронного двигателя регулируется изменением следующих величин:

- напряжения  $U_1$ ;
- сопротивлений  $R_1$  и  $X_1$ ;
- сопротивлений  $R_2$  и  $X_2$ ;
- числа пар полюсов статора  $p$ ;
- частоты  $f_1$ .

Все указанные способы регулирования скорости находят практическое применение в области промышленного электропривода. Рассмотрим возможности применения указанных способов для средств тяги. Оценка каждого из способов производится по следующим показателям:

- диапазон регулирования — отношение максимальной частоты вращения к минимальной;
- плавность регулирования;

— экономичность — учет затрат, связанных с созданием принятого способа регулирования, и дополнительных потерь энергии, возникающих в приводе;

— стабильность работы привода — изменение частоты вращения ротора при изменении момента на валу двигателя.

Приведенные способы регулирования частоты вращения ротора асинхронных двигателей являются основными и разделяют асинхронные двигатели на двигатели с фазным и короткозамкнутым ротором. Кроме основных, существуют дополнительные способы регулирования, которые сложнее основных и являются их развитием. В рамках этого раздела обзор и анализ дополнительных вариантов управления не рассматриваются.

Из всех приведенных способов в разделе рассмотрен способ регулирования частоты вращения ротора изменением частоты напряжения в обмотке статора. Этот способ регулирования основан на изменении синхронной частоты вращения ротора, пропорциональной частоте напряжения обмотки статора. В качестве источника питания с регулируемой частотой напряжения применяются электромагнитные и полупроводниковые преобразователи частоты.

Необходимо иметь в виду, что одновременно с изменением частоты питающего напряжения будет меняться максимальный электромагнитный момент двигателя. Поэтому для сохранения перегрузочной способности, коэффициента мощности и КПД двигателя необходимо одновременно с изменением частоты изменять и величину напряжения, подаваемого на статор двигателя. Оптимальное соотношение этих параметров с учетом некоторых допущений впервые было найдено академиком М. П. Костенко в виде следующего равенства [110]:

$$\frac{U_{д1}}{U_{д.ном}} = \frac{f_1}{f_{ном}} \sqrt{\frac{M_{д1}}{M_{д.ном}}}, \quad (6.3)$$

где  $U_{д.1}$ ,  $U_{д.ном}$  — действительное и номинальное напряжение АД, В;

$M_{д.1}$ ,  $M_{д.ном}$  — действительное и номинальное значение вращающего момента на роторе АД, Н·м;

$f_1$ ,  $f_{д.ном}$  — действительная и номинальная частота напряжения, Гц.

Если регулирование частоты вращения ротора двигателя производится при условии постоянства нагрузочного момента, то подводимое напряжение необходимо изменять пропорционально изменению частоты так, чтобы их отношение оставалось величиной постоянной:

$$\frac{U_n}{f_n} = \frac{U_1}{f_1} = \text{const.} \quad (6.4)$$

Если регулирование происходит с постоянной механической мощностью  $P_2$ , то подводимое напряжение необходимо изменять пропорционально корню квадратному изменению частоты:

$$\frac{U_{д1}}{U_{д,ном}} = \sqrt{\frac{f_1}{f_{ном}}}. \quad (6.5)$$

Регулирование частоты вращения ротора двигателя изменением частоты напряжения является наиболее рациональным и экономичным способом управления. Основные его достоинства:

- а) используется короткозамкнутый двигатель;
- б) достигаются большой диапазон и плавность регулирования;
- в) сохраняется жесткость механических характеристик, а следовательно, и стабильность работы привода;
- г) рекуперативное торможение может осуществляться почти до полной остановки.

Учитывая способы регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя, можно выделить два варианта построения силовой схемы электровоза, работающего в условиях трехфазной тяговой сети:

Схема № 1: трехфазная тяговая сеть — тяговый трансформатор — АД с фазным ротором (рис. 6.1)

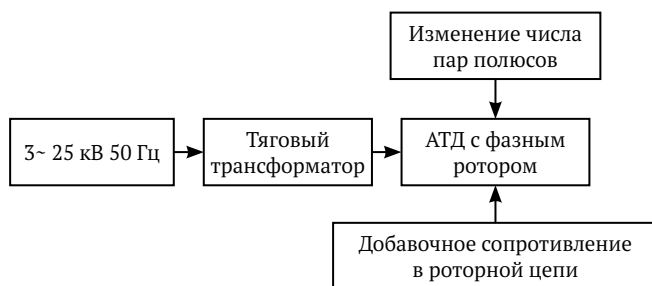


Рис. 6.1. Структурная схема силовой цепи электровоза типа «трехфазная тяговая сеть — тяговый трансформатор — АД с фазным ротором»

По диапазону регулирования скорости, плавности хода и экономичности электровоз со структурной схемой № 1 (см. рис. 6.1) соответствует электровозу постоянного тока с независимым возбуждением ТЭД



и реостатно-контакторным пуском. Пуск и разгон электровоза реализован за счет изменения величины сопротивления резисторов в цепи ротора. Изменение числа пар полюсов двигателя по своему действию идентично перегруппировке ТЭД в электровозах постоянного тока. Плавность хода и число тяговых характеристик на тяговой области ограничено числом регулировочных ступеней пускового реостата. Движение с постоянством силы тяги определяется и ограничивается лишь ступенчатой формой тяговых характеристик. Продолжительная работа и высокая жесткость тяговых характеристик обеспечивается только при работе на устойчивом участке соответствующей механической характеристики для каждого числа пар полюсов. Возможности применения рекуперативного торможения ограничены минимальной синхронной частотой вращения асинхронного двигателя, которая определяется максимально возможным числом пар полюсов  $p$ .

Схема № 2: трехфазная тяговая сеть — тяговый трансформатор — преобразователь — АТД с короткозамкнутым ротором (рис. 6.2).



Рис. 6.2. Структурная схема силовой цепи электровоза типа «трехфазная тяговая сеть — тяговый трансформатор — преобразователь частоты — АТД с короткозамкнутым ротором»

В плане реализации различных режимов движения, плавности хода и экономичности данная схема является наиболее совершенной. Она позволяет формировать тяговые характеристики по пределам ограничений (по максимальному значению силы тяги, по постоянству потребляемой мощности, по максимальной скорости), наиболее полно использовать установленную мощность АТД с короткозамкнутым ротором. Одновременно изменяя напряжение статора по величине ( $U_1$ ) и частоте ( $f_1$ ), можно получить,

в зависимости от принятого закона регулирования, тяговые характеристики требуемой жесткости. Продолжительная работа при высоких значениях КПД и коэффициента мощности возможна во всем рабочем диапазоне тяговых характеристик. Возможность применения рекуперативного торможения положительно сказывается на энергетической эффективности тягового привода.

Результаты сравнения вариантов структурных схем силовых цепей трехфазного электровоза приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Сравнительный анализ вариантов структурных схем силовых цепей трехфазного электровоза

Вариант схемы силовой цепи электровоза	Простота реализации	Возможность регулирования параметров движения	Стабильность работы привода	Возможность перехода в режим рекуперации	Энергетическая эффективность	Надежность	Всего баллов
	В относительных единицах («1» — наихудший вариант, «2» — наилучший вариант)						
Схема №1	2	1	1	1	1	1	7
Схема №2	1	2	2	2	2	2	11

Анализ данных табл. 6.1 показывает, что управление асинхронным тяговым приводом за счет регулирования напряжения статора по величине и частоте (см. схема № 2, рис. 6.2) является наиболее совершенным, так как позволяет максимально полно использовать мощность АТД во всем рабочем диапазоне скоростей движения и поддерживать высокие энергетические показатели тяговой сети в целом. Это и предопределило широкое использование асинхронного тягового привода (АТП) на современном ЭПС постоянного и переменного тока, работающем в однофазной тяговой сети. Недостатком схемы на рис. 6.2 является значительное усложнение конструкции электрооборудования ЭПС по сравнению со схемой рис. 6.1 за счет наличия промежуточного звена постоянного напряжения, инверторов напряжения и обеспечивающей их функционирование

схемы управления. По остальным показателям (см. табл. 6.1) предпочтительной является схема на рис. 6.2.

В дальнейшем, в качестве расчетного варианта, рассматривается структурная схема силовой цепи электровоза с короткозамкнутым ротором.

## 6.2. СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЭЛЕКТРОВОЗА ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Схема силовой цепи секции электровоза со структурой типа «трехфазная тяговая сеть — тяговый трансформатор — тяговый преобразователь — асинхронный тяговый двигатель с короткозамкнутым ротором» представлена на рис. 6.3.

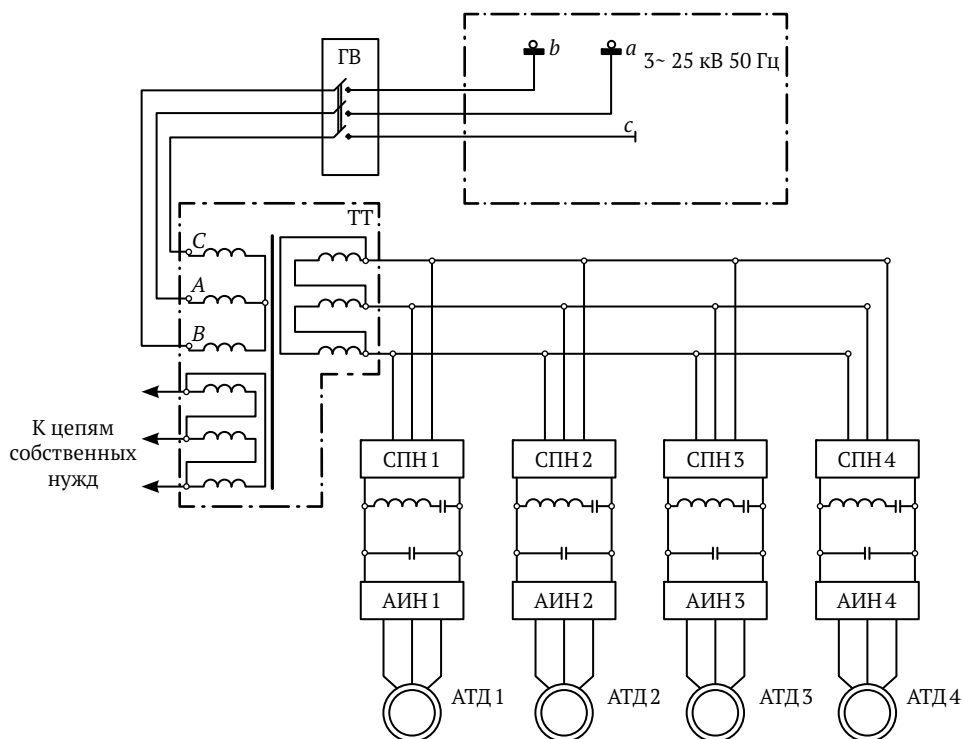


Рис. 6.3. Структурная схема силовой цепи секции электровоза:  
*a, b* — воздушная контактная сеть фаз «*a*» и «*b*»; «*c*» — тяговый рельс — фаза «*c*»;  
 ГВ — главный выключатель; ТТ — тяговый трансформатор; СПН — сетевой преобразователь напряжения; АИН — автономный инвертор напряжения; АТД — асинхронный тяговый двигатель

В каждой из двух секций электровоза установлено четыре асинхронных тяговых двигателя, параллельно подключенных через отдельный тяговый преобразователь к вторичной тяговой обмотке трехфазного тягового трансформатора.

### 6.2.1. Цепи первичной обмотки тягового трансформатора

Схема силовых цепей тягового электропривода электровоза (рис. 6.4) обеспечивает работу в составе одной, двух и трех секций в режимах тяги, электрического торможения, а также в режиме выбега.

Подключение секции электровоза к контактной сети осуществляется токоприемниками  $XA1$  и  $XA2$ , установленными на каждой секции. Понижение напряжения с 25 кВ до величины, необходимой для питания тяговых двигателей, вспомогательных машин и других устройств, осуществляется тяговым трансформатором  $TV1$ , первичная обмотка которого подключена к токоприемникам через дроссели помехоподавления  $L1$ ,  $L2$ , высоковольтные разъединители  $QS1$ ,  $QS2$ , главные выключатели  $QF1$ ,  $QF2$ , фильтры  $Z1$ ,  $Z2$  и трансформаторы тока  $TA1$ ,  $TA2$ . К рельсовой цепи обмотка тягового трансформатора подключена через трансформатор тока  $TA3$  и токосъемные устройства букс  $XA3$ – $XA6$ .

Дроссели  $L1$ ,  $L2$  и фильтры  $Z1$ ,  $Z2$  предназначены для снижения уровня радиопомех, создаваемых при работе электровоза.

Главные выключатели  $QF1$ ,  $QF2$  предназначены для оперативных и аварийных отключений тягового трансформатора  $TV1$ . После отключения первичная обмотка трансформатора автоматически закорачивается на корпус разъединителями главных выключателей с целью обеспечения безопасности при входе в высоковольтную камеру.

Трансформаторы тока  $TA1$ ,  $TA2$  служат источником тока для реле  $KA7$  и  $KA8$  (на рис. 6.4 не показаны), являющихся составными частями главных выключателей  $QF1$  и  $QF2$  соответственно. При коротких замыканиях и токовых перегрузках ток в цепях катушек реле достигает величины, равной уставке реле, при этом реле  $KA7$  и  $KA8$  включаются и размыкают цепи катушек удерживающих электромагнитов главных выключателей.

Трансформатор тока  $TA3$  выполняет функции датчика тока для счетчика электроэнергии  $PJ1$ . Счетчик  $PJ1$  предназначен для учета потребляемой и рекуперированной электроэнергии.

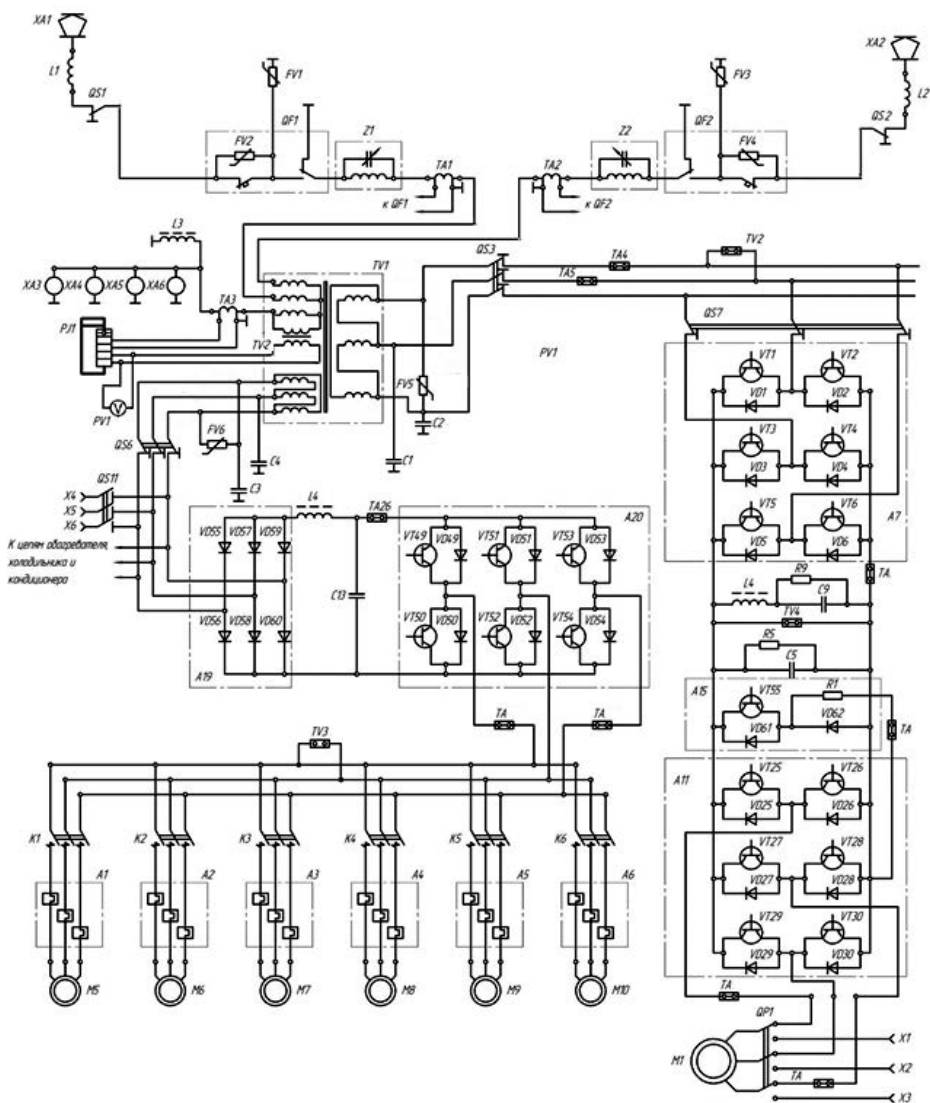


Рис. 6.4. Схема силовых цепей секции электровоза

Для защиты от атмосферных и коммутационных перенапряжений в контактной сети предусмотрены ограничители перенапряжений  $FV1-FV4$ .

Напряжение контактной сети измеряется вольтметром  $PV1$ , установленным в кабине машиниста и подключенным к обмотке измерительного трансформатора  $TV2$ . К вторичной обмотке измерительного трансформатора  $TV2$  также подключен счетчик электроэнергии  $PJ1$ .

В существующих сериях локомотивов однофазной системы переменного тока 25 кВ 50 Гц напряженческая цепь счетчика подключена к обмотке тягового трансформатора, что явно вносит существенную погрешность в показания расхода электрической энергии на тягу. В рассматриваемом электровозе предполагается использование специального измерительного трансформатора напряжения ОСГ3.06–27 кл. 0,5, выпускаемого ООО НПП «Электромаш», г. Екатеринбург.

При работе двух электровозов по системе многих единиц СМЕ соединение токоприемников одного электровоза с токоприемниками другого электровоза не предусматривается.

### 6.2.2. Цепи вторичных обмоток тягового трансформатора

Напряжение на четыре тяговых двигателя (см. рис. 6.4) подается от вторичной тяговой обмотки трансформатора *TV1* через индивидуальные тяговые преобразователи. Для снижения уровня атмосферных и коммутационных перенапряжений в цепях тяговых обмоток предусмотрен ограничитель перенапряжений *FV5*. Для снижения потенциала относительно корпуса при атмосферных перенапряжениях и снижение уровня радиопомех тяговая обмотка соединена с корпусом электровоза соответственно через конденсаторы *C1*, *C2*.

Защита тяговых обмоток и тяговых двигателей от токов короткого замыкания осуществляется с помощью реле *KA1–KA3*, (на рис. 6.4 не показаны), подключенных к трансформаторам тока в линейных проводах вторичной обмотки, при срабатывании которых от обмотки собственных нужд трансформатора подается напряжение на катушки отключающих электромагнитов главных выключателей *QF1*, *QF2*.

Управление отдельными тяговыми двигателями не предусматривается. В случае необходимости отключения отдельного двигателя происходит отключение всех двигателей секции электровоза при помощи главных выключателей *QF1*, *QF2* и разъединителя *QS 3*.

Питание одного тягового двигателя от источника низкого напряжения (сеть депо) осуществляется через розетки *X1–X3* и переключатель *QP1*.

Напряжение вторичной обмотки тягового трансформатора измеряется вольтметром *PV1*, подключенным к обмотке измерительного трансформатора *TV2*.

### 6.2.3. Тяговый преобразователь

Тяговый трансформатор  $TV1$  имеет тяговую обмотку со схемой соединения «треугольник», от которой питаются четыре тяговых преобразователя. Каждый канал тягового преобразователя содержит входной сетевой преобразователь напряжения (схема которого представлена на рис. 6.4 и 6.5), промежуточное звено постоянного напряжения (промежуточный контур — фильтр и чоппер тормозной), от которого получает питание трехфазный инвертор напряжения, образованный транзисторными модулями. Инвертор обеспечивает питанием один тяговый двигатель. Трехфазное напряжение, формируемое инвертором, регулируется по величине и частоте.

Тормозной чоппер предназначен для импульсного регулирования мощности тормозного резистора. Тормозной резистор  $R_1$  выполняет несколько функций:

- поглощает электроэнергию, вырабатываемую работающим в генераторном режиме тяговым двигателем при реостатном торможении;
- ограничивает перенапряжения, возникающие в промежуточном контуре при переходных и аварийных режимах;
- разряжает фильтровые конденсаторы промежуточного контура при опускании токоприемников.

Для четырех тяговых преобразователей тормозные резисторы  $R1-R4$  и дроссели режекторных фильтров  $L4-L7$  расположены в отдельных блоках вне тяговых преобразователей.

При переходе из тягового режима в режим рекуперативного или реостатного торможения и при обратных переходах переключений в силовой схеме не происходит. Тяговые двигатели переводятся в генераторный режим за счет понижения основной частоты относительно синхронной частоты, соответствующей данной скорости движения, а инверторы напряжения переходят в режим трехфазного диодного выпрямителя. В случае реостатного торможения тормозной чоппер начинает работать как импульсный регулятор.

При рекуперативном торможении входные сетевые преобразователи напряжения за счет изменения алгоритма управления переводятся в инверторный режим. При этом электроэнергия из промежуточного контура тягового преобразователя направляется к тяговому трансформатору  $TV1$  и далее трансформируется в контактную сеть.

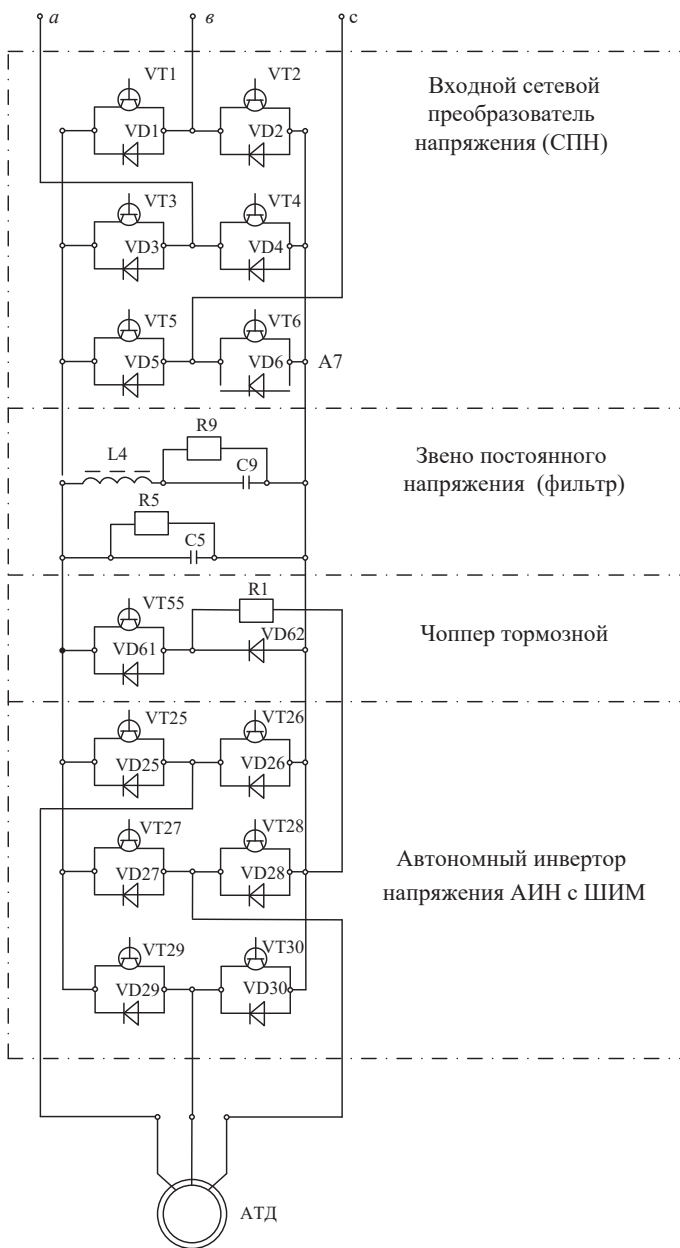


Рис. 6.5. Принципиальная схема тягового преобразователя

Защита силовых цепей тяговых преобразователей и тяговых двигателей от токов перегрузки и коротких замыканий выполнена с помощью внутренних средств тяговых преобразователей.



В соответствии с рис. 6.4 ввод электровоза в депо осуществляется одним тяговым двигателем  $M1$ .

Для реализации режима ввода электровоза в депо применены переключатель  $QP1$  и розетки  $X1$ ,  $X2$  и  $X3$ . Перед вводом электровоза в депо переключатель  $QP1$  переключается в положение, при котором цепи питания тягового двигателя  $M1$  отключаются от тягового преобразователя и подключаются к розеткам  $X1$ ,  $X2$  и  $X3$ .

#### 6.2.4. Цепи питания вспомогательных машин

Для снижения уровня атмосферных и коммутационных перенапряжений предусмотрен ограничитель перенапряжений  $FV6$ , для снижения уровня радиопомех — конденсаторы  $C3$ ,  $C4$ , для защиты от токов короткого замыкания — реле  $KA4$ – $KA6$  (на рис. 6.4 не показаны), подключены к трансформаторам тока в линейных проводах вторичной обмотки, при включении которых отключаются главные выключатели  $QF1$ ,  $QF2$ .

В соответствии с рис. 6.4 тяговый трансформатор  $TV1$  имеет вспомогательную обмотку, от которой питается преобразователь вспомогательных цепей, содержит диодный выпрямитель  $A19$ , промежуточное звено постоянного напряжения (промежуточный контур), от которого получает питание трехфазный инвертор напряжения, образованный транзисторными модулями  $A20$ . Инвертор обеспечивает питанием цепи вспомогательных машин. Трехфазное напряжение, формируемое инвертором, регулируется по величине и частоте.

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и обеспечения непрерывности потока электроэнергии в кратковременных переходных режимах к промежуточному контуру подключена батарея фильтровых конденсаторов  $C13$  и сглаживающий реактор  $L4$ .

От токовых перегрузок вспомогательные машины защищены тепловыми реле  $A1$ – $A6$ , при срабатывании которых отключаются соответствующие контакторы  $K1$ – $K6$ .

Для привода вентиляторов, компрессоров, маслонасосов и водяных насосов применены трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

При работе двух электровозов или электровоза и третьей секции по системе многих единиц соединение цепей питания вспомогательных машин между электровозами или электровозом и третьей секцией не предусмотрено.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Существующая система однофазной электрической тяги 25 кВ 50 Гц практически исчерпала свои возможности и так же, как и система электрической тяги постоянного тока 3,0 кВ, ограничивает реализацию растущего объема грузового и пассажирского скоростного движения.

2. Применение трехфазной системы электрической тяги по сравнению с однофазной системой вызовет трехкратное снижение потерь электрической энергии в тяговой сети.

3. Обеспечивается согласованный симметричный режим работы трехфазной системы электрической тяги с трехфазным режимом питающей энергосистемы, что приводит к повышению коэффициента мощности и к снижению потерь электрической энергии.

4. Снятие напряжения в контактной сети при существующей однофазной системе электрической тяги 25 кВ 50 Гц ведет к перерыву движения поездов. С введением трехфазной системы электрической тяги снятие напряжения одной фазы не приводит к перерыву движения поездов. Трехфазная система электрической тяги переходит в однофазный режим работы, но со снижением мощности электровоза примерно в два раза.

5. Рассмотрено два варианта токосъема ползком токоприемника с контактного провода: с боковой его поверхности — «сбоку» и с нижней поверхности провода — «понизу». Лучшим качеством токосъема обладает токосъем «понизу». С его принятием необходима разработка нового типа токоприемника для фаз «а» и «b» для их размещения на крыше секции электровоза.

6. Обеспечивается снижение эксплуатационных и капитальных затрат без сооружения контактной сети на боковых путях станции, на переходах с одного пути на другой, при пересечениях главных путей двух железнодорожных направлений.

7. В трехфазной системе электрической тяги возникнет необходимость применения на станции локомотива толкача (тепловоза) для прохождения поезда с электровозом с опущенными токоприемниками. В качестве такого толкача может быть использован тепловоз, приписанный к станциям для маневровой работы.

8. При разработке трехфазного электровоза ввести в силовую часть электровоза аккумуляторную или конденсаторную батарею с подзарядным устройством от контактной сети. Батарея предназначена для движения электровоза с составом или без него с малой скоростью. Мощность батареи — не более 360 кВт, количество тяговых двигателей (1–2) определяется расчетом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котельников, А. В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А. В. Котельников. — М. : Интекст, 2002. — 104 с.
2. Sheilah Frey. Railway Electrification Systems & Engineering. First Edition, 2012. Published by: White Word Publications. — P. 145. ISBN 978-81-323-4395-0.
3. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации ЦЭ-462. — М. : Транспорт, 1997. — 79 с.
4. Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов / под ред. С. И. Осипова. — М. : Транспорт, 1984. — 280 с.
5. Петров, Г. Н. Электрические машины: в 3 ч. Ч. 1. Введение. Трансформаторы : учебник для вузов / Г. Н. Петров. — М. : «Энергия», 1974. — 250 с.
6. Моченов, И. Г. Результаты опытной эксплуатации устройств автоматического регулирования напряжения на подстанциях / И. Г. Моченов // Тр. ин-та / ЦНИИ МПС. — Вып. 250. — М. : Трансжелдориздат, 1963. — С. 56–80.
7. Блок автоматического управления БАУРПН производства Глав-Латв-Энерго.
8. Урманов, Р. Н. К теории регулирования напряжения трансформатора дросселями насыщения / Р. Н. Урманов, Е. М. Ветлугин // Изв. вузов. Электромехника. — 1965. — № 2. — С. 146–157.
9. Автоматическое бесконтактное регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции постоянного тока / Р. Н. Урманов, Я. Л. Фишлер, М. И. Клейнерман, Б. А. Аржанников // Режимы регулирования напряжения в электрических сетях: Всесоюз. науч. конф. — Рига, 1968. — 20 с.
10. Основные результаты промышленных испытаний тягового трансформатора ТДРУ-20000/35 / Р. Н. Урманов, М. И. Клейнерман, Я. Л. Фишлер, Б. А. Аржанников, Б. В. Белобородов // Труды УЭМИИТ. — 1969. — № 24. — С. 3–12.
11. Трансформатор ТРДП-16000/10 ЖУ1. Расчетная записка ИБПД 6724.34.015РР/ПО «УЭТМ». — 1985. — 12 с.
12. Расчетная записка «Трансформаторный регулируемый агрегат» ТРДНПА-16000/35(10) ЖУ1 / По «Уралэлектротяжмаш»; ИБПД 674861.014РР. — 1990. — 44 с.
13. Расчетная записка «Трансформатор ТРСЗПА-6300/10Ж УХЛ2» ПО «Уралэлектротяжмаш», ИБПД 672331 РР. — 1992. — 11 с.
14. А. с. 838668 СССР, МКИ G05F 1/14, H02P 13/16. Устройство для регулирования переменного напряжения / Б. А. Аржанников, Р. Н. Урманов, Я. Л. Фишлер, В. С. Шлентов (СССР). — № 2815966/24–07; заявл. 17.09.79; опубл. 15.06.81, Бюл. № 22. — 2 с. : ил.
15. А. с. 1220955 СССР, МКИ B60M 3/02. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети / Б. А. Аржанников, В. С. Попов, В. И. Сипкин, Н. А. Соколов, Р. Н. Урманов; УЭМИИТ (СССР). — № 3814509/27-11; заявл. 17.10.84; опубл. 30.03.86, Бюл. № 12. — 4 с. : ил.

16. А. с. 1444I85 СССР, МКИ В60М 3/02. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети / Л. А. Фролов, Б. А. Аржанников, В. И. Сипкин; УЭМИИТ (СССР). — № 4249107/27-II; заявл. 26.05.87; опубл. 15.12.88, Бюл. № 46. — 6 с. : ил.
17. Свидетельство РФ № 9075, МПК 6 Н02М 5/22, G05F 1/14 на полезную модель. Устройство для регулирования переменного напряжения / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов. — № 98107262/20; заявл. 20.04.98; опубл. 16.01.99, Бюл. № 1. — 6 с. : ил.
18. Пат. РФ № 32379203 на изобретение, МПК В60М 3/02, Н02М 5/257. Устройство для автоматического регулирования напряжения в контактной сети / Аржанников Б. А., Фролов Л. А. — № 2008117238/11; заявл. 29.04.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2. — 8 с. : ил.
19. Пат. РФ № 2339992 на изобретение, МПК G05FD 1/14. Устройство для регулирования переменного напряжения / Аржанников Б. А. — № 2007141901/09; заявл. 12.11.2007; опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33-6 с. : ил.
20. Пат. США № 3619765, кл. 324-43.5, 1971.
21. Пат. Франции № 2163916, кл. Н 02 Р 13/00, 1973.
22. Пат. Японии № 53-38020, кл. Н 02 Р 13/16, 1978.
23. А. с. 1003039 СССР, М. Кл.3 G 05 F 1/20. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора / Б. Ю. Алтунин, А. А. Асабин, Л. А. Соловьев; По «УЭТМ», ГПИ (СССР). — 3318038/24-07; заявл. 14.07.81; опубл. 07.03.83, Бюл. № 9. — 9 с. : ил.
24. А. с. 1132336 СССР, МКИ Н 02 Р 13/06; 1983.
25. Пат. РФ № 2086073 на изобретение, Н02Р 13/06, G05F 1/20. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора / Зборовский И. А. — 95112939/07; заявл. 25.07.95; опубл. 27.07.97, Бюл. № 21-12 с. : ил.
26. Пат. РФ № 2398342 на изобретение, МПК Н02М 5/12. Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора / Асабин А. А. — 2009123939/09; заявл. 23.06.2009; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24-15 с. : ил.
27. Пат. РФ № 2274945 на изобретение, МПК Н02Р 13/06, G05F 1/20. Способ переключения ответвлений обмотки трансформатора и устройство для его осуществления / Аржанников Б. А., Фролов Л. А., Штин А. Н. — № 2004127325/22; заявл. 13.09.04; опубл. 27.11.04, Бюл. № 33-6 с. : ил.
28. Преобразователи тяговых подстанций и электроподвижного состава (схемы главных электрических соединений): методические указания к выполнению курсовых работ и дипломного проектирования / Е. Ю. Салита и др. — Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2000. — С. 75.
29. Монтаж, наладка и эксплуатация полупроводниковых преобразователей тяговых подстанций / С. Д. Соколов, Я. Д. Гуральник, А. М. Соляников, О. Г. Чаусов. — М., 1972. — 188 с.
30. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций / С. Д. Соколов и др. — М. : Транспорт, 1979.

31. Повышение надежности и эффективности системы тягового электроснабжения / под ред. С. Д. Соколова // Труды ВНИИЖТ. — М. : Транспорт, 1979. — Вып. 618.
32. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко и др.; под ред. М. Г. Шалимова. — М., 1990. — 127 с.
33. Двенадцатипульсовый выпрямительный агрегат для тяговых подстанций постоянного тока / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко и др. // Разработка и исследование автоматизированных средств контроля и управления для предприятий железнодорожного транспорта : Межвуз. темат. сб. науч. тр / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. — Омск, 1990. — С. 37–42.
34. Выпрямительный и выпрямительно-инверторный агрегаты с регулированием выходного напряжения для тяговых подстанций / В. В. Руденский, Т. П. Добровольский, В. А. Зимаков, и др. / под ред. А. Б. Косарева // Новое в хозяйстве электроснабжения. — М. : Интекст, 2003. — 143 с.
35. Агрегаты с параллельным соединением преобразовательных секций для регулирования выпрямленного напряжения / С. Д. Соколов, Т. П. Добровольский, И. Г. Глухов, В. В. Руденский / Труды ВНИИЖТ. — М. : Транспорт, 1979. — Вып. 618. — С. 101–114.
36. Экспериментальные исследования выпрямительно-инверторного агрегата с регулированием выпрямленного напряжения / С. Д. Соколов, Н. Н. Волков, В. В. Руденский и др. // Труды ВНИИЖТ. — М. : Транспорт, 1979. — Вып. 618. — С. 121–126.
37. Засорин С. Н., Бабаева В. М. Регулируемый преобразователь на тиристорах для повышения напряжения в контактной сети железных дорог постоянного тока // Труды МИИТа. — М. : Транспорт, 1969. — Вып. 302.
38. Аржанников Б. А. Вольтодобавочные устройства тяговых подстанций / Б. А. Аржанников, Р. Н. Урманов, Я. Л. Фишлер и др. // Электрическая и теплово-возная тяга. — 1989. — № 8. — С. 44–46.
39. Заявка 59–186744 Япония, МКИ В60М 3/02. Вольтодобавочное устройство для железной дороги постоянного тока / Миура Адзуки и др. — 1981.
40. Заявка 60–1274731; заявл. 19850612; опубли. НИИ ВИНТИ № РЖ 87, 12815 ВП Техническая эксплуатация подвижного состава и тяга поездов.
41. Аржанников Б. А. Одноагрегатная регулируемая подстанция / Б. А. Аржанников, А. М. Левин // Железнодорожный транспорт. — 1991. — № 8 — С. 44–46.
42. Аржанников Б. А. Усиление системы электроснабжения постоянного тока / Б. А. Аржанников, Л. Н. Немытых // Транспорт Урала. — 2006. — № 1 — С. 2–8.
43. Пат. РФ № 2307746 на изобретение МПК В60М 3/00. Схема питания железных дорог постоянного тока / Аржанников Б. А. — № 2006100965; заявл. 10.01.2006; опубли. 10.10.2007. Бюл. № 28. — 6 с. : ил.
44. А.с. 152894 СССР, МКИ В61М, Кл. 20 к. 5. Система электроснабжения электрических железных дорог / Т. П. Третьяк (СССР) // Открытия. Изобретения. — 1963. — № 3.

45. Энергоснабжение контактной сети постоянного тока с питанием повышенным напряжением преобразователя по усиливающему проводу / А. А. Федотов, С. Н. Васильев, А. В. Мизинцев и др. // Материалы 2-го международного симпозиума. — СПб. : ПГУПС, 2003.
46. Аржанников Б. А. Концепция усиления тягового электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ : монография / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко. — Екатеринбург : УрГУПС, 2015. — 260 с.
47. Аржанников Б. А. Тягового электроснабжение постоянного тока для скоростного и тяжеловесного движения поездов : монография / Б. А. Аржанников. — Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. — 2007.
48. Аржанников Б. А. Резервы электрифицированных линий // Железнодорожный транспорт. — 1987. — № 2. — С. 55–57.
49. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока / Б. А. Аржанников; ЦНИИТЭИ МПС // Ж.-д. трансп. «Сер. Электроснабжение железных дорог» : ЭИ. — 1990. — Вып. 4. — С. 17–27.
50. Аржанников Б. А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых подстанций: дис. д-ра техн. наук / Б. А. Аржанников. — М., 1991. — 432 с.
51. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография / Б. А. Аржанников. — Екатеринбург : УрГУПС, 2010. — 176 с.
52. Розенфельд В. Е. Применение постоянного тока высокого напряжения для электрической тяги / В. Е. Розенфельд, В. В. Шевченко, В. А. Майбога // Железнодорожный транспорт. — 1962. — № 7. — С. 35–39.
53. Тихменев, Б. Н. Электрическая тяга постоянного тока: возможности усиления / Б. Н. Тихменев, Н. Н. Горин, В. А. Кучумов // Железнодорожный транспорт. — 1987. — № 7. — С. 48–51.
54. Дядьков А. М. К вопросу электрификации железных дорог на постоянном токе повышенного напряжения / А. М. Дядьков, А. С. Низов, В. А. Попик // Режимы работы устройств энергоснабжения. Ч. 3. // Сборник научных трудов МИИТ и УрЭМИИТ. — Свердловск, 1971. — С. 3–12.
55. Майер Л. Оценка возможностей электротяги на 12 кВ постоянного тока / Л. Майер, О. Вентура // *Ingeneering inforzia*. — 1989. — С. 271–273.
56. Купцов Ю. Е. Обзор зарубежной информации / Ю. Е. Купцов // Локомотив. — 2001. — № 8. — С. 32.
57. Бурков, А. Т. Система электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения / А. Т. Бурков, В. Н. Пупынин, Е. Т. Чернов // Всероссийская конференция «Параметры перспективных транспортных систем России» : тез. докл. — М., 1994. — С. 54.
58. Система электрической тяги постоянного тока 12 кВ / А. Т. Бурков, Ю. Е. Березин, А. Н. Марикин и др. : Тезисы докладов конференции ПГУПС. — 1995. — С. 29–30.

59. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи : учебник для вузов ж.-д. транспорта / А. Т. Бурков. — М. : Транспорт, 1999. — С. 464.
60. Курбасов А. С. Электровоз постоянного тока с асинхронными двигателями / А. С. Курбасов // Железнодорожный транспорт. — 1988. — № 8. — с. 41–43.
61. Курбасов А. С. Радикальное повышение производительности электровозов при использовании асинхронного тягового двигателя / А. С. Курбасов // Материалы третьего междунар. симп. «Элтранс-2005», 5–17 ноября 2005 г. — ПГУПС, 2007. — 720 с.
62. Жемчугов В. Г. Преобразовательный модуль 24/3 кВ для системы тягового электроснабжения постоянного тока повышенного напряжения / В. Г. Жемчугов, А. В. Агунов // Материалы четвертого междунар. симп. «Элтранс-2007», 23–26 октября 2007 г. — ПГУПС, 2009. — 507 с.
63. Преобразователь статический тяговый для электровозов (электропоездов) постоянного тока с номинальным напряжением контактной сети 24 кВ СТПР-24. Технические требования (проект). Федеральное космическое агентство филиал ВГУП НПО Автоматики имени академика Н. А. Семихатова (ОКБ Автоматики) Екатеринбург, 2012 г.
64. Бадер М. П. Электромагнитная совместимость в электрической тяге постоянного тока с асинхронным приводом / М. П. Бадер // Материалы третьего междунар. симп. «Элтранс-2005», 5–17 ноября 2005 г. — ПГУПС, 2007. — 720 с.
65. Набойченко И. О. О создании системы электрической тяги постоянного тока повышенного напряжения / И. О. Набойченко, В. А. Мансуров, Б. А. Аржанников // Железнодорожный транспорт. — 2022. — № 3. — С. 50–55.
66. Марквардт К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог. — М. : Транспорт, 1982. — 528 с.
67. Ефимов А. В. Современные методы улучшения качества электроэнергии на тяговых подстанциях электрических железных дорог: учеб. пособие / А. В. Ефимов, А. А. Пышкин. — Изд-во УЭМИИТ, 1974. — 81 с.
68. Герман Л. А. Фильтрокомпенсирующие установки в системах тягового электроснабжения железных дорог : монография / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, Д. Е. Дулепов. — Княгинино : НГИЭУ, 2017. — 402 с.
69. Бородулин Б. М. Рациональное размещение установок компенсации реактивной мощности в тяговой сети переменного тока. Вестник ЦНИИ МПС, 1964, № 5.
70. Разработка предложений по снижению несимметрии по участках переменного тока и повышению коэффициента мощности на участках переменного и постоянного тока. Отчет ЦНИИ МПС по теме 104-ЭИ-71, раздел 1. Номер гос. регистрации № 1019480, М., 1971.
71. Мамошин Р. Р. Установка поперечной компенсации, размещаемая в тяговой сети / Р. Р. Мамошин, А. В. Ефимов // Труды МИИТа. — 1971. — Вып. 380.
72. Фишлер Я. Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок / Я. Л. Фишлер, Р. Н. Урманов, Л. М. Пестряева. — М. : Энергоиздат, 1989. — 320 с.

73. Герман Л. А. Повышение качества напряжения на тяговых подстанциях переменного тока. /ДНИИ ТЭИ МПС. — Серия «Электрификация и энергетическое хозяйство». — 1970. — Вып. 61.
74. Пат. РФ № 2689111 на изобретение МПК H02M 5/257, G05F 1/14. Устройство для регулирования напряжения / Б. А. Аржанников, М. Б. Аржанников. — № 201822748; заявл. 21.06.2018; опубл. 24.05.2019. Бюл. № 15. — 1.
75. Ограничение уравнивающих токов и уменьшение потерь электрической энергии в тяговых сетях с помощью вольтодобавочных трансформаторов / С. П. Волков, Б. И. Косарев / под ред. А. Б. Косарева // Новое в хозяйстве электроснабжения. — М. : Интекст, 2003. — 143 с.
76. Косарев Б. И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока. — М. : Транспорт, 1981. — 217 с.
77. Власов С. П. Энергосбережение в тяговых сетях электрифицированных железных дорог переменного тока / С. П. Власов, В. А. Воробьев // Энергосбережение и водоподготовка. — 1997. — № 2. — С. 52–57.
78. Власов С. П. Ограничение уравнивающих токов в тяговых сетях переменного тока 25 кВ с помощью вольтодобавочных устройств / С. П. Власов, В. А. Мансуров // Вестник ВНИИЖТ. — 1998. — № 8. — С. 32–36.
79. Пат. РФ № 2321092 на изобретение, МПК H01F29/02, H02P 13/06. Трансформаторный агрегат с регулированием напряжения для электрифицированных железных дорог переменного тока / Аржанников Б. А., Григорьев В. Ф. — 2006131636; заявл. 01.09.2006; опубл. 27.03.2008, Бюл. № 9.
80. Мамошин Р. Р. Новые технологии электроснабжения железных дорог на переменном токе / Р. Р. Мамошин // Евразия Вести «Безопасность железнодорожного транспорта». — М.; 2007. — С. 11.
81. Василянский А. М. Совершенствование системы тягового электроснабжения железных дорог, электрифицированных на переменном токе 27,5 кВ, 50 Гц / А. М. Василянский, Р. Р. Мамошин, Г. Б. Якимов // Железнодорожные дороги мира. — 2002. — № 8. — С. 40–46.
82. Системы электроснабжения для вновь электрифицируемых участков переменного тока / А. М. Василянский, Р. Р. Мамошин / под ред. А. Б. Косарева // Новое в хозяйстве электроснабжения. — М. : Интекст, 2003. — 143 с.
83. Переменный и постоянный ток. «ЗАО ТД «Электровозмаш», декабрь, 2005»/ <http://www.tevz.com/ru/articles/16/>
84. Historisches: Die Entwicklung der elektrischen Zugtraktion in Italien und Europa: [сайт]. — URL: <http://www.finescalemuc.de/trifasestoria.htm> (дата обращения: 20.04.2018).
85. Vittorio Formigari, A duecento all'ora agli albori del xx secolo. Экспериментальная высокоскоростная линия Мариенфельде — Цоссен 1902 года: успех или провал? *Latecnicaprofessionale*, N. 7–8. Luglio-Agosto 2014.
86. Drehstrom — Versuchsstreckegroß — Lichterfelde — Zehlendorf: [сайт]. — URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Drehstrom-Versuchsstreckegroß-Lichterfelde-Zehlendorf> (дата обращения: 20.04.2018).



87. KöniglichPreubischeMilitär- Eisenbahn: [сайт]. — URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6niglich\\_Preu%C3%9Fische\\_Milit%C3%A4r-Eisenbahn](http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%B6niglich_Preu%C3%9Fische_Milit%C3%A4r-Eisenbahn)(датаобращения: 20.04.2018).
88. Guy Depraetere, Трехфазные в Италии 2011.
89. X.–L. C. DelSistemaTrifase.
90. Пат. РФ № 2688194 на изобретение МПК В60М 3/00, В60L 15/06. Система тягового электроснабжения железных дорог переменного тока/ Аржанников Б. А. — № 2018122747; заявл. 21.06.2018; опубл. 21.05.2019, Бюл. № 15.
91. Пат. РФ № 2729869 на изобретение МПК В60М 3/00, В60L 15/06. Система тягового электроснабжения железных дорог переменного тока/ Аржанников Б. А. — № 2019120768; заявл. 01.07.2019; опубл. 12.08.2020, Бюл. № 23.
92. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. — 11-е изд., перераб. и доп. — М. : Гардарики, 2006. — 701 с.
93. Демирчан, К. С. Теоретические основы электротехники: в 3 т. / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. — 4-е изд. — СПб. : СП, 2003.
94. Миронов В. Г. Теория электрических цепей / В. Г. Миронов, П. А. Бутырин. — М. : Наука, 2005.
95. Попов В. С. Теоретическая электротехника : учебник для техникумов. — М., «Энергия», 1970. — 608 с.
96. Орлов Ю. А. Грузовой электровоз переменного тока с асинхронными тяговыми двигателями / Ю. А. Орлов, В. П. Янов // Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте: материалы 5 междунар. симп. «Элтранс-2009», 20–23 октября 2009 г. — ПГУПС, 2009. — 637 с.
97. Борц Ю. В. Контактная сеть : иллюстрированное пособие / Ю. В. Борц, В. Е. Чекулаев. — М. : Транспорт, 2001.
98. Аржанников Б. А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока : монография / Б. А. Аржанников. — Екатеринбург : УрГУПС, 2019. — 142 с.
99. Аржанников Б. А. Повышение эффективности системы электрической тяги переменного тока / Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко, В. А. Мансуров // Железнодорожный транспорт. — 2020. — № 8. — С. 36–42.
100. СП 224.132600.2014. Тягового электроснабжение железной дороги: утвержден приказом Минтранса России от 2 декабря 2014 года № 330. — М. : Министерство транспорта, 2014. — 83 с.
101. СТН ЦЭ 141–99. Нормы проектирования контактной сети. Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации, 2011 г.
102. Паранин А. В. Математическое моделирование силового воздействия ветра на провода контактных подвесок с учетом турбулентного отрывного течения // Транспорт Урала. — 2009. — № 3. — С. 103–107.

103. Аржанников Б. А. Выбор и обоснование основных конструктивных параметров контактной подвески для трехфазной системы тягового электроснабжения на прямом участке пути / Б. А. Аржанников, А. В. Паранин // Транспорт Урала. — 2021. — № 1 (68). — С. 69–77.
104. Сердинов А. М. Анализ работы и повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог / А. М. Сердинов. — М. : Транспорт, 1975. — 366 с.
105. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина и др. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
106. Аржанников Б. А. Расчет параметров и оценка возможности использования цепной компенсированной контактной подвески с рычагами для трехфазной системы тягового электроснабжения / Б. А. Аржанников, А. В. Паранин // Известия Транссиба. — 2022. — № 2 (50). — С. 30–44.
107. Воробьев А. А. Анализ материалов, применяемых для изготовления контактных вставок токоприемников электроподвижного состава / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, В. Г. Кондратенко // Прорывные технологии электрического транспорта: материалы 9 междунар. симп. «Элтранс-17» 18–20 октября 2017. — ПГУПС, 2017. — 473 с.
108. Берент В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта / В. Я. Берент. — М. : Интекст, 2005. — 408 с.
109. Берент В. Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем) / В. Я. Берент. — МО Ногинск : АНАЛИТИКА РОДИС, 2016. — 330 с.
110. Костенко М. П. Электрические машины. Ч. 1 / М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. — Л. : Энергия, 1972.

**Тяговые расчеты. Результаты электрического расчета  
при пропуске поездов с составом массой 6235 т с  
электровозом 2ЭС6 с коллекторными тяговыми двигателями —  
расчет 1 и 2 с электровозом 2ЭС6 с АТД — расчет 3 с постоянной  
скоростью 9 км/ч на участках с уклоном ‰ протяженностью 0,5;  
1; 2 км с определением расхода электрической энергии на тягу**

Таблица П1.1

Тяговый расчет № 1.  
Результаты электрического расчета на зоне 0–0,5 км

КОРТЭС – Тяговые расчеты. Отчет о поездке. 26.10.2021 14:02:37 Вариант 1

Файл участка: C:\Кортэс\Ехамр\Тест.pfk  
Тип пути: бесстыковой  
Состав: Груз. 71у.в.23,5  
Поезд: 1, масса 6200 т, длина 1022 м, локомотив 2ЭС6  
Расход энергии: 35,0 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;  
Удельный расход: активн. 11,3 Вт·ч/т·км  
Техническая скорость: 8,5 км/ч  
Макс. ток поезда 785 А на км 0,00  
Макс. перегрев обмоток двиг. 18° (доп. 160°) на км 0,25

П е р е г о н	Длина, км	Время хода, полн. п. током	Расход энергии кВт·ч	
0 км – 0,5 км	0,500	3,6	0,9	35,0

L	V	Ia
0,00	0	785
0,02	2	745
0,06	7	680
0,10	9	224
0,13	9	36
0,17	9	224
0,21	9	36
0,25	9	36
0,29	9	224
0,32	9	36
0,36	9	36
0,40	9	224
0,44	9	36
0,48	9	99
0,50	10	161

Тяговый расчет № 1.  
Результаты электрического расчета на зоне 0–1 км

КОРТЭС – Тяговые расчеты. Отчет о поездке. 26.10.2021 14:03:35 Вариант 1

Файл участка: C:\Кортэс\Ехамр\Тест.pfk  
 Тип пути: бесстыковой  
 Состав: Груз. 71у.в.23,5  
 Поезд: 1, масса 6200 т, длина 1022 м, локомотив 2ЭС6  
 Расход энергии: 52,6 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;  
 Удельный расход: активн. 8,5 Вт·ч/т·км  
 Техническая скорость: 8,8 км/ч  
 Макс. ток поезда 785 А на км 0,00  
 Макс. перегрев обмоток двиг. 18° (доп. 160°) на км 0,25

П е р е г о н	Длина, км	Время хода, мин полн. п. током		Расход энергии кВт·ч
0 км – 1 км	1,000	6,8	1,2	52,6

0,25		
27	6200	
L	V	Ia
0,00	0	785
0,02	2	745
0,06	7	680
0,10	9	224
0,13	9	36
0,17	9	224
0,21	9	36
0,25	9	36
0,29	9	224
0,32	9	36
0,36	9	36
0,40	9	224
0,44	9	36
0,48	9	99
0,52	10	161
0,55	9	36
0,59	9	224
0,63	9	36
0,67	9	36
0,71	9	224
0,75	9	36
0,78	9	36
0,82	9	224
0,86	9	36
0,90	9	36
0,94	9	224
0,97	9	36
1,00	9	99

Тяговый расчет № 1.  
Результаты электрического расчета на зоне 0–2 км

КОРТЭС – Тяговые расчеты. Отчет о поездке. 26.10.2021 14:04:30 Вариант 1

Файл участка: C:\Кортэс\Ехамр\Тест.pfk  
 Тип пути: бесстыковой  
 Состав: Груз. 71у.в.23,5  
 Поезд: 1, масса 6200 т, длина 1022 м, локомотив 2ЭС6  
 Расход энергии: 85,4 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;  
 Удельный расход: активн. 6,9 Вт·ч/т·км  
 Техническая скорость: 9,0 км/ч  
 Макс. ток поезда 785 А на км 0,00  
 Макс. перегрев обмоток двиг. 18° (доп. 160°) на км 0,25

П е р е г о н	Длина, км	Время хода, мин	полн. п. током	Расход энергии кВт·ч
0 км – 2 км	2,000	13,4	1,9	85,4

0,25				
53	6200			
L	V	Ia		
0,00	0	785		
0,02	2	745		
0,06	7	680		
0,10	9	224		
0,13	9	36		
0,17	9	224		
0,21	9	36		
0,25	9	36		
0,29	9	224		
0,32	9	36		
0,36	9	36		
0,40	9	224		
0,44	9	36		
0,48	9	99		
0,52	10	161		
0,55	9	36		
0,59	9	224		
0,63	9	36		
0,67	9	36		
0,71	9	224		
0,75	9	36		
0,78	9	36		
0,82	9	224		
0,86	9	36		
0,90	9	36		
0,94	9	224		
0,97	9	36		
1,01	9	99		
1,05	10	161		
1,09	9	36		
1,13	9	224		
1,16	9	36		
1,20	9	36		
1,24	9	224		
1,28	9	36		
1,32	9	36		
1,36	9	224		
1,39	9	36		
1,43	9	36		
1,47	10	224		
1,51	9	36		
1,55	9	161		
1,59	10	98		
1,62	9	36		
1,66	9	224		
1,70	9	36		
1,74	9	36		
1,78	9	224		
1,81	9	36		
1,85	9	36		
1,89	9	224		
1,93	9	36		
1,97	9	36		
1,99	9	224		

**Тяговый расчет № 2.**  
**Результаты электрического расчета на зоне 0–0,5 км**

КОРТЭС - Тяговые расчеты. Отчет о поездке. 26.10.2021 14:08:44 Вариант 2

Файл участка: C:\Кортэс\Ехамр\Тест.pfk  
 Тип пути: бесстыковой  
 Состав: Груз. 71у.в.23,5  
 Поезд: 2, масса 6200 т, локомотив 2ЭС6 «Синара» Свержд  
 Расход энергии: 42,3 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;  
 Удельный расход: активн. 13,7 Вт·ч/т·км  
 Техническая скорость: 8,5 км/ч  
 Макс. ток поезда 836 А на км 0,00  
 Макс. перегрев обмоток двиг. 21° (доп. 160°) на км 0,50

П е р е г о н	Длина,		Время хода, мин		Расход энергии кВт·ч
	км	км	полн.	п.током	
0 км - 0,5 км	0,500		3,6	0,9	42,3

0,25		
14	6200	
L	V	Ia
0,00	0	836
0,02	2	836
0,06	7	836
0,10	10	356
0,14	9	36
0,17	9	36
0,21	9	276
0,25	9	36
0,29	9	36
0,33	9	276
0,36	9	36
0,40	9	116
0,44	10	196
0,48	9	36
0,50	9	276

Тяговый расчет № 2.  
Результаты электрического расчета на зоне 0–1 км

КОРТЭС - Тяговые расчеты. Отчет о поездке. 26.10.2021 14:08:44 Вариант 2

Файл участка: C:\Кортэс\Ехамр\Тест.pfk  
 Тип пути: бесстыковой  
 Состав: Груз. 71у.в.23,5  
 Поезд: 2, масса 6200 т, локомотив 2ЭС6 «Синара» СверЖД  
 Расход энергии: 60,1 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;  
 Удельный расход: активн. 9,7 Вт·ч/т·км  
 Техническая скорость: 8,8 км/ч  
 Макс. ток поезда 836 А на км 0,00  
 Макс. перегрев обмоток двиг. 23° (доп. 160°) на км 0,92

П е р е г о н	Длина, км	Время хода, полн. п.током	мин	Расход энергии кВт·ч	Оста- новки	Кратн. тяга
0 км - 1 км	1,000	6,8	1,2	60,1		

0,25		
27	6200	
L	V	Ia
0,00	0	836
0,02	2	836
0,06	7	836
0,10	10	356
0,14	9	36
0,17	9	36
0,21	9	276
0,25	9	36
0,29	9	36
0,33	9	276
0,36	9	36
0,40	9	116
0,44	10	196
0,48	9	36
0,52	9	276
0,56	9	36
0,59	9	36
0,63	9	276
0,67	9	36
0,71	9	36
0,75	9	276
0,78	9	36
0,82	9	36
0,86	10	276
0,90	9	36
0,94	9	196
0,98	10	116
1,00	9	36

Тяговый расчет № 2.  
Результаты электрического расчета на зоне 0–2 км

КОРТЭС - Тяговые расчеты. Отчет о поездке. 26.10.2021 14:10:31 Вариант 2

Файл участка: С:\КортЭС\Ехамр\Тест.pfk  
 Тип пути: бесстыковой  
 Состав: Груз. 71у.в.23,5  
 Поезд: 2, масса 6200 т, локомотив ЭЭС6 «Синара» СверЖД  
 Расход энергии: 101,8 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;  
 Удельный расход: активн. 8,2 Вт·ч/т·км  
 Техническая скорость: 9,0 км/ч  
 Макс. ток поезда 836 А на км 0,00  
 Макс. перегрев обмоток двиг. 25° (доп. 160°) на км 1,98

П е р е г о н	Длина, км	Время хода, мин полн.	п. током	Расход энергии кВт·ч
0 км - 2 км	2,000	13,3	1,9	101,8

0,25	6200	Тa
53	V	0
L	V	836
0,00	0	836
0,02	2	836
0,06	7	836
0,10	10	356
0,14	9	36
0,17	9	36
0,21	9	276
0,25	9	36
0,29	9	36
0,33	9	276
0,36	9	36
0,40	9	116
0,44	10	196
0,48	9	36
0,52	9	276
0,56	9	36
0,59	9	36
0,63	9	276
0,67	9	36
0,71	9	36
0,75	9	276
0,78	9	36
0,82	9	36
0,86	10	276
0,90	9	36
0,94	9	196
0,98	10	116
1,01	9	36
1,05	9	276
1,09	9	36
1,13	9	36
1,17	9	276
1,20	9	36
1,24	9	36
1,28	9	276
1,32	9	36
1,36	9	36
1,40	9	276
1,43	9	36
1,47	9	196
1,51	10	116
1,55	9	36
1,59	9	276
1,62	9	36
1,66	9	36
1,70	9	276
1,74	9	36
1,78	9	36
1,82	9	276
1,85	9	36
1,89	9	116
1,93	10	196
1,97	9	36
1,99	9	276



**Тяговый расчет № 3.**  
**Результаты электрического расчета на зоне 0–0,5 км**

КОРТЭС - Тяговые расчеты. Отчет о поездке. 26.10.2021 14:12:22 Вариант 5

Файл участка: C:\Кортэс\Ехамр\Тест.pfk

Тип пути: бесстыковой

Состав: Груз. 71у.в.23,5

Поезд: 3, масса 6200 т, локомотив 2ЭС6 «Синара»

Расход энергии: 33,3 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;

Удельный расход: активн. 10,7 Вт·ч/т·км

Техническая скорость: 8,6 км/ч

Макс. ток поезда 791 А на км 0,00

Макс. перегрев обмоток двиг. 23° (доп. 160°) на км 0,50

П е р е г о н	Длина, км	Время хода, мин полн.	п. током	Расход энергии кВт·ч
0 км - 0,5 км	0,500	3,5	3,5	33,3

0,25

13

6200

L	V	Ia
0,00	0	791
0,02	3	750
0,06	7	685
0,10	10	227
0,14	10	90
0,18	9	90
0,22	9	90
0,26	9	91
0,29	9	91
0,33	9	91
0,37	9	91
0,41	9	91
0,45	9	92
0,49	9	92

Тяговый расчет № 3.  
Результаты электрического расчета на зоне 0–1 км

Файл участка: C:\Кортэс\Ехамр\Тест.pfk

Тип пути: бесстыковой

Состав: Груз. 71у.в.23,5

Поезд: 3, масса 6200 т, локомотив 2ЭС6 «Синара»

Расход энергии: 48,7 кВт·ч; рекуперация 0,0 кВт·ч;

Удельный расход: активн. 7,8 Вт·ч/т·км

Техническая скорость: 8,8 км/ч

Макс. ток поезда 791 А на км 0,00

Макс. перегрев обмоток двиг. 26° (доп. 160°) на км 1,00

П е р е г о н	Длина, км	Время хода, мин		Расход энергии
		полн.	п. током	кВт·ч
0 км - 1 км	1,000	6,8	6,8	48,7

0,25

27

6200

L	V	Iа
0,00	0	791
0,02	3	750
0,06	7	685
0,10	10	227
0,14	10	90
0,18	9	90
0,22	9	90
0,26	9	91
0,29	9	91
0,33	9	91
0,37	9	91
0,41	9	91
0,45	9	92
0,49	9	92
0,52	9	92
0,56	9	92
0,60	9	92
0,64	9	92
0,67	9	92
0,71	9	92
0,75	9	93
0,79	9	93
0,82	9	93
0,86	9	93
0,90	9	93
0,94	9	93
0,97	9	93
1,00	9	93



**Трехфазный электроподвижной состав  
(часть серий электровозов эксплуатационного парка до 1976 года)**

Электровозы серий Е.431.015 и Е.333.036



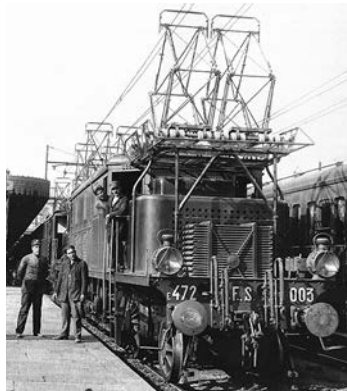
Электровоз серии Е.554.024



Электровоз серии Е.472.003



Электровоз серии Е.554.130

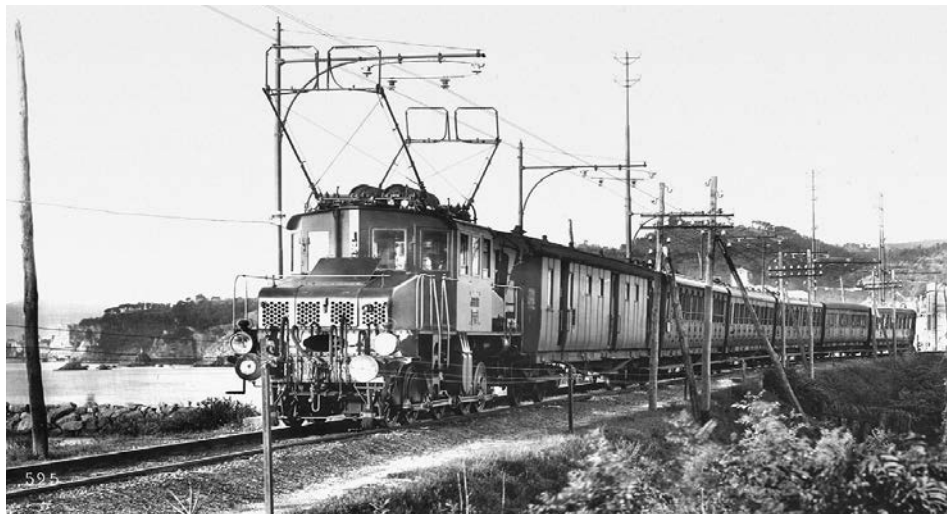


Электровоз серии Е.550.050

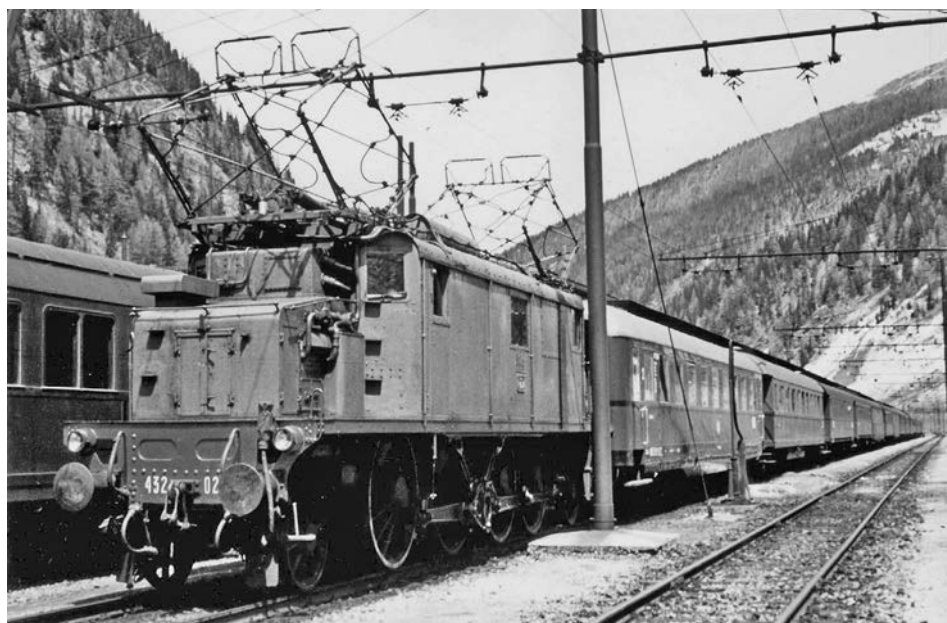


Трехфазные системы электрической тяги в Италии, 1902–1976

E.550.050 «Giovimaulesel»



E.432.021



Трехфазный Wechselstromlokom E.432.004 18 ноября 1975 в Piana Crixia



E.432.009 10 мая 1976 года в Cantalupo



Два изображения из последних дней операции три фазы:  
вершина была abgebügelte Gleichstromlok E.626.428 вместе с Drehstromloks E.554.150  
и E.432.018 идет в Cantalupo с пассажирским поездом



В предпоследний день использования (05.24.1976) заняла E.554.174  
на промышленном сайдинга в Сеццадио к югу от Алессандрии





*Научное издание*

**Трехфазная система электрической тяги**

**Аржанников Борис Алексеевич**

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ  
ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ**

Монография

Редактор *С. И. Семухина*

Верстка — *А. В. Трубин*

Подписано в печать 04.06.2023.  
Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 21,3.  
Тираж 300 экз. (1-й з-д 1–50). Заказ 17188.

УрГУПС  
620034, Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66

Отпечатано в ООО Универсальная Типография «Альфа Принт»  
620049, г. Екатеринбург, переулок Автоматики, 2ж  
Тел.: 8 (800) 300-16-00  
[www.alfaprint24.ru](http://www.alfaprint24.ru)