

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Состояние электрификации железных дорог	6
2. Основные направления совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог	6
3. Системы электрической тяги железных дорог РФ и зарубежных стран	7
4. Основные пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог постоянного тока	12
4.1. Увеличение напряжения в тяговой сети до 6 – 12 (24) кВ.	12
4.2. Полная замена шестипульсовых выпрямителей выпрямителями с двенадцатью и двадцатью четырьмя пульсациями в кривой выпрямленного напряжения.	15
4.3. Разработка и выпуск выпрямителей с оптимальной шкалой номинальных мощностей.	15
4.4. Расширение сферы рекуперативного торможения и эксплуатационное освоение двенадцати и двадцатичетырехпульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей.	16
4.5. Усиление системы электроснабжения действующих участков электрических железных дорог постоянного тока.	17
4.6. Обоснованный перевод непротяженных участков электрических железных дорог постоянного тока на переменный.	17
4.7. Эксплуатационное освоение эффективных схем сглаживающих фильтров тяговых подстанций постоянного тока.	18
5. Основные пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог переменного тока	20
5.1. Замена трехфазных трехобмоточных трансформаторов тяговых подстанций специальными трехфазно-двухфазными.	20
5.2. Специальные трехфазно-двухфазные трансформаторы.	22
5.3. Компенсация реактивной мощности и улучшение показателей качества электрической энергии.	27

5.4.	Снижение электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на смежные устройства и повышение технико-экономической эффективности системы электроснабжения.	27
5.4.1.	Система электроснабжения с отсасывающими трансформаторами	28
5.4.2.	Автотрансформаторная система электроснабжения напряжением 2×25 кВ.	29
5.4.3.	Многопроводная система электроснабжения с экранированным и усиливающим проводами	31
5.4.4.	Система электроснабжения с коаксиальным кабелем.	32
5.5.	Снижение транзита мощности по тяговой сети переменного тока	33
6.	Повышение надежности и экономичности токосъема	33
6.1.	Совершенствование контактных подвесок	34
6.2.	Совершенствование токоприемников.	37
7.	Направленность научно-исследовательских работ в области совершенствования систем электрической тяги.	39
	Библиографический список.	46

ВВЕДЕНИЕ

Электрификация железных дорог является основой их коренной реконструкции и позволяет решить многие существующие проблемы транспорта – повысить провозную и пропускную способность, обеспечить более надежную и экономичную работу, улучшить условия труда, а следовательно, способствует ускорению технического прогресса во всем народном хозяйстве, влияет на освоение новых районов.

Опыт эксплуатации электрических железных дорог показывает, что электрическая тяга имеет неоспоримые достоинства и позволяет осуществлять перевозки электрическим железнодорожным транспортом по современным технологическим процессам.

В 1880 г. известный изобретатель Ф. Пироцкий выступил с проектом электрической железной дороги, построил и испытал в Санкт-Петербурге трамвайный вагон с подвесным электродвигателем. Результаты испытаний наглядно показали достоинства электрического транспорта и возможность его широкого использования.

Фундаментальные исследования электрической тяги на российских железных дорогах в начале XX в. выполнили А. В. Вульф, Г. О. Графтио, А. Б. Лебедев, Г. К. Мерчинг, М. А. Шателен, В. А. Шевалин, а в более позднее время – А. Е. Алексеев, И. И. Власов, И. П. Исаев, Н. Н. Кострамитин, А. С. Курбасов, В. Б. Медель, К. Г. Марквардт, Р. И. Мирошниченко, М. А. Петров, В. Е. Розенфельд, Н. Д. Сухопрудский, Б. Н. Тихменев и др. Большой вклад в развитие систем электроснабжения электрических железных дорог внесли современные отечественные ученые доктора наук, профессора Б. А. Аржанников, А. Т. Бурков, А. С. Бочев, М. П. Бодер, В. А. Вологин, Л. А. Герман, А. Т. Демченко, Б. Е. Дынькин, Ю. И. Жарков, А. В. Котельников, В. П. Михеев, Р. Р. Мамошин, В. Я. Овласюк, В. Н. Пупынин, Е. П. Фигурнов и др.

Развитие железнодорожного транспорта, рост скоростей движения обуславливают непрерывное совершенствование устройств электрической тяги. Поэтому в данных методических указаниях наряду с вопросами электрификации железных дорог большое внимание уделяется рассмотрению возможных путей совершенствования систем электроснабжения и направленности научно-исследовательских работ.

1. СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

В развитых странах мира, в том числе и в РФ, основным видом транспорта являются железные дороги.

Общая протяженность железных дорог стран мира в настоящее время составляет 1455 тыс. км, из них электрических железных дорог – 210 тыс. км, на которые приходится более 50 % общего грузооборота.

Эксплуатационная длина электрифицированных железных дорог РФ на 1 января 2000 г. составила 40,3 тыс. км, в том числе электрифицированных железных дорог переменного тока напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц – 21,5 тыс. км. Удельный вес электрифицированных железных дорог от общей протяженности железных дорог РФ – 46,9 %. Удельный вес объема перевозок на электрической тяге – 77,7 %.

Потребление электрической энергии железнодорожным транспортом РФ в 1999 г. составило 30,9 млрд кВт·ч, в том числе на электрическую тягу – 24,7 млрд кВт·ч.

Средняя грузонапряженность железнодорожных линий при электрической тяге – 23,1 (нетто) млн т·км/км, при тепловозной – 5,7.

Удельный расход условного топлива (у. т.) при электрической тяге – 38,2 кг у. т. на 10000 т·км брутто, при тепловозной – 63,8.

Средняя участковая скорость на электрической тяге – 40,7 км/ч, на тепловозной – 33,2.

Средний вес грузового поезда на электрической тяге – 3485 т брутто, на тепловозной – 2937.

Количество дистанций электроснабжения на всей протяженности железных дорог РФ – 164, районов контактной сети – 968, тяговых подстанций – 1356, в том числе переменного тока – 403.

2. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Характерной особенностью электрической тяги является возможность постоянного совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог путем внедрения новейших достижений науки и техники. При этом технические решения

осуществляются как при вводе новых электрифицированных участков железных дорог, так и в порядке модернизации устройств, находящихся в эксплуатации. Так, например, замена ртутных выпрямителей полупроводниковыми на действующих тяговых подстанциях была осуществлена за 3,5 года и позволила помимо резкого повышения надежности устройств электроснабжения снизить расход электрической энергии на собственные нужды подстанций на 150 – 180 млн кВт·ч в год.

Накопленный опыт проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрических железных дорог позволил выделить основные пути их совершенствования:

1) повышение экономичности и надежности устройств систем электроснабжения электрических железных дорог;

2) разработка и внедрение новых методов эксплуатационной деятельности электрических железных дорог;

3) комплексная автоматизация и телемеханизация устройств электроснабжения с применением вычислительной техники;

4) научно обоснованная постановка и решение перспективных задач (разработка новых систем электрической тяги и систем электроснабжения, создание прогрессивных образцов новой техники и др.).

Возможности совершенствования электрической тяги еще не исчерпаны. Активная работа в этом направлении позволит повысить ее технико-экономические показатели.

3. СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РФ И ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН

Система электрической тяги определяется родом тока и значением напряжения в тяговой сети, разновидность которой зависит от причин исторического характера и местных условий. К основным системам электрической тяги железных дорог РФ и зарубежных стран относят системы электрической тяги постоянного тока напряжением 1,5 и 3 кВ, переменного тока напряжением 25 и 50 кВ, частотой 50 и 60 Гц и переменного тока напряжением 11 – 15 кВ, частотой $16\frac{2}{3}$ и 25 Гц.

Система электрической тяги постоянного тока напряжением 1,5 кВ применялась и применяется в настоящее время в Германии, Франции, Англии, Голландии, Японии и других странах; напряжением 3 кВ – на территории бывшего Советского Союза, в Польше, Италии,

бывшей Чехословакии, Румынии, Болгарии и других странах. Общая протяженность систем электрической тяги постоянного тока в мире составляет 99075 км или 47 %.

Система электрической тяги переменного тока напряжением 25 кВ, частотой 50 – 60 Гц применялась и применяется в настоящее время на территории бывшего Советского Союза, в Англии, Венгрии, Румынии, бывшей Чехословакии и других странах, а напряжением 50 кВ – в ЮАР, США, Канаде. Общая протяженность систем электрической тяги переменного тока напряжением 25 и 50 кВ, частотой 50 – 60 Гц в мире составляет 78100 км или 36 %.

Система электрической тяги переменного тока частотой $16\frac{2}{3}$ Гц применяется в Германии, Франции, Швеции, Австрии, Швейцарии и других странах, а частотой 25 Гц – в США. Общая протяженность систем электрической тяги переменного тока напряжением 11 – 15 кВ, частотой $16\frac{2}{3}$ и 25 Гц в мире составляет 33600 км или 16 %.

В РФ применяется система электрической тяги постоянного тока напряжением 3 кВ и система электрической тяги переменного тока напряжением 25 кВ, 2×25 кВ, частотой 50 Гц.

Первый перевод железных дорог на электрическую тягу на территории бывшего Советского Союза был осуществлен в 1926 г. (участок «Баку – Сабунчи» Закавказской железной дороги) на постоянном токе напряжением 1,2 кВ. В последующие годы при электрификации железных дорог на постоянном токе было принято напряжение в контактной сети равным 3 кВ.

Последующий многолетний опыт проектирования и эксплуатации электрических железных дорог постоянного тока позволил оценить преимущества и недостатки этой системы электрической тяги.

Одним из основных элементов электрической железной дороги является система тягового электроснабжения, представляющая собой комплекс устройств, предназначенных для получения напряжения, подаваемого в тяговую сеть.

К существенным недостаткам системы электроснабжения электрических железных дорог постоянного тока относятся:

1) большие токовые нагрузки вследствие низкого напряжения в тяговой сети (3 кВ), а в системе тягового электроснабжения – большие потери электроэнергии (полный коэффициент полезного действия (КПД) системы электрической тяги постоянного тока – 22 %, а системы электрической тяги переменного тока – 26 %);

2) при больших токовых нагрузках расстояние между тяговыми подстанциями мало (менее 20 км), что определяет высокую стоимость системы электроснабжения и большие эксплуатационные расходы;

3) большие токовые нагрузки и необходимость использования подвески контактной сети большого сечения, что определяет значительный расход дефицитных цветных электротехнических материалов, а также возрастание механических нагрузок на опоры контактной сети;

4) в системе электрической тяги постоянного тока большие потери электрической энергии в пусковых реостатах электровозов при разгоне (при пригородном движении они составляют примерно 12 % от общего расхода электрической энергии на тягу поездов);

5) при электрической тяге постоянного тока интенсивная коррозия подземных металлических сооружений, в том числе и опор контактной сети;

6) повышенный износ контактных проводов и накладок токоприемников электровозов.

Примечание. Применявшиеся до последнего времени на тяговых подстанциях шестипульсовые выпрямители имели низкий коэффициент мощности (0,88 – 0,92) и вследствие несинусоидальности кривой потребляемого тока являлись причиной ухудшения показателей качества электрической энергии (особенно на шинах 10 кВ).

Система электрической тяги переменного тока позволяет устранить многие недостатки системы электрической тяги постоянного тока. Однако при наличии многих положительных качеств указанная система обладает некоторыми специфическими особенностями, которые на современном этапе развития электроэнергетики снижают ее технико-экономическую эффективность:

1) несимметричный режим работы трехфазных трансформаторов (на двухплечую нагрузку) и, как следствие, ухудшение показателей качества электрической энергии и значительное снижение их располагаемой мощности. Под располагаемой мощностью трансформатора, работающего в несимметричном режиме, понимается мощность, соответствующая току прямой последовательности при такой нагрузке, когда ток в одной из фаз трансформатора принимает значение номинального (у трансформаторов со схемой соединения обмоток « $Y/\Delta/Y$ » несимметрия системы потребляемых токов $\alpha_1 = 0,5 - 1,0$ и располагаемая мощность $S_{расп} = (0,5 - 0,76) S_{ном}$;

2) несинусоидальность системы потребляемых токов и ухудшение качества электрической энергии в питающей системе электроснабжения (в кривой потребляемого тока

электровозов при установленной на них двухпульсовой выпрямительной установке содержатся нечетные гармоники 1, 3, 5, 7, ... с большим численным значением);

3) низкий коэффициент мощности электровозов переменного тока;

4) тяговая сеть переменного тока является значительным источником электромагнитного влияния на смежные устройства, в том числе и на линии связи, что определяет необходимость применения специальных мер, направленных на снижение электромагнитного влияния;

5) наличие при двухсторонней схеме питания тяговой сети переменного тока уравнивающих токов, а следовательно, и дополнительных больших потерь электрической энергии, которые оцениваются примерно в $(400 - 500) \cdot 10^3$ кВт·ч в год на одной межподстанционной зоне.

Возможность использования в качестве тяговых двигателей коллекторных электродвигателей переменного тока и, следовательно, регулирования напряжения, подводимого к тяговому электродвигателю, изменением коэффициента трансформации трансформатора, а также возможность повышения напряжения в контактной сети (до 11 – 16 кВ) и увеличения расстояния между тяговыми подстанциями побудили специалистов некоторых стран применить систему электрической тяги переменного тока пониженной частоты $16\frac{2}{3}$ и 25 Гц.

Однако и этой системе электрической тяги присущи следующие недостатки:

1) низкий коэффициент мощности коллекторного электродвигателя – 0,8 – 0,88, а при трогании с места – 0,3 – 0,4;

2) значительное влияние тяговой сети на смежные устройства;

3) трудность питания нетяговых потребителей электрической энергией (в условиях РФ основные нетяговые потребители электрической энергии питаются переменным током частотой 50 Гц);

4) сложность применения системы рекуперативного торможения.

Из изложенного следует, что получившие распространение в развитых странах мира системы электрической тяги имеют недостатки.

В Российской Федерации в настоящее время на железных дорогах сложились следующие условия эксплуатации электрифицированных участков:

1) наиболее грузонапряженные, сложные и ответственные участки железных дорог оказались электрифицированными на постоянном токе. При этом на участках, эксплуатируемых сорок лет и более, износ устройств электроснабжения превышает 50 %, поэтому необходима их реконструкция;

2) происходящая научно-техническая революция, в том числе и перевод железных дорог на электрическую тягу, породила серьезную проблему обеспечения электромагнитной совместимости смежных устройств (э л е к т р о м а г н и т н а я с о в м е с т и м о с т ь – это способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам).

В связи с вышесказанным в составе международной электротехнической комиссии (МЭК) создан технический комитет № 77 – «Электромагнитная совместимость электрооборудования, включая электрические сети». В РФ определена необходимость государственного регулирования вопросов обеспечения электромагнитной совместимости смежных устройств. В 1996 г. подготовлен проект федерального закона об электромагнитной совместимости, введение которого планировалось с 1 января 2000 г.

Вышеизложенное позволяет сделать следующие выводы о выборе системы электрической тяги для условий Российской Федерации:

1) система электрической тяги постоянного тока напряжением 3 кВ на вновь электрифицируемых участках железных дорог из технико-экономических соображений неприменима (практически после 1960 г. электрификация железных дорог в бывшем СССР осуществлялась в основном на переменном токе, постоянный ток применялся в соответствии с особыми технико-экономическими соображениями);

2) неприменима для условий РФ система электрической тяги переменного тока пониженной частоты (применение этой системы электрической тяги потребует разработки и производства новых типов электровозов, а также их эксплуатационного освоения);

3) перспективной системой электрической тяги следует считать систему электрической тяги переменного тока частотой 50 Гц при устранении существенных недостатков, присущих ей.

4. ОСНОВНЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Перевод протяженных участков электрифицированных железных дорог постоянного тока на переменный признано считать, как правило, нецелесообразным, так как это связано с большими капитальными затратами. Поэтому повышение технико-экономических показателей действующих участков электрических железных дорог постоянного тока может быть осуществлено при проведении технических и организационных мероприятий. Рассмотрим некоторые из них.

4.1. Увеличение напряжения в тяговой сети до 6 – 12 (24) кВ

В бывшем СССР были проведены работы по эксплуатационному освоению системы электроснабжения постоянного тока двойного напряжения 6/3 кВ (система Т. П. Третьяка). Однако эта система (рис. 1) широкого распространения не получила из-за низкой надежности работы промежуточных преобразовательных пунктов (ППП), устанавливаемых в межподстанционной зоне без обслуживающего персонала.

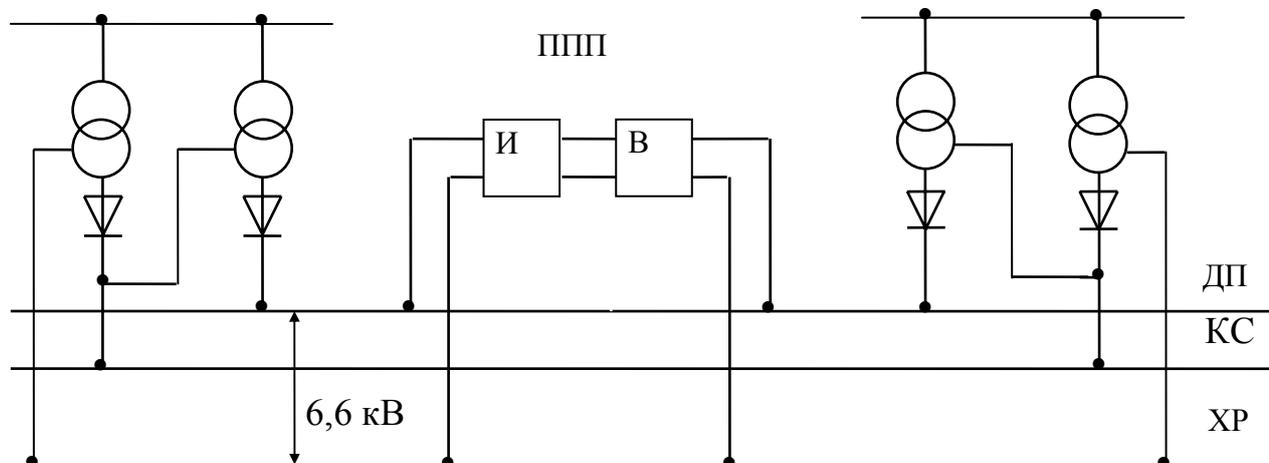


Рис. 1. Система тягового электроснабжения двойного питания: ППП – промежуточный преобразовательный пункт; И – инвертор; В – выпрямитель; ДП – дополнительный провод; КС – контактная сеть; ХР – ходовой рельс

Напряжение 6,6 кВ постоянного тока может быть получено либо за счет последовательного соединения двух выпрямителей, либо за счет установки специального выпрямителя напряжением 6,6 кВ.

В МГУПСе (МИИТе) и ПГУПСе (ЛИИЖТе) ведутся работы по созданию системы электроснабжения постоянного тока напряжением 12 – 24 кВ. В этой системе предусматривается применение управляемых выпрямителей на тяговых подстанциях и одноагрегатных автоматических пунктах питания.

При применении электровозов с коллекторными тяговыми электродвигателями постоянного тока при напряжении в тяговой сети 6 – 12 (24) кВ принципиальная схема силовой цепи «тяговая сеть – электровоз» представлена на рис. 2.

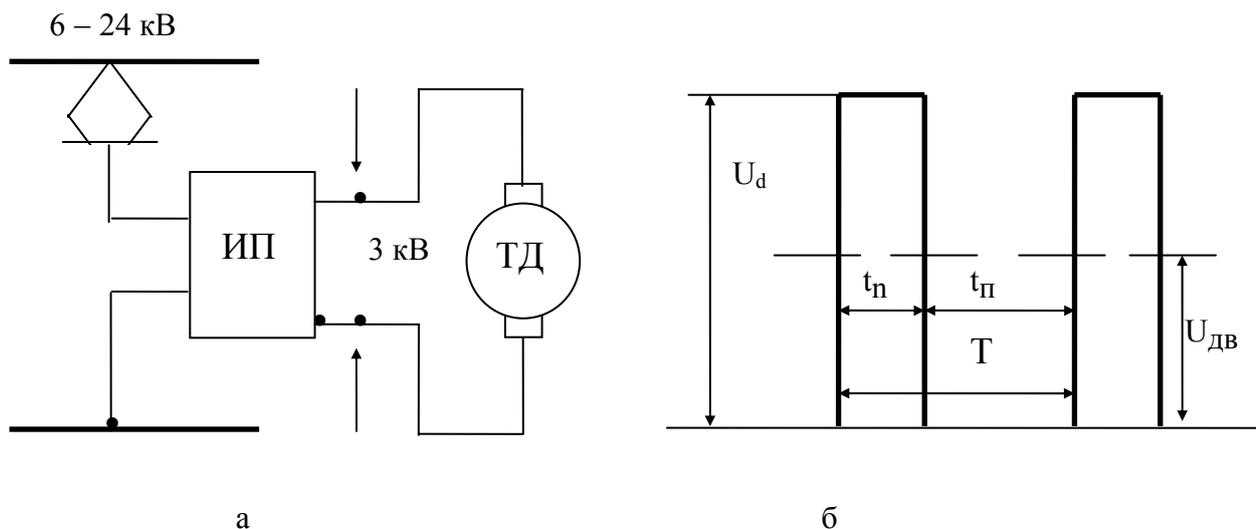


Рис. 2. Питание электровоза с коллекторными тяговыми двигателями постоянного тока при напряжении 6 – 12 (24) кВ: а – схема силовой цепи; ИП – импульсный преобразователь; ТД – тяговый двигатель; б – распределение напряжений

Импульсный преобразователь (ИП) уменьшает напряжение 6 – 24 кВ до 3 кВ, при котором осуществляется питание тяговых электродвигателей электровоза (мотор-вагонной секции).

При электровозах, оборудованных трехфазными электродвигателями переменного тока, схема силовой цепи «тяговая сеть – электровоз» имеет вид, представленный на рис. 3. Инвертор (И) преобразует постоянное напряжение в трехфазное переменное для питания асинхронных электродвигателей электровоза.

В 60-е г. МЭИ совместно с Тбилисским электровозостроительным заводом был разработан и построен электровоз для постоянного тока напряжением 6 кВ. Испытания его проводились в 1970 – 1974 гг., результаты которых подтвердили работоспособность электровоза.

Вместе с тем были выявлены и недостатки электровоза, к числу которых относятся громоздкость и большая масса преобразователя, низкий КПД преобразователя, влияние тяговой сети на работу смежных устройств. Однако при современной элементной базе и микропроцессорной технике эти недостатки устранимы и систему с инвертором следует рассматривать как перспективную.

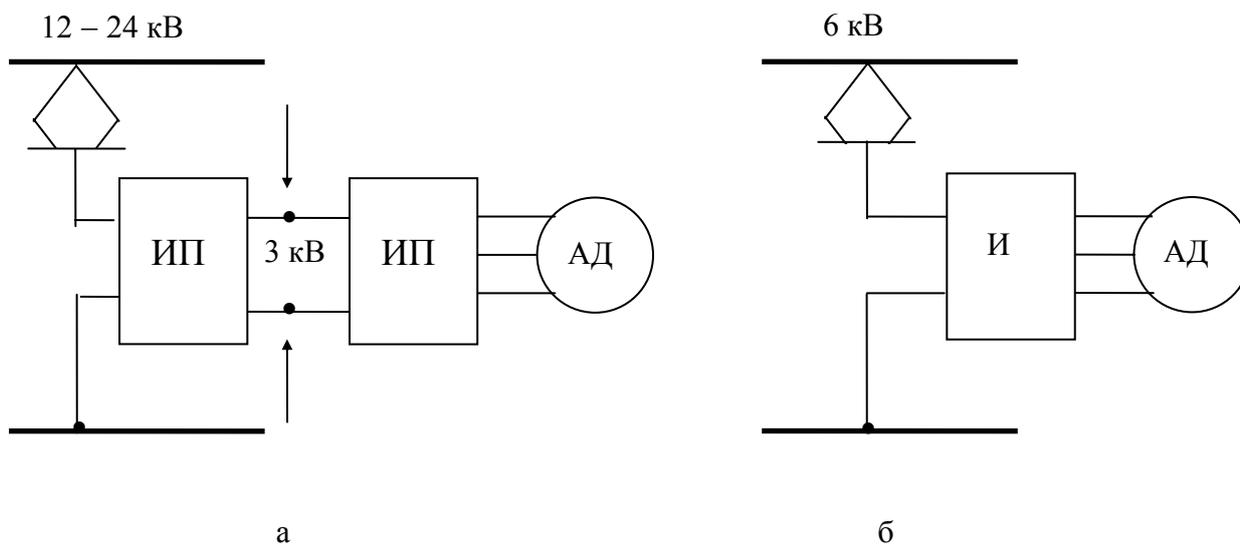


Рис. 3. Питание электровоза с трехфазными двигателями переменного тока: а – схема силовой цепи с импульсным преобразователем; ИП – импульсный преобразователь; АД – асинхронный двигатель; б – схема силовой цепи с инвертором; И – инвертор

Известно, что научно-исследовательский институт при управлении железных дорог ФРГ по заказу Ассоциации железных дорог США проработал оптимальный вариант электрификации основных железнодорожных линий в США (примерно 45 тыс. км). Рассматривались две системы – переменного тока 2×25 кВ, частотой 60 Гц и постоянного 50 кВ. При этом расстояние между подстанциями – 120 ÷ 150 км. Предполагается установка на электровозе импульсного преобразователя с гальванической развязкой входных и выходных цепей. Питание асинхронных тяговых двигателей осуществляется автономным инвертором с широтно-импульсной модуляцией.

4.2. Полная замена шестипульсовых выпрямителей выпрямителями с двенадцатью и двадцатью четырьмя пульсациями в кривой выпрямленного напряжения

Надежность и экономичность работы тяговых подстанций во многом определяются типом принятого выпрямителя. При электрификации железных дорог в бывшем Советском Союзе и РФ на тяговых подстанциях применялись и применяются выпрямители, включенные по так называемым шестипульсовым схемам, имеющим существенные недостатки. Технико-экономические показатели таких выпрямителей могут быть существенно повышены переводом выпрямителей на двенадцати- и двадцатичетырехпульсовые схемы выпрямления, преимущества которых заключаются в следующем:

- 1) более пологая внешняя характеристика и, следовательно, стабильность напряжения на шинах тяговой подстанции, и отсутствие необходимости его регулирования;
- 2) снижение потребления реактивной мощности до значений, не требующих установки устройств для ее компенсации;
- 3) улучшение формы кривой выпрямленного напряжения, снижение электромагнитного влияния на смежные устройства и, следовательно, возможность применения на тяговых подстанциях экономичных однозвенных апериодических или резонансно-апериодических сглаживающих фильтров;
- 4) улучшение формы кривой потребляемого выпрямителем тока и улучшение показателей качества электрической энергии в системе внешнего электроснабжения и на шинах 10 кВ тяговой подстанции.

В настоящее время заводами-изготовителями освоен выпуск только двенадцатипульсовых выпрямителей, число которых на железных дорогах составляет 27 %.

4.3. Разработка и выпуск выпрямителей с оптимальной шкалой номинальных мощностей

Обстоятельства сложились так, что для тяговых подстанций постоянного тока серийно выпускается один тип выпрямителя с номинальным током 3150 А и номинальной мощностью 11,4 МВ·А. Заметим, что за рубежом используемые номинальные мощности преобразователей тяговых подстанций магистральных электрических железных дорог зачастую значительно меньше отечественных. Например, на высокоскоростных магистралях Испании номинальная мощность преобразователей принята равной 3 и 6 МВ·А. Одним из основных показателей загруженности тяговых подстанций является коэффициент

использования установленной мощности выпрямителей, представляющий собой отношение средней потребляемой за сутки мощности к установленной с учетом резервной. По данным МПС РФ средний коэффициент использования установленной мощности выпрямителей в 1991 г. по сети дорог был равен 0,12. Практически все выпрямители были загружены не более чем на 30 %. При этом следует иметь в виду, что в выпрямительных агрегатах потери распределяются примерно следующим образом: 70 % – потери в трансформаторах; 30 % – потери в вентилях и вспомогательных цепях.

Повышение технико-экономической эффективности тяговых подстанций постоянного тока может быть достигнуто лишь путем выбора их рациональной мощности и количества выпрямителей. Для этого необходим пересмотр стандарта номинальных мощностей выпрямителей, выпускаемых заводами-изготовителями для электрических железных дорог.

4.4. Расширение сферы рекуперативного торможения и эксплуатационное освоение двенадцати- и двадцатичетырехпульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей

Одно из преимуществ электрической тяги по сравнению с тепловозной тягой – это возможность применения системы рекуперативного торможения. Рекуперативное торможение позволяет увеличить скорость движения поездов (на спусках), снизить расход электрической энергии (по данным ВНИИЖТа освоение рекуперативного торможения и применение его на всем полигоне электрических железных дорог бывшего Советского Союза позволило бы экономить около 5 % электрической энергии, потребляемой на тягу поездов) и уменьшить износ тормозных колодок.

Применение системы рекуперативного торможения требует установки на тяговых подстанциях инверторов. Практически на тяговых подстанциях при наличии избыточной энергии рекуперации должны устанавливаться универсальные преобразователи, которые должны работать при необходимости как в выпрямительном, так и в инверторном режиме.

В связи с тем, что в настоящее время начался процесс замены на тяговых подстанциях шестипульсовых выпрямителей двенадцатипульсовыми, необходима разработка и серийный выпуск универсальных двенадцатипульсовых выпрямительно-инверторных преобразователей.

Эффективное восприятие энергии рекуперации поездами, следующими в режиме тяги, может достигаться оптимизацией уровней напряжения на шинах тяговых подстанций.

4.5. Усиление системы электроснабжения действующих участков электрических железных дорог постоянного тока

На участках электрических железных дорог постоянного тока, эксплуатируемых в течение ряда десятилетий, возникает необходимость их модернизации и усиления.

Научно-исследовательскими организациями МПС и работниками железных дорог выполняется определенная научно-исследовательская работа по усилению устройств тягового электроснабжения по следующим основным направлениям: применение различных вариантов вольтодобавочных устройств; системы электроснабжения двойного напряжения тяговой сети 6/3 кВ; строительство одноагрегатных автотелеуправляемых тяговых подстанций и освоение, тем самым, децентрализованной системы электроснабжения.

4.6. Обоснованный перевод непротяженных участков электрических железных дорог постоянного тока на переменный

Система электрической тяги переменного тока напряжением 25 кВ и частотой 50 Гц появилась в бывшем СССР во второй половине 50-х гг. При этом создалась парадоксальная ситуация, когда наиболее грузонапряженные и ответственные участки железных дорог оказались электрифицированными на постоянном токе, поскольку переводились на электрическую тягу в первую очередь, в годы, когда системы переменного тока еще не было. В связи с этим на некоторых железных дорогах бывшего СССР, а теперь и РФ оказались участки железных дорог, работающие на разных системах электрической тяги. Вместе с тем в связи с ростом размеров движения и весовых норм поездов недостатки системы электрической тяги постоянного тока напряжением 3 кВ выявились со все большей очевидностью. В настоящее время актуален вопрос о переводе непротяженных участков электрических железных дорог с постоянного тока на переменный.

В 1996 г. впервые в РФ на Восточно-Сибирской железной дороге был осуществлен перевод участка электрической железной дороги постоянного тока «Зима – Слюдянка» протяженностью 434 км на переменный ток.

Важные технико-экономические преимущества этого перевода:

1) уменьшение в 2,5 раза числа тяговых подстанций (14 тяговых подстанций переменного тока вместо 35 постоянного тока);

- 2) ликвидация двух станций стыкования;
- 3) снижение потерь электрической энергии в тяговой сети;
- 4) снижение эксплуатационных расходов;
- 5) уменьшение локомотивного парка при тех же размерах движения;
- 6) снижение коррозии блуждающими токами опор контактной сети и всех металлических сооружений.

Высокая технико-экономическая эффективность перевода непротяженных участков (вставок) постоянного тока на переменный подтверждает целесообразность продолжения этих работ на других железных дорогах РФ.

4.7. Эксплуатационное освоение эффективных схем сглаживающих фильтров тяговых подстанций постоянного тока

В связи с ухудшением качества питающего напряжения на тяговых подстанциях, особенно на стыковых участках, в последние годы широко применяются сглаживающие фильтры (СФ), получившие название двухзвенной схемы Западно-Сибирской железной дороги и двухзвенной схемы ВНИИЖТа, которые приведены соответственно на рис. 4 и 5, где ПФ – питающий фидер; ОФ – отсасывающий фидер; C_i – емкость параллельной ветви; L_j – индуктивность в параллельной ветви; L_{p1} , L_{p2} – индуктивности в последовательной ветви СФ; $L_{ш}$, $C_{ш}$ – индуктивность и емкость фильтра-пробки.

Надежность и экономичность работы тяговых подстанций постоянного тока определяются типом принятого выпрямителя. Эффективной мерой повышения технико-экономических показателей системы электрической тяги постоянного тока явилось, как уже было отмечено, применение на тяговых подстанциях постоянного тока двенадцатипульсовых выпрямителей.

К важным преимуществам однозвенных апериодических и резонансно-апериодических СФ относятся:

- 1) снижение потерь электрической энергии по сравнению со схемами двухзвенных СФ;

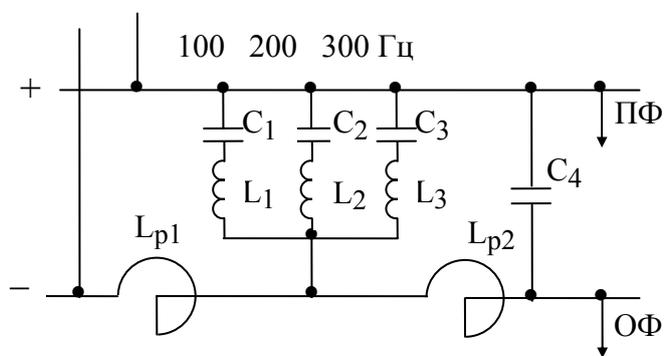


Рис. 4. Двухзвенная схема сглаживающего фильтра Западно-Сибирской железной дороги

- 2) отсутствие необходимости периодической настройки резонансных контуров в однозвенном апериодическом СФ;
- 3) облегчение условий работы конденсаторов;
- 4) выполнение батарей конденсаторов функций разрядника для волн перенапряжений, набегающих с контактной сети.

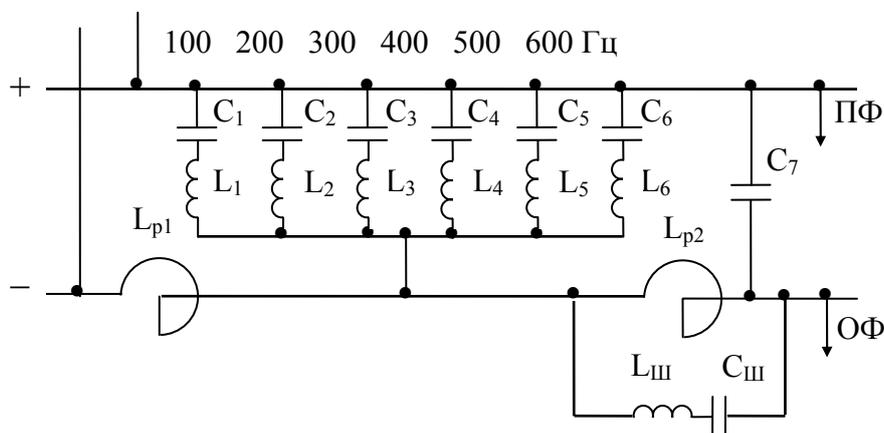


Рис. 5. Двухзвенная схема сглаживающего фильтра ВНИИЖТа

Эксплуатационное освоение двенадцати- и двадцатичетырехпульсовых выпрямителей определило возможность перехода на однозвенные апериодические и резонансно-апериодические СФ, схемы которых приведены соответственно на рис. 6 и 7, где ПФ – питающий фидер; ОФ – отсасывающий фидер; L_p – индуктивность последовательной ветви; L_{p1} – индуктивность резонансного контура; C_i – емкость параллельной ветви СФ.

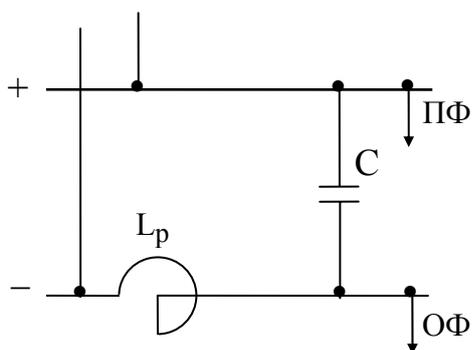


Рис. 6. Схема однозвенного апериодического сглаживающего фильтра

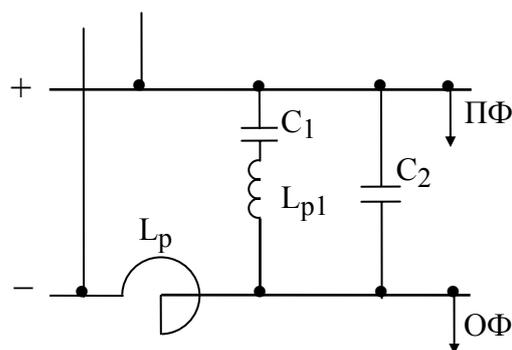


Рис. 7. Схема резонансно-апериодического сглаживающего фильтра

При применении на тяговых подстанциях двенадцати- и двадцатичетырехпульсовых выпрямителей с однозвенными апериодическими и резонансно-апериодическими сглаживающими фильтрами обеспечиваются нормальное функционирование линий связи и

устройств автоблокировки, снижение потерь электрической энергии и экономия дефицитных электротехнических материалов (медь, алюминий, конденсаторы).

Широкое использование кабельных волоконно-оптических линий связи, рельсовых цепей автоблокировки на тональных частотах обуславливает возможности дальнейшего упрощения СФ.

5. ОСНОВНЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Замена трехфазных трехобмоточных трансформаторов тяговых подстанций специальными трехфазно-двухфазными

При электрификации железных дорог в бывшем СССР, а затем и в РФ на переменном токе напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц был принят в основном вариант установки на тяговых подстанциях трехфазных трехобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмоток « $Y/\Delta/Y(\Delta)$ » (рис. 8).

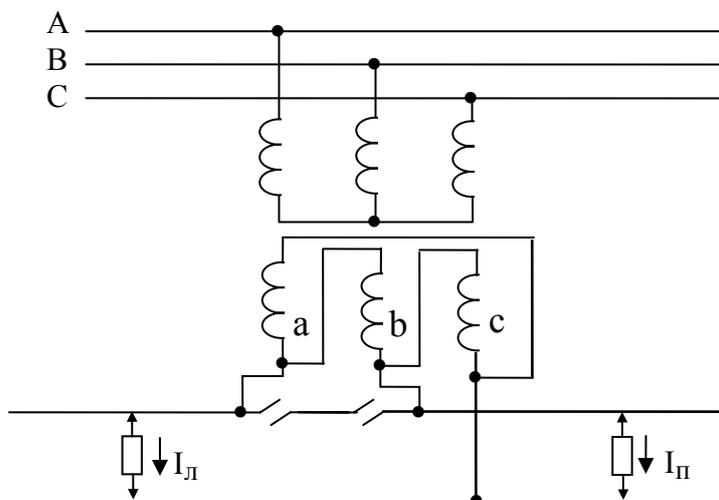


Рис. 8. Питание тяговой сети однофазного тока от трехфазного трехобмоточного трансформатора со схемой соединения обмоток « $Y/\Delta/Y$ »: $I_{л}$, $I_{п}$ – токи нагрузки левого и правого плеч питания тяговой нагрузки

При установке таких трансформаторов от трехфазной высоковольтной питающей линии осуществляется питание двухфазной нагрузки и, как следствие, система потребляемых токов трансформатором будет несимметричной.

Коэффициент несимметрии системы потребляемых токов определяется по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{\sqrt{1 - k + k^2}}{1 + k}, \quad (1)$$

где $k = \frac{I_{\text{д}}}{I_{\text{п}}}$.

При изменении отношения токов в плечах питания от 0 до 1 коэффициент несимметрии системы потребляемых токов α_1 соответственно будет изменяться от 1 до 0,5 (рис. 9).

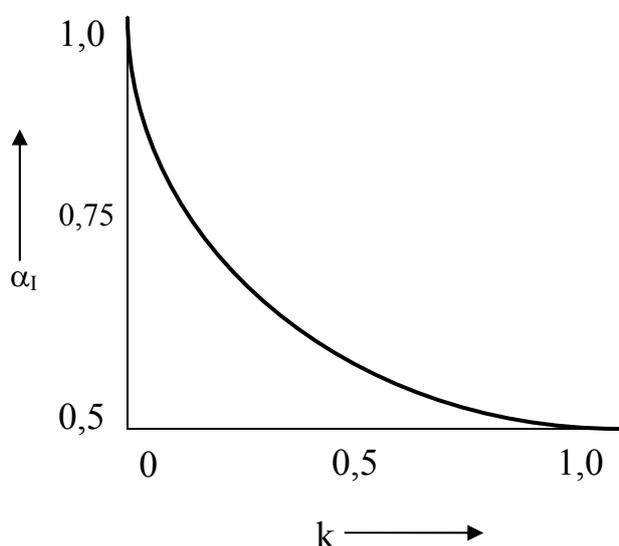


Рис. 9. Изменение коэффициента несимметрии при различных соотношениях токов плеч питания

Столь высокая несимметрия токов единичного трансформатора определяет и значительную несимметрию напряжений обмоток 25 (27,5) и 10 (35) кВ, от которых осуществляется питание трехфазных нетяговых потребителей.

Важно также отметить, что при несимметричном режиме работы будет иметь место и снижение так называемой располагаемой мощности трансформатора $S_{\text{расп}}$.

Для трехфазного трансформатора

$$S_{\text{расп}} = (0,5 - 0,76) S_{\text{ном}}. \quad (2)$$

Минимальное значение $S_{\text{расп}} = 0,5 S_{\text{ном}}$ соответствует численному значению $k = 0$ (однофазная нагрузка), а максимальное – $S_{\text{расп}} = 0,76 S_{\text{ном}}$ – $k = 1$ (двухфазная нагрузка).

Заметим, что располагаемая мощность трансформатора, работающего в несимметричном режиме, является важным показателем, характеризующим степень использования обмоток трансформатора.

Из вышеизложенного следует, что обычные трехфазные трансформаторы со схемой соединения обмоток «Y/Δ/Y(Δ)», принятые к установке на тяговых подстанциях электрических железных дорог переменного тока, обладают существенными недостатками. При этом нужно иметь в виду, что требования к обеспечению электромагнитной совместимости отдельных приемников электрической энергии возросли, что еще в большей степени определяет необходимость выбора типа понизительного трансформатора для тяговых подстанций переменного тока, в частности, специальных трехфазно-двухфазных трансформаторов для тяговых подстанций переменного тока.

5.2. Специальные трехфазно-двухфазные трансформаторы

К специальным трехфазно-двухфазным трансформаторам относятся трансформаторы Скотта (рис. 10), трансформаторы, разработанные сотрудниками ВНИИЖТа и трансформаторы Кюблера и Леблана.

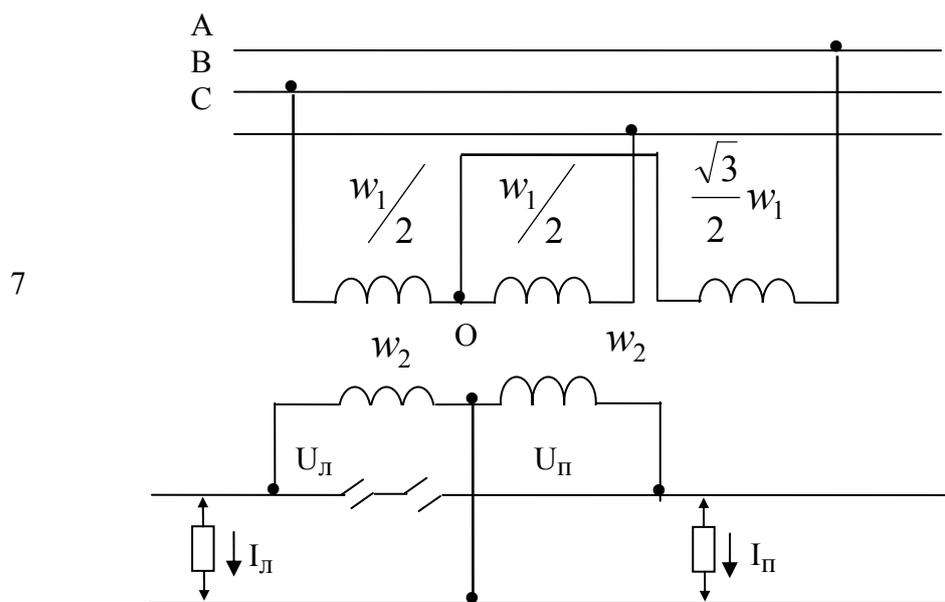


Рис. 10. Питание тяговой сети однофазного тока от трансформатора, обмотки которого соединены по схеме Скотта

В зарубежных странах на электрифицированных железных дорогах переменного тока на тяговых подстанциях наибольшее распространение получили трансформаторы Скотта.

В схеме трансформатора Скотта используются два однофазных трансформатора, обмотки которых соединены по схеме в соответствии с рис. 10. Напряжения вторичных

обмоток $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{л}}$, сдвинутые на угол 90° (рис. 11), используются для питания двухфазной тяговой нагрузки.

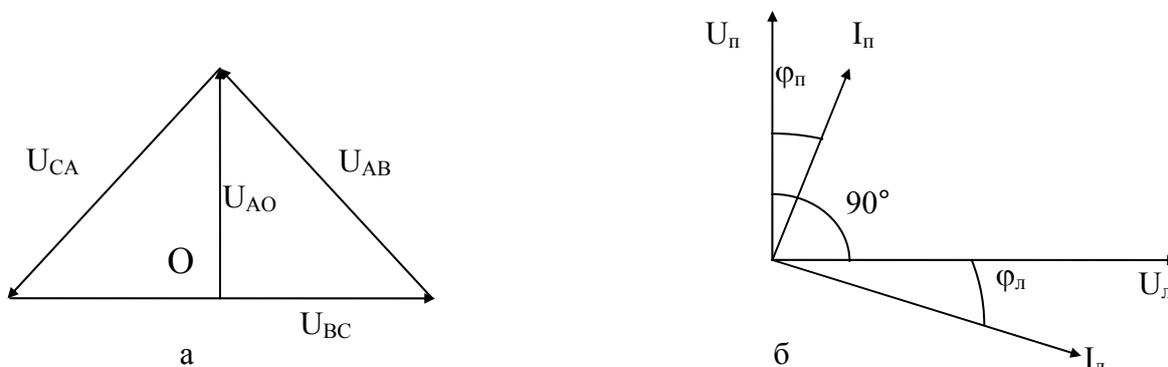


Рис. 11. Векторные диаграммы: а – напряжений вторичных обмоток; б – плеч питания

Коэффициент несимметрии системы потребляемых токов трансформатором Скотта определяется по формуле:

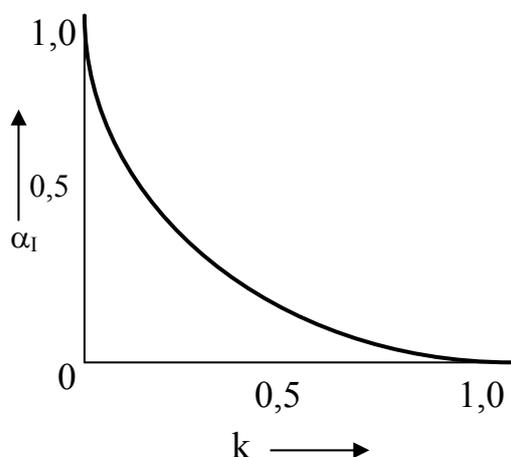


Рис. 12. Изменение коэффициента несимметрии от отношения плеч питания при соединении обмоток трансформатора по схеме Скотта

$$\alpha_1 = \frac{1-k}{1+k}, \quad (3)$$

где $k = \frac{I_{\text{л}}}{I_{\text{п}}}$ – отношение токов плеч питания.

Зависимость коэффициента α_1 от отношения токов в плечах питания k представлена на рис. 12.

Из рис. 12 следует, что при одинаковых токах в плечах питания ($k = 1$) трансформатор Скотта потребляет симметричный трехфазный ток. Соответственно располагаемая мощность трансформаторов Скотта

$$S_{\text{расп}} = (0,5 - 1,0) S_{\text{ном}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) также следует, что степень использования обмоток трансформатора Скотта выше, чем у обычных трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток «Y/Δ/ Y (Δ)».

Заметим при этом, что на тяговых подстанциях переменного тока при трансформаторах Скотта для питания трехфазных потребителей требуется установка трехфазных трансформаторов, что определяет существенное увеличение затрат. Поэтому применение трансформаторов Скотта на тяговых подстанциях электрических железных дорог переменного тока в РФ считается неоправданным.

Сотрудниками Московского государственного университета путей сообщения (МГУПС) и Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТа) предложен трехстержневой трехфазно-двухфазный трансформатор (рис. 13).

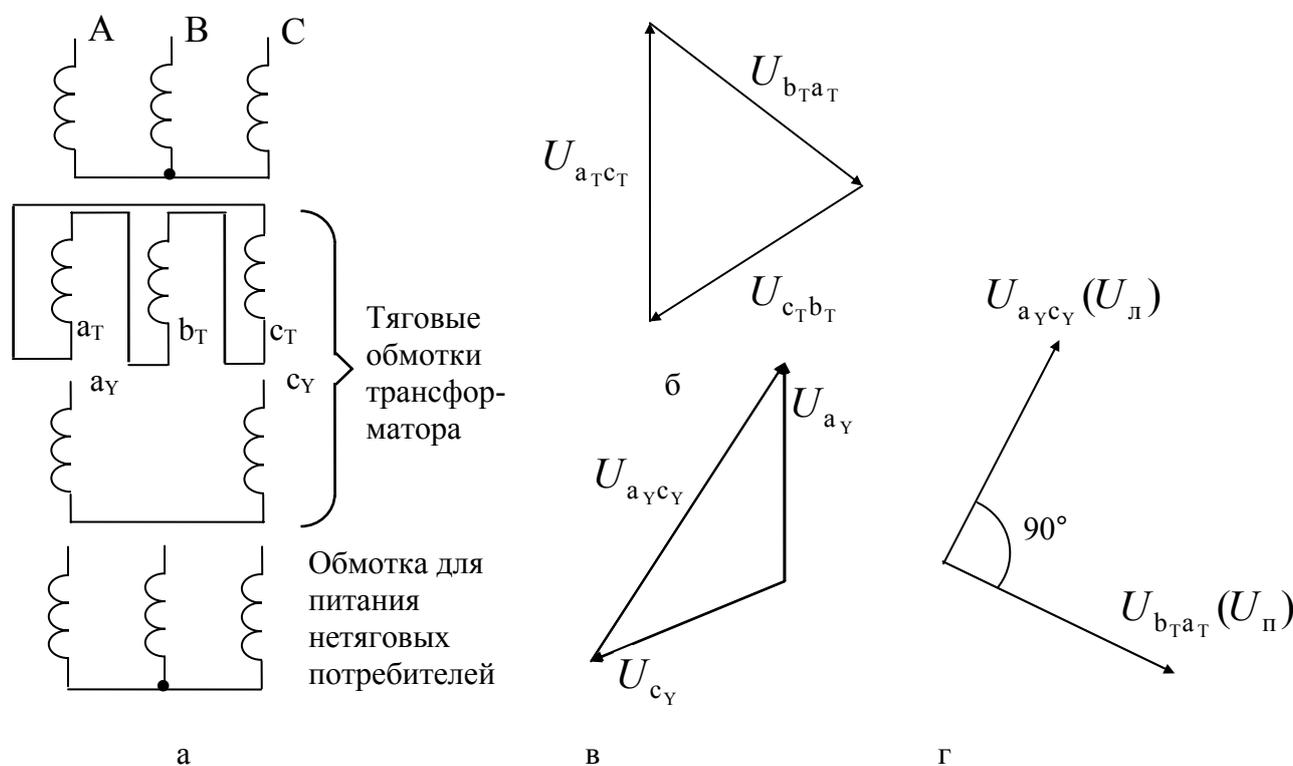


Рис. 13. Трехстержневой трехфазно-двухфазный трансформатор: а – схема соединения обмоток; б, в – векторные диаграммы напряжений вторичных обмоток; г – векторная диаграмма напряжений плеч питания

Для питания двухфазной тяговой нагрузки используются обмотки, соединенные по схемам треугольника и неполной звезды. При этом векторы напряжений $U_{aYcY}(U_{\text{л}})$ и $U_{bTaT}(U_{\text{п}})$ будут сдвинуты на угол 90° (эффект

Скотта), при котором обеспечивается высокий симметрирующий эффект. Коэффициент несимметрии системы потребляемых токов у такого трансформатора будет определяться по формуле (3), а располагаемая мощность – по формуле (4). Преимуществом такого трансформатора перед трансформатором Скотта является возможность размещения в одном баке и трехфазной обмотки напряжением 10 (35) кВ для питания нетяговых потребителей. Это обеспечивает значительное сокращение затрат при сооружении тяговой подстанции.

Заслуживают внимания для рассмотрения возможность установки на тяговых подстанциях переменного тока трансформаторов Кюблера (рис. 14) и Леблана (рис. 15).

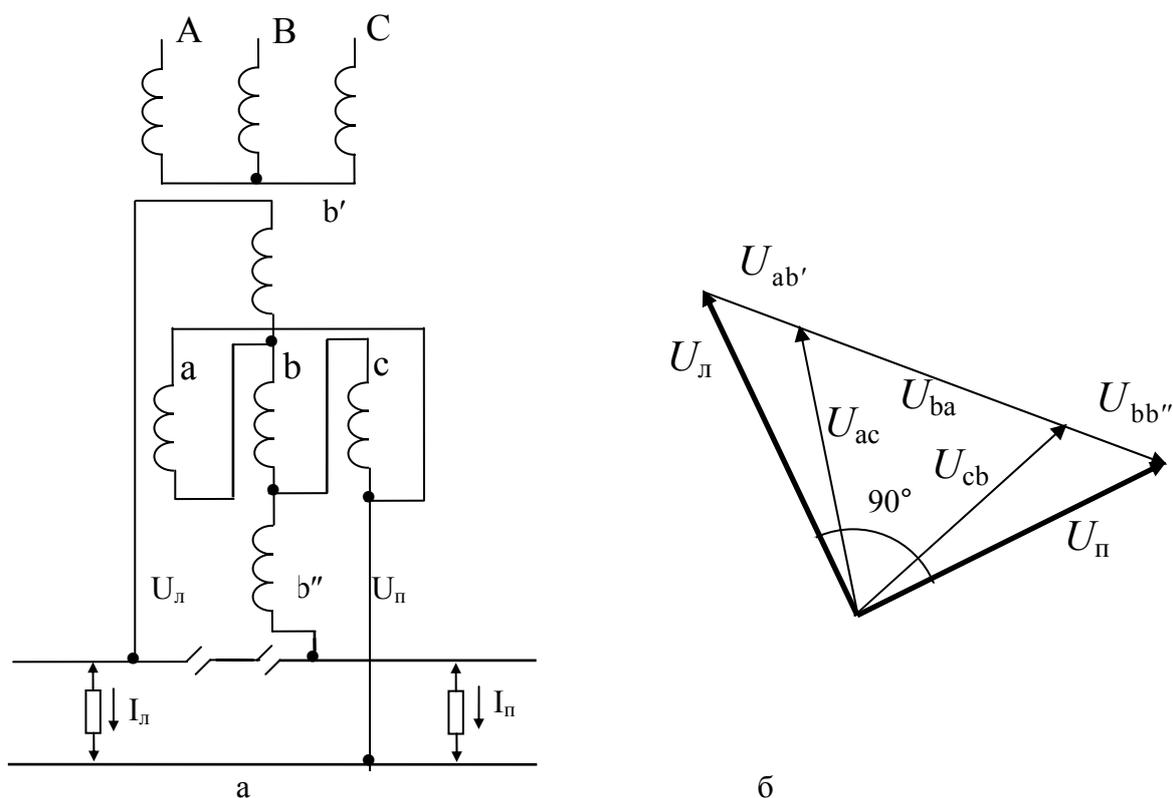


Рис. 14. Трансформатор Кюблера: а – схема соединения обмоток; б – векторная диаграмма напряжений

Специальные трехфазно-двухфазные трансформаторы Кюблера и Леблана представляют собой трехстержневые трехфазные трансформаторы, вторичные (тяговые) обмотки которых соединены при соответствующем выборе чисел витков так, чтобы угол сдвига между векторами напряжений плеч питания $U_{л}$ и $U_{п}$ был равным 90° (эффект Скотта). И в этих типах трехфазно-двухфазных трансформаторов коэффициент несимметрии системы потребляемых токов будет определяться по формуле (3), а располагаемая мощность – по формуле (4). Трехфазно-двухфазные трансформаторы Кюблера и Леблана также

снабжаются дополнительной трехфазной обмоткой напряжением 10 (35) кВ для питания нетяговых потребителей.

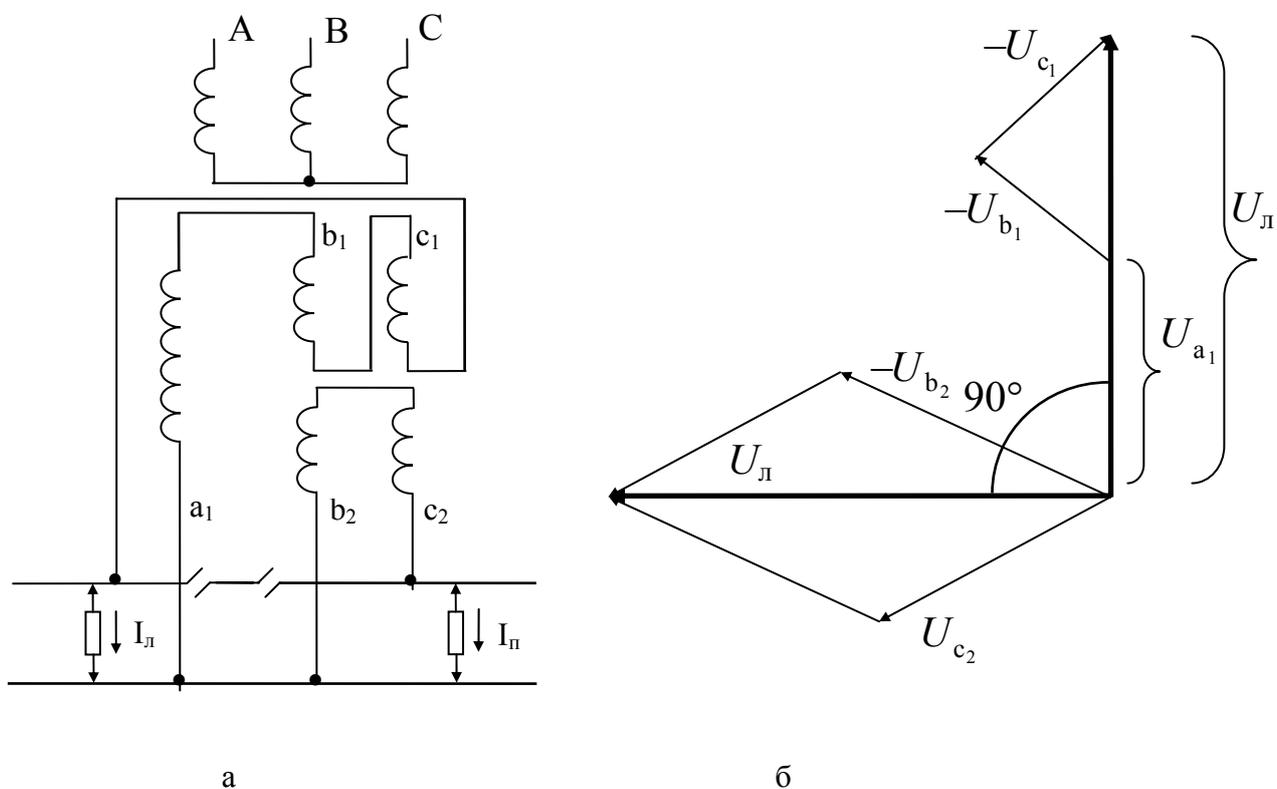


Рис. 15. Трансформатор Леблана: а – схема соединения обмоток; б – векторная диаграмма напряжений

В заключение отметим, что среди проблем по качеству электрической энергии особое место занимает проблема электромагнитной совместимости, связанная с несимметрией и несинусоидальностью токов и напряжений в электрических системах. Поэтому вопросы создания методов и средств симметрирования как трехфазных электрических сетей, так и несимметричных потребителей электрической энергии являются актуальными и приобретают большое народнохозяйственное значение.

5.3. Компенсация реактивной мощности и улучшение показателей качества электрической энергии

Последние три десятилетия в развитых странах мира, в том числе и в РФ, характеризуются прогрессирующим ростом числа и мощности симметричных и несимметричных приемников электрической энергии с несинусоидальной формой кривой потребляемого тока и прежде всего преобразовательных устройств – выпрямителей и инверторов. К числу таких приемников электрической энергии относятся железные дороги, электрифицированные на переменном токе.

Заметим, что нагрузочные режимы при наличии несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов следует рассматривать как нормальные длительные режимы со всеми вытекающими из этого последствиями (увеличение потерь электрической энергии, снижение пропускной способности элементов системы электропередачи, ухудшение качества электрической энергии и др.).

В системах электроснабжения электрических железных дорог переменного тока проблемными вопросами являются компенсация реактивной мощности, снижение несимметрии системы потребляемых токов и фильтрация высших гармоник. Их можно решить с учетом достижений современной электроники только при установке на тяговых подстанциях специальных устройств:

- 1) регулируемых устройств параллельной компенсации (УПК);
- 2) multifunctional оптимизирующих устройств (МОУ), обеспечивающих одновременно компенсацию реактивной мощности на основной частоте и фильтрацию наиболее выраженных высших гармоник. Надлежащий эффект может быть достигнут при условии разработки и эксплуатационного освоения регулируемых МОУ.

5.4. Снижение электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока на смежные устройства и повышение технико-экономической эффективности системы электроснабжения

Тяговая сеть электрических железных дорог переменного тока является мощным источником электромагнитного влияния на различные смежные устройства.

Снижение электромагнитного влияния тяговых токов на смежные устройства может быть обеспечено двумя способами:

- 1) калибровкой воздушных линий устройств, подверженных влиянию;
- 2) применением систем электроснабжения с пониженным электромагнитным влиянием.

Значимость этой проблемы будет существенно снижена с эксплуатационным освоением в РФ волоконно-оптических линий связи (ВОЛС).

В первые годы электрификации железных дорог на переменном токе в РФ было принято решение замены воздушных линий связи кабельными. Замена длинных воздушных линий кабельными с хорошим защитным действием брони и оболочки является высокоэффективным способом снижения опасного и мешающего влияния. Однако кабель дефицитен, а каблирование линий связи увеличивает стоимость перевода железной дороги на электрическую тягу примерно на 20 – 30 %.

На ряде конкретных участках железных дорог экономичнее применять для снижения влияния тяговых токов системы электроснабжения с пониженным влиянием. Рассмотрим некоторые из таких систем.

5.4.1. Система электроснабжения с отсасывающими трансформаторами

Идея применения отсасывающих трансформаторов (ОТ) с обратным приводом (ОП) была впервые описана в 1917 г. Принципиальная схема ОТ приведена на рис. 16.

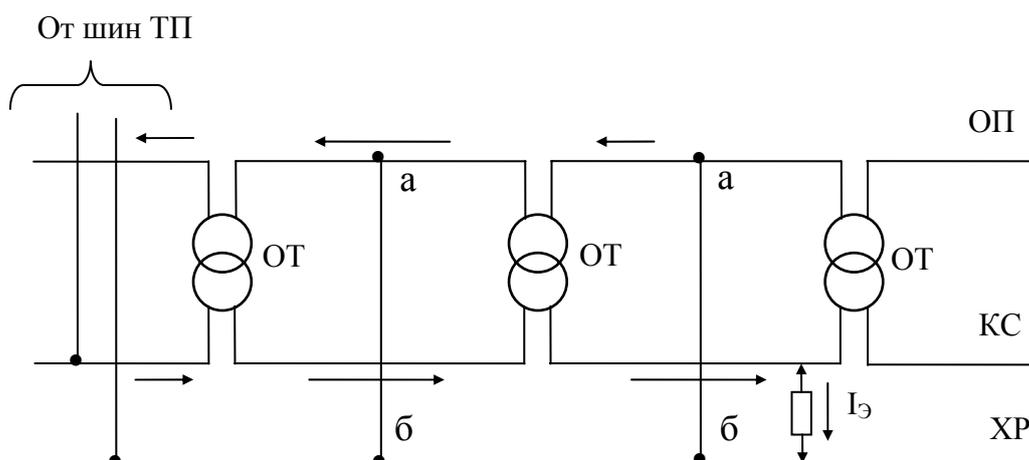


Рис. 16. Система тягового электроснабжения с отсасывающим трансформатором: ОП – обратный провод; КС – контактная сеть; ХР – ходовой рельс; ОТ – отсасывающий трансформатор

Широкое применение эта система получила в Швеции, а также на некоторых участках электрических железных дорог Англии и Японии. В бывшем СССР эта система нашла применение на Московской, Горьковской, Одесской, Кишиневской и других железных дорогах.

Отсасывающий трансформатор представляет собой однофазный трансформатор с коэффициентом трансформации 1 или 0,8. При включении ОТ и ОП (см. рис. 16) ток I_3 , потребляемый поездом, будет протекать по контактной сети и ОП. При этом токи в контактной сети (КС) и ОП будут примерно равными и противоположно направленными, что приводит к значительному снижению магнитного влияния на смежное устройство.

Отсасывающие трансформаторы обеспечивают защиту кабелей со слабо экранирующей оболочкой, разветвленной кабельной и воздушной сети железнодорожных узлов и городов, трубопроводов. Применение их обосновано в густонаселенных районах.

Установка ОТ определяет и недостатки, присущие этой системе:

- 1) увеличение сопротивления контактной сети;
- 2) необходимость секционирования контактной сети в местах установки ОТ и ухудшение условий токосяема, особенно при высоких скоростях движения;
- 3) необходимость подвески дополнительного провода.

5.4.2. Автотрансформаторная система электроснабжения напряжением 2×25 кВ

Эта система впервые была применена в США в 1913 г. (рис. 17), а в бывшем СССР – в 1979 г. на участке «Вязьма – Орша». В настоящее время система применяется на железных дорогах стран СНГ: Московской, Белорусской, Целинной, Горьковской, Алма-Атинской и бывшей Байкало-Амурской магистрали.

На тяговых подстанциях, как правило, устанавливаются однофазные трансформаторы, первичные обмотки которых соединяются по схеме открытого треугольника. Вторичная обмотка каждого трансформатора имеет выведенную нулевую точку, образуя напряжение $2 \times 27,5$ (25) кВ. В межподстанционной зоне подвешивается питающий провод (ПП) и на расстоянии 10 – 12 км устанавливаются автотрансформаторы (АТ). Автотрансформаторы практически выполняют функции промежуточных источников питания, получая напряжение от соседних тяговых подстанций. При этом токи, протекающие по питающему проводу ПП и контактной сети, будут взаимно противоположными, что в конечном итоге обеспечивает снижение магнитного влияния на смежные устройства.

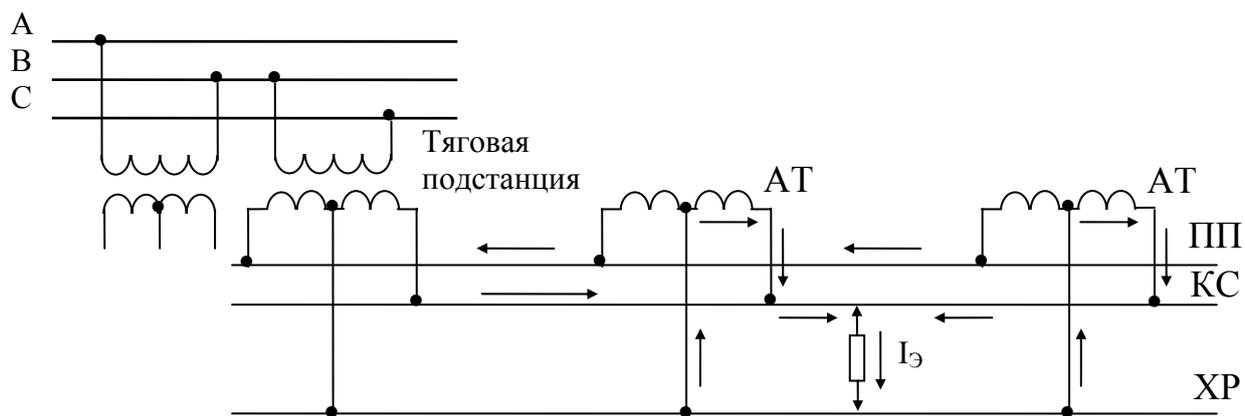


Рис. 17. Автотрансформаторная система тягового электроснабжения: АТ – автотрансформатор

При автотрансформаторной системе электроснабжения напряжением 2×25 кВ

1) питание тяговой нагрузки происходит при более высоком напряжении, что обеспечивает снижение потерь электрической энергии (несмотря на наличие дополнительных потерь в автотрансформаторах);

2) снижается полное сопротивление тяговой сети по сравнению с обычной системой электроснабжения 1×25 кВ примерно в 1,5 раза, что приводит к снижению потерь напряжения в тяговой сети;

3) уровень влияния на смежные устройства понижается в 8 – 10 раз по сравнению с тяговой сетью системы электроснабжения 1×25 кВ;

4) снижение полного сопротивления тяговой сети, потерь напряжения, а также токовых нагрузок позволяет увеличить расстояние между тяговыми подстанциями до 80 – 100 км.

К недостаткам автотрансформаторной системы электроснабжения напряжением 2×25 кВ относятся:

1) необходимость установки в межподстанционных зонах большого числа автотрансформаторов;

2) усложнение обслуживания устройств электроснабжения за счет дополнительного оборудования;

3) необходимость подвески дополнительных питающих проводов.

5.4.3. Многопроводная система электроснабжения с экранированным и усиливающим проводами

Многопроводная система электроснабжения с экранированным и усиливающим проводами предложена сотрудниками РГУПС и внедрена на Северо-Кавказской и Северной железных дорогах (рис. 18).

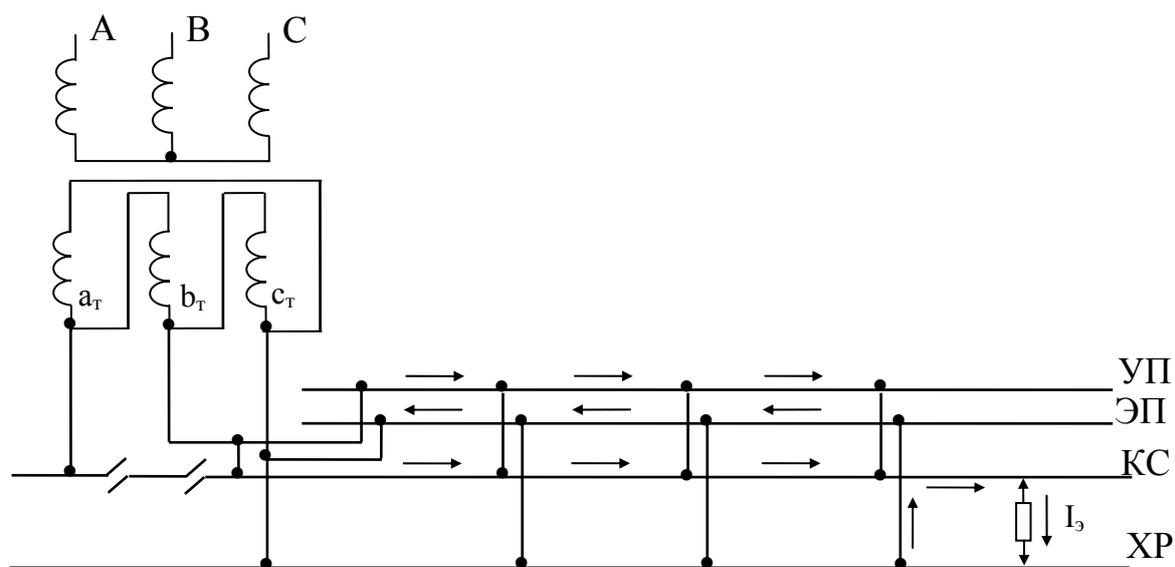


Рис. 18. Многопроводная система тягового электроснабжения с экранированным и усиливающим проводами: УП – усиливающий провод; ЭП – экранирующий провод; КС – контактная сеть; ХР – ходовой рельс

В этой системе на опорах контактной сети (с полевой стороны) подвешиваются два провода: усиливающий (УП) и экранированный (ЭП). Усиливающий провод через каждые 3 – 5 км электрически соединяется с контактной сетью (КС), а экранированный – с ходовым рельсом (ХР).

Система электроснабжения с экранированным и усиливающим проводами позволяет:

- 1) решить проблему усиления тяговой сети грузонапряженных участков электрических железных дорог переменного тока;
- 2) снизить магнитное влияние тяговой сети в 1,5 – 2,0 раза;
- 3) снизить потери напряжения в тяговой сети в 1,6 – 1,7 раза и потери электрической энергии в 1,5 – 1,6 раза;

4) улучшить условия защиты тяговой сети при коротких замыканиях.

5.4.4. Система электроснабжения с коаксиальным кабелем

Система электроснабжения с коаксиальным кабелем впервые была применена в Японии в 1975 г. (рис. 19).

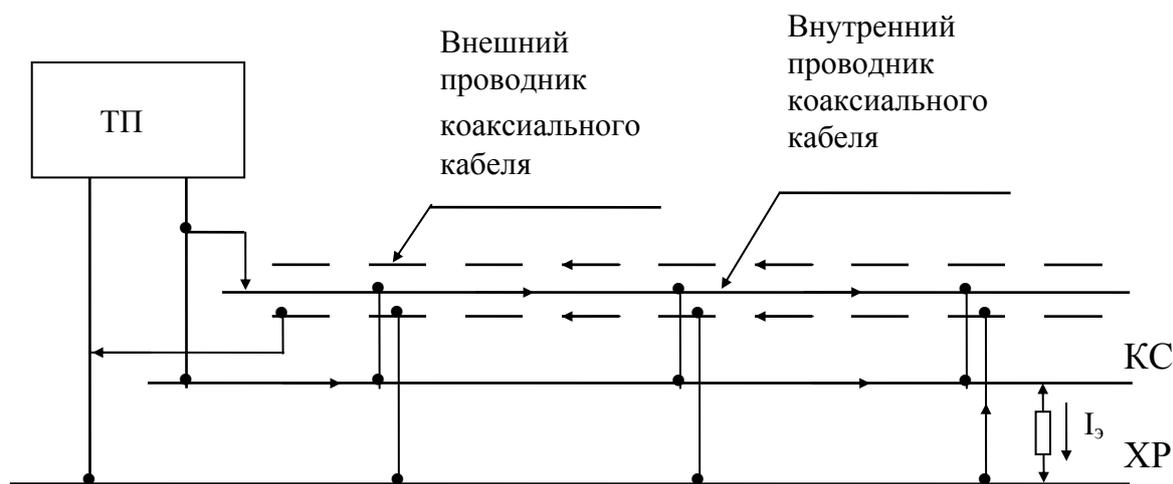


Рис. 19. Система тягового электроснабжения с коаксиальным кабелем: КС – контактная сеть; ХР – ходовой рельс

Коаксиальный (двухжильный) кабель укладывается вдоль железнодорожного пути и разделяется на участки длиной от 5 до 10 км. Внутренний проводник кабеля соединяется с КС, а внешний – с ХР. Сечение внешнего и внутреннего проводников (жил) принято порядка 1000 – 1200 мм².

Два проводника коаксиального кабеля – внешний и внутренний – имеют соосное расположение. В связи с этим взаимная индуктивность проводников велика, а полное сопротивление образуемой ими цепи незначительно. Потеря напряжения в кабеле снижается, и поэтому длина межподстанционной зоны может быть увеличена.

Большая взаимная индуктивность внутреннего и внешнего проводников обуславливает высокий экранирующий эффект, что определяет снижение магнитного влияния на смежные устройства.

Заметим, что схема электроснабжения с коаксиальным кабелем может быть выполнена при более простой конструкции контактной сети, что облегчает техническое содержание и повышает надежность системы электроснабжения.

В заключение отметим, что имеющийся опыт проектирования, сооружения и эксплуатации различных систем электроснабжения с пониженным электромагнитным влиянием в условиях РФ определил на перспективу применение на протяженных участках железных дорог, электрифицированных на переменном токе, автотрансформаторную систему электроснабжения напряжением 2×25 кВ.

5.5. Снижение транзита мощности по тяговой сети переменного тока

В реальных эксплуатационных условиях имеют место уравнильные токи (транзит мощности), протекающие между тяговыми подстанциями по контактной сети. Величина их зависит от режима работы системы внешнего электроснабжения, разных коэффициентов трансформации тяговых трансформаторов тяговых подстанций, мощности и схемы подключения устройств параллельной компенсации. Уравнильные токи приводят к дополнительным потерям электрической энергии, которые могут достигать за год порядка $(450 - 500) \cdot 10^3$ кВт·ч на одной подстанционной зоне.

Разработка способов снижения уравнильных токов – путь снижения потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения.

6. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ТОКОСЪЕМА

Обеспечение надежного и экономичного токосъема, что особенно важно при повышении скоростей движения поездов на электрифицированных участках магистральных железных дорог, зависит от показателей (параметров и характеристик) токосъемных устройств. Это в равной мере относится как к контактной подвеске, так и к токоприемникам.

К контактной подвеске предъявляются следующие основные требования: одинаковая высота контактного провода над уровнем головок рельсов во всех точках пролета при любой температуре окружающей среды; равномерная жесткость по всему пролету; обеспечение горизонтальных отклонений проводов от оси пути ветром и вертикальных откатов контактных проводов токоприемниками в допустимых пределах, одновременного подъема контактных проводов на воздушных стрелках и др.

К токоприемникам предъявляются следующие основные требования: небольшая приведенная масса, обеспечение одинакового нажатия на контактный провод во всех точках пролета, аэродинамическая устойчивость полоза (устойчивость при воздействии встречного потока воздуха) и др.

Выполнение основных требований, предъявляемых к токосъемным устройствам, может быть достигнуто путем улучшения их показателей за счет совершенствования конструкций отдельных элементов или устройств в целом.

6.1. Совершенствование контактных подвесок

Выравнивание жесткости в пролете является одним из основных путей улучшения качества токосъема. Для этого используются специальные подвески: двойные, тройные, пространственные и др. Рассмотрим пространственно-рычажную контактную подвеску [8], которая во всех точках пролета имеет одну и ту же жесткость и одинаковую высоту контактного провода над уровнем головок рельсов (рис. 20). Это достигается тем, что на несущем тросе 1 в перпендикулярных ему плоскостях установлены разнонаправленные горизонтальные рычаги 2, к концам которых присоединены струны 3 для подвески контактного провода 4. Одинаковая жесткость подвески во всех точках пролета достигается благодаря использованию сил сопротивления троса при работе на кручение.

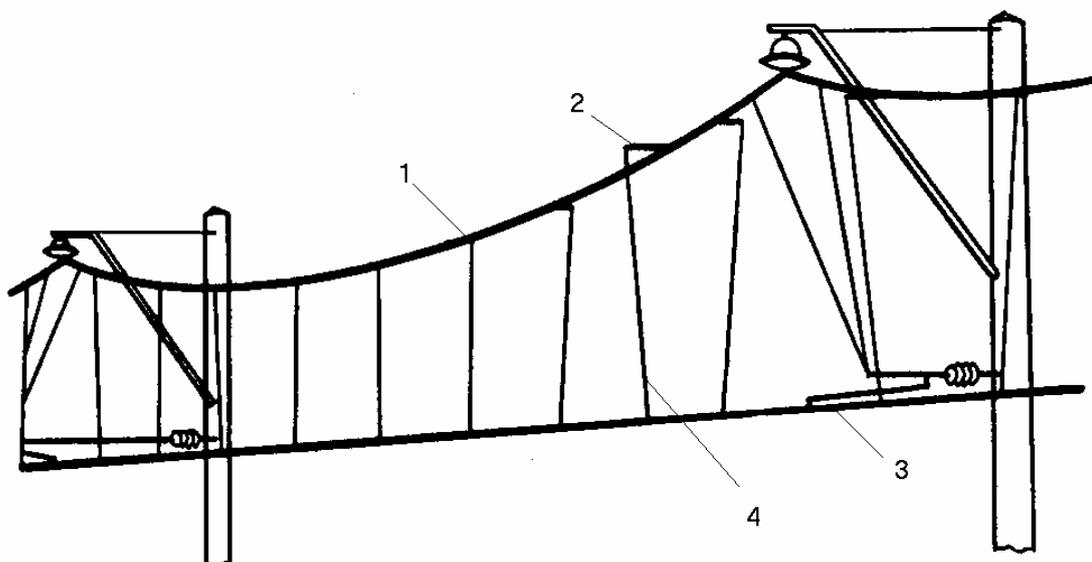


Рис. 20. Пространственно-рычажная контактная подвеска

Для эксплуатируемых контактных подвесок рекомендуется снижать жесткость в фиксаторном узле. С этой целью в нем устанавливают пружинные элементы [9],

выполняются подвижные элементы из легких сплавов [10], вносятся различные конструктивные изменения [11] и др.

В Омском государственном университете путей сообщения (ОмГУПС) предложены различные фиксаторы, позволяющие снизить жесткость в опорном узле с предотвращением возможностей нарушения габарита проводов под действием ветра. Схема одного из фиксаторов показана на рис. 21.

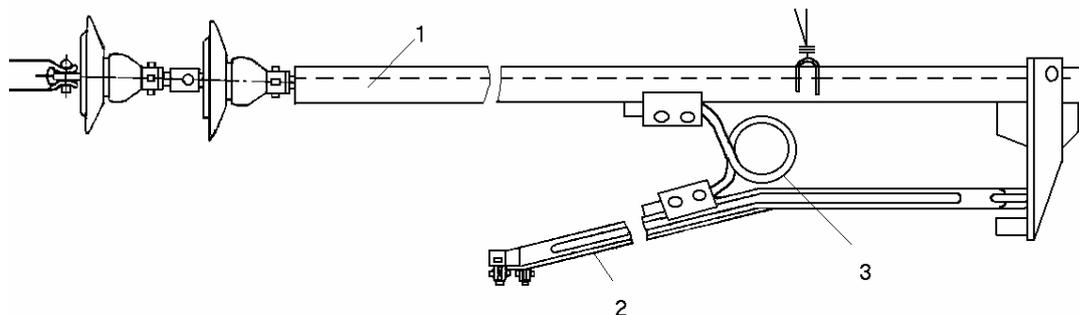


Рис. 21. Фиксатор контактной подвески с упругим элементом

Фиксатор (см. рис. 21) имеет упругий элемент 3 между основным 1 и дополнительным 2 стержнями [12]. Упругий элемент 3 выполнен из троса, один конец которого крепится к основному стержню 1 фиксатора, а другой – к дополнительному 2. При приближении токоприемника создается вертикальная сила, которая вызывает разгрузку упругого элемента 3, что способствует большему отжатию контактного провода в опорном узле. Это приводит к выравниванию жесткости подвески в пролете и, как следствие, к стабилизации контактного нажатия. В случае больших отжатий контактных проводов упругий элемент 3 играет роль ограничителя их перемещений.

Обеспечение ветроустойчивости контактных подвесок достигается выбором ветроустойчивых схем подвешивания проводов [13], совершенствованием конструкций отдельных узлов [14], использованием дополнительных устройств [15] и др.

Наиболее эффективным мероприятием по решению этой задачи является рациональная трассировка контактной сети, предложенная специалистами ОмГУПС. Смысл ее состоит в том, что пролет максимальной длины принимается только в начале анкерного участка, а далее к середине каждый пролет уменьшается на 2 – 3 м по сравнению с предыдущим. В результате такого способа трассировки оказывается, что в средней части анкерного участка, где натяжение проводов меньше номинального, длина пролетов будет наименьшей. Вследствие этого выдувание проводов ветром не превышает допустимых значений.

Воздушные стрелки в наибольшей степени подвергались различным усовершенствованиям, направленным на повышение их надежности и улучшение взаимодействия с токоприемником. Однако большинство предложений не нашло широкого

распространения из-за конструктивных сложностей и неполноты решения поставленной задачи. В общем случае предполагается создание саморегулируемых [16] и автоматических [8] воздушных стрелок.

В качестве примера рассмотрим разработанную во ВНИИЖТе автоматическую воздушную стрелку [8] (рис. 22).

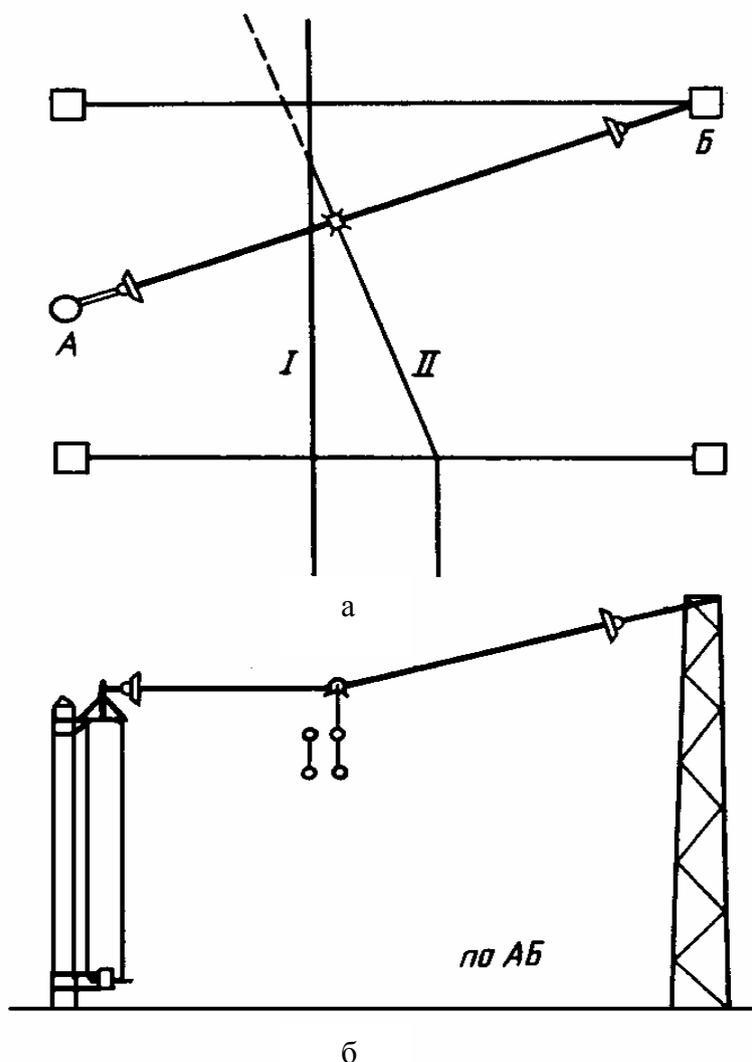


Рис. 22. Автоматическая воздушная стрелка

В отличие от существующих стрелок с постоянной высотой контактных проводов в автоматической воздушной стрелке контактный провод пути, по которому подготовлен маршрут для поезда, располагается в зоне подхвата токоприемником несколько ниже, чем провод примыкающего пути. В результате чего происходит прием контактного провода примыкающего пути горизонтальной частью полоза токоприемника.

Необходимый режим работы стрелки обеспечивается подвешиванием одной из пересекающихся контактных подвесок к специальному поддерживающему тросу. Последний соединен с двигателем привода путевой стрелки. В результате каждый перевод путевой стрелки сопровождается автоматическим изменением взаимного высотного положения пересекающихся контактных проводов. В настоящее время проводятся работы по упрощению конструкций отдельных узлов контактной подвески, разрабатываются рекомендации по использованию дешевых изоляционных материалов, обладающих высокими механическими и электрическими свойствами.

Во всем мире скорости движения на железнодорожном транспорте, в том числе и электрического, повышаются. При высоких скоростях движения электрического подвижного состава предъявляются более высокие требования к надежности и экономичности токосяема.

Наиболее перспективные конструктивные решения по скоростным контактным подвескам приведены в [17].

При скорости свыше 200 км/ч вспомогательный трос рессорной струны должен быть увеличен до 16 – 18 м с натяжением 3500 Н. Стрела провеса должна составлять 0,001 расстояния между первыми нерессорными струнами. Уклоны провода не должны превышать 0,002. Вынос в кривых не должен быть больше 450 мм, зигзаг на прямых – 300 мм. Воздушные стрелки должны снабжаться дефлектором. Сопряжения анкерных участков необходимо оборудовать упругими элементами в переходных пролетах. Для повышения надежности в секционных разъединителях могут быть использованы облегченные кремнийорганические изоляторы, а моторные приводы снабжаться винтовой передачей. Названные разработки созданы в ОмГУПСе.

6.2. Совершенствование токоприемников

Указанные выше требования к токоприемникам электрического подвижного состава предъявляются как к эксплуатируемым, так и перспективным конструкциям, позволяющим обеспечить более высокие скорости движения.

В качестве примера приведем схемы токоприемников [18], в большей степени удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям (рис. 23).

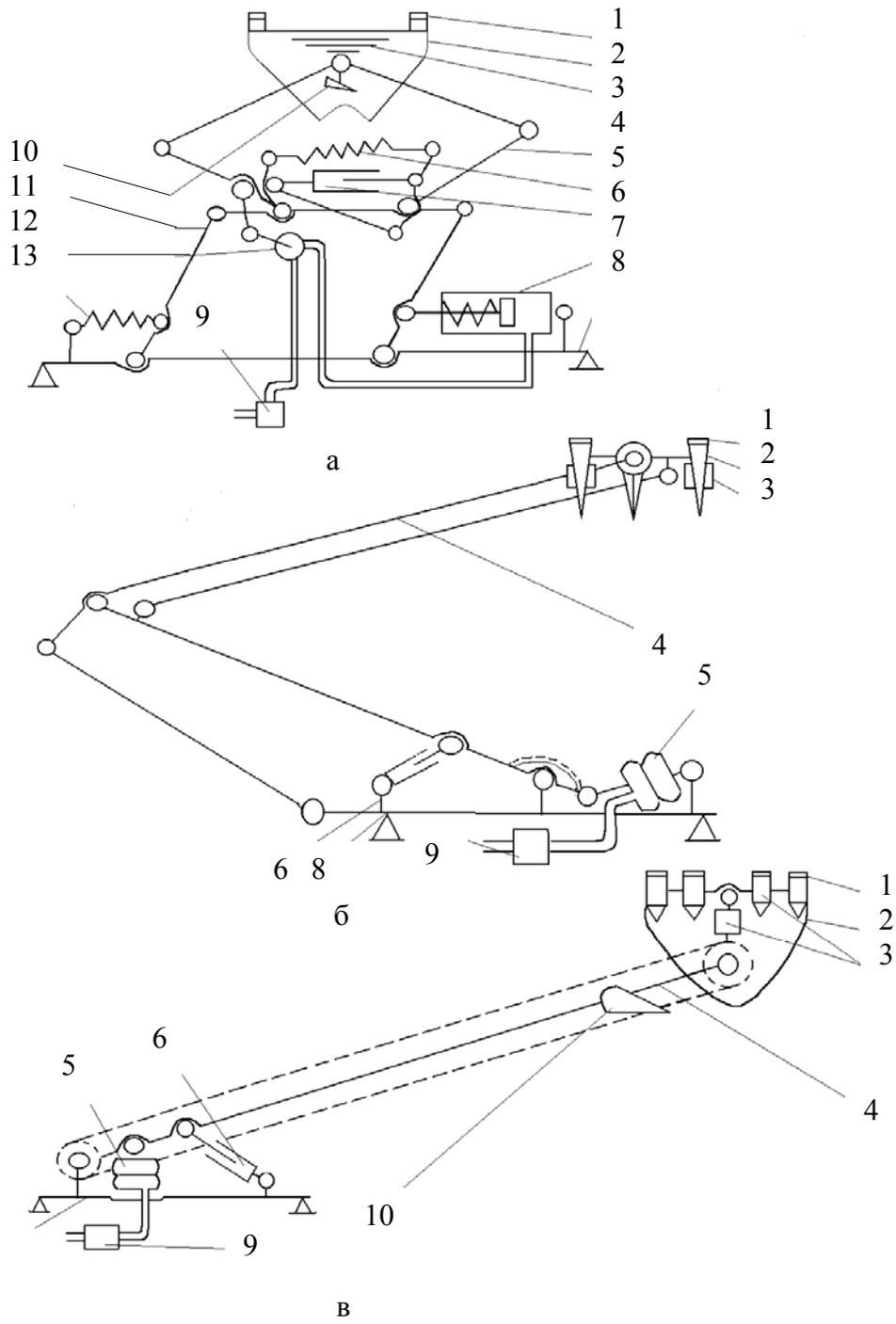


Рис.23. Скоростные токоприемники: а – ВНИИЖТа; б – фирмы Дорнье; в – ОмИИТа (ОмГУПСа)

Рассмотрим (см. рис. 23) токоприемник ВНИИЖТа пантографного типа с параллельным подвижным основанием (рис. 23, а), асимметричный полупантограф фирмы Дорнье с резинокордным подъемно-опускающим механизмом (рис. 23, б), штанговый токоприемник ОмИИТа с резинокордным подъемно-опускающим элементом (рис. 23, в). Они имеют следующие основные узлы: 1 – контактные элементы (подрессоренные и неподрессоренные); 2 – несущие конструкции полозов; 3 – каретки полозов; 4 – система подвижных рам; 5 – подъемный элемент; 6 – демпфирующее устройство; 7 – цилиндр с опускающей пружиной; 8 – основание токоприемника с изоляторами; 9 – управляющее устройство; 10 – аэродинамическое устройство; 11 – нижняя система рам; 12 – авторегулятор высоты нижней системы рам; 13 – пружина нижней системы рам.

Рекомендации для решения перспективных конструктивных решений по токоприемникам [17]:

система подвижных рам – симметричный вариант полупантографа при совершенствовании токоприемника и асимметричный вариант – при создании нового;

в качестве подъемно-опускающего механизма должны применяться приводы с возможностью регулирования статического нажатия с использованием резинокордного упругого элемента;

каретки необходимо выполнять с увеличенным свободным ходом;

полоз токоприемника для улучшения токосъема может быть выполнен рамным с индивидуальным подрессориванием контактных элементов;

для исключения резонансных явлений и стабилизации контактного нажатия скоростные токоприемники должны оборудоваться гидравлическими или воздушными амортизаторами;

повышение надежности токоприемника может быть достигнуто с помощью предохранительных устройств;

аэродинамические устройства требуется устанавливать на токоприемники, эксплуатирующиеся при скоростях свыше 100 км/ч.

7. НАПРАВЛЕННОСТЬ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ В ОБЛАСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Вопрос экономии электрической энергии на современном этапе, в том числе и в системе электрической тяги, приобретает все большую остроту. Возможность снижения ее затрат изыскивается как на подвижном составе, так и в системе тягового электроснабжения.

Уже более 25 лет ведутся интенсивные работы по использованию статических преобразователей для питания трехфазных тяговых электродвигателей (асинхронных и вентильных). Применение их дает большой технико-экономический эффект.

По данным государственных железных дорог Германии асинхронный трехфазный тяговый двигатель (при одинаковых габаритах) на 30 % мощнее коллекторного двигателя однофазного переменного тока при $f = 16\frac{2}{3}$ Гц и на 25 % имеет меньший вес.

В 1967 г. Новочеркасский электровозостроительный завод (НЭВЗ) выпустил опытный образец электровоза переменного тока ВЛ80^К с асинхронными тяговыми электродвигателями и статическими преобразователями частоты, принципиальная схема одной секции которого приведена на рис. 24.

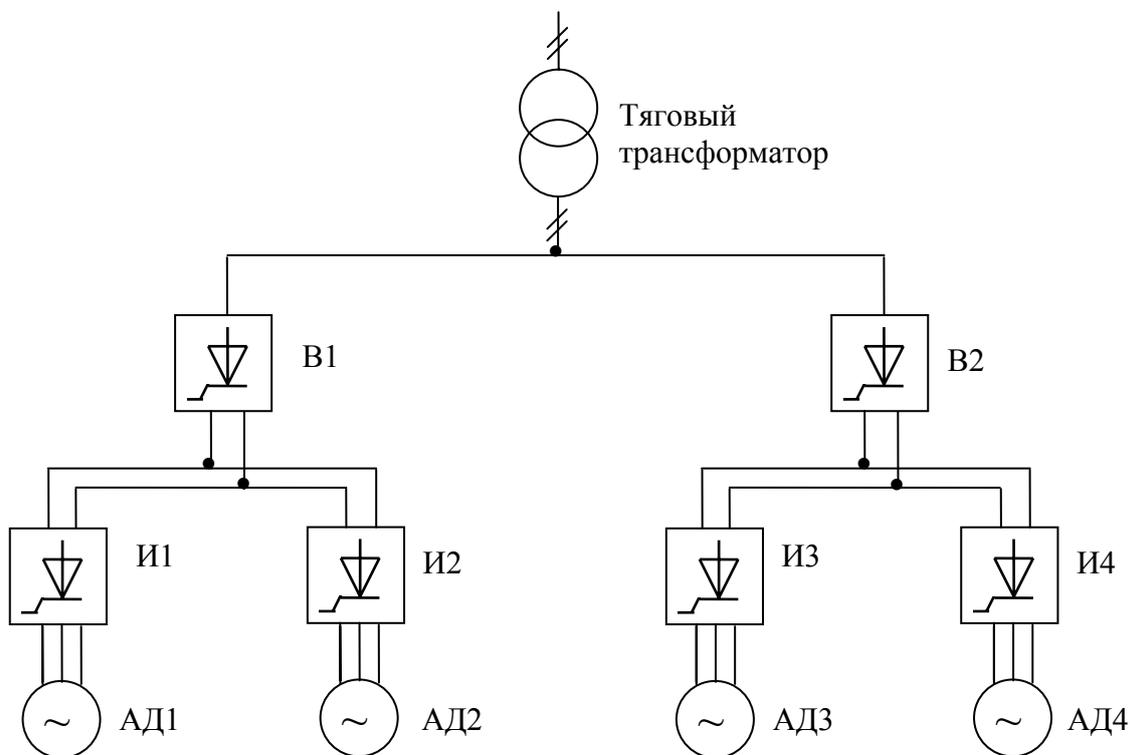
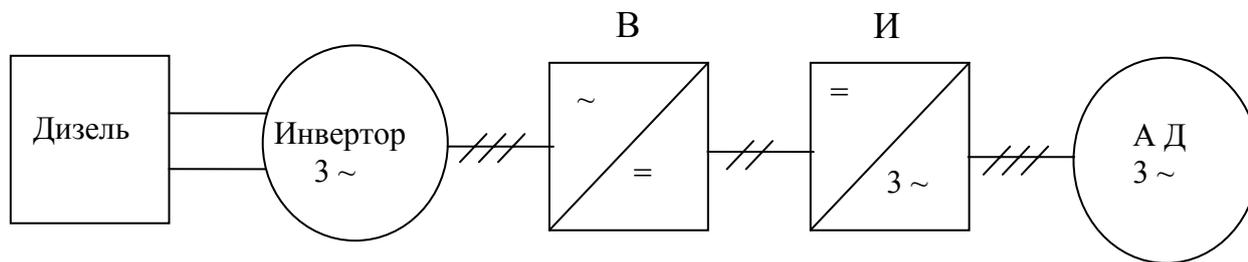


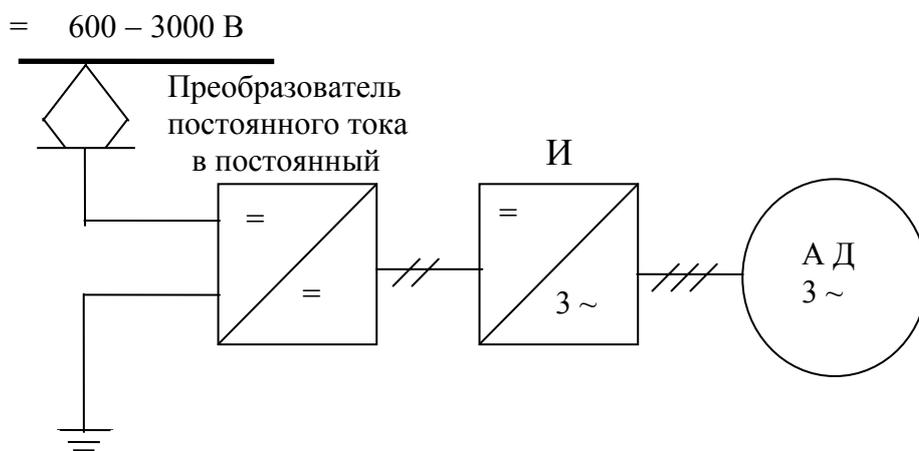
Рис. 24. Принципиальная схема секции электровоза с асинхронным тяговым двигателем и статическим преобразователем частоты

Статический преобразователь обеспечивает форму кривой тока, потребляемого электровозом, близкую к синусоиде, а также позволяет иметь коэффициент мощности, близкий к единице. Все это определяет снижение потерь электрической энергии в контактной сети и улучшение ее показателей.

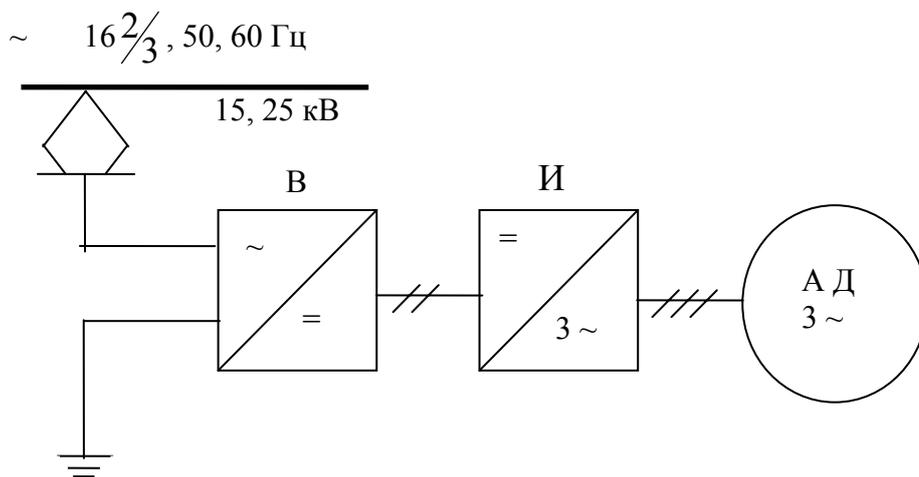
В Германии интенсивно ведутся работы по созданию универсального локомотива с трехфазными асинхронными тяговыми электродвигателями (электровозов и тепловозов), принципиальные схемы которых приведены на рис. 25.



а



б



в

Рис. 25. Принципиальные схемы локомотивов с трехфазным асинхронным двигателем: а – тепловоза; б – электровоза с напряжением 600 – 3000 В; в – электровоза с напряжением 15,25 кВ

Разработка и выпуск запираемых тиристорov и IGBT-транзисторов, позволяющих существенно упростить схему управления статическими преобразователями, микропроцессорная техника открывают новые возможности использования подвижного состава с асинхронными трехфазными тяговыми электродвигателями. Все больше железных дорог в мире переходит на эту систему, обеспечивающую снижение затрат на текущее содержание и ремонт, а также экономию электрической энергии за счет лучшего КПД.

Ведутся работы и по созданию электроподвижного состава с вентильными двигателями. В 1970 г. Новочеркасским электровозостроительным заводом построен первый электровоз ВЛ80^В мощностью 8000 кВт с вентильными тяговыми электродвигателями на базе электровоза переменного тока ВЛ80.

Результаты продолжающихся всесторонних исследований электровозов с асинхронными и вентильными двигателями помогают в разработке универсального локомотива, обладающего значительными технико-экономическими преимуществами по сравнению с локомотивами, использующими коллекторные тяговые электродвигатели.

Разработка и выпуск запираемых тиристорov, современная микропроцессорная техника позволяют перейти к эксплуатационному освоению новой схемы электроснабжения с промежуточным звеном постоянного тока.

Для питания электроподвижного состава в системе электрической тяги с промежуточным звеном постоянного тока на тяговых подстанциях устанавливается преобразовательный выпрямитель-инвертор (рис. 26). Электрическая энергия переменного тока, получаемая от источника – электрической станции, выпрямителем преобразуется в постоянный ток, а постоянный ток в инверторе – в однофазный переменный ток требуемого напряжения частотой 50 Гц. Таким образом, выпрямитель-инвертор осуществляет преобразование трехфазного переменного тока в однофазный переменный. Такое, казалось бы, сложное преобразование обусловлено стремлением исключить несимметрию системы потребляемых токов единичной тяговой подстанции и ухудшение показателей качества электрической энергии в питающей энергосистеме. Других способов решения требуемой задачи для целей электрической тяги нет.

Известно, что одним из наиболее эффективных путей улучшения показателей качества электрической энергии, уменьшения потребления реактивной мощности и улучшения выходных характеристик выпрямителя является использование многопульсовых выпрямителей, обеспечивающих форму кривой выпрямленного напряжения с двенадцатью, двадцатью четырьмя и т. д. пульсациями. Процесс замены шестипульсовых выпрямителей на двенадцатипульсовые на электрических железных дорогах России уже начался. Отметим, что

на основании теоретических и экспериментальных работ, выполненных сотрудниками ОмГУПС и специалистами Западно-Сибирской железной дороги, введен в постоянную эксплуатацию на тяговой подстанции станции Омск первый двадцатичетырехпульсовый выпрямитель.

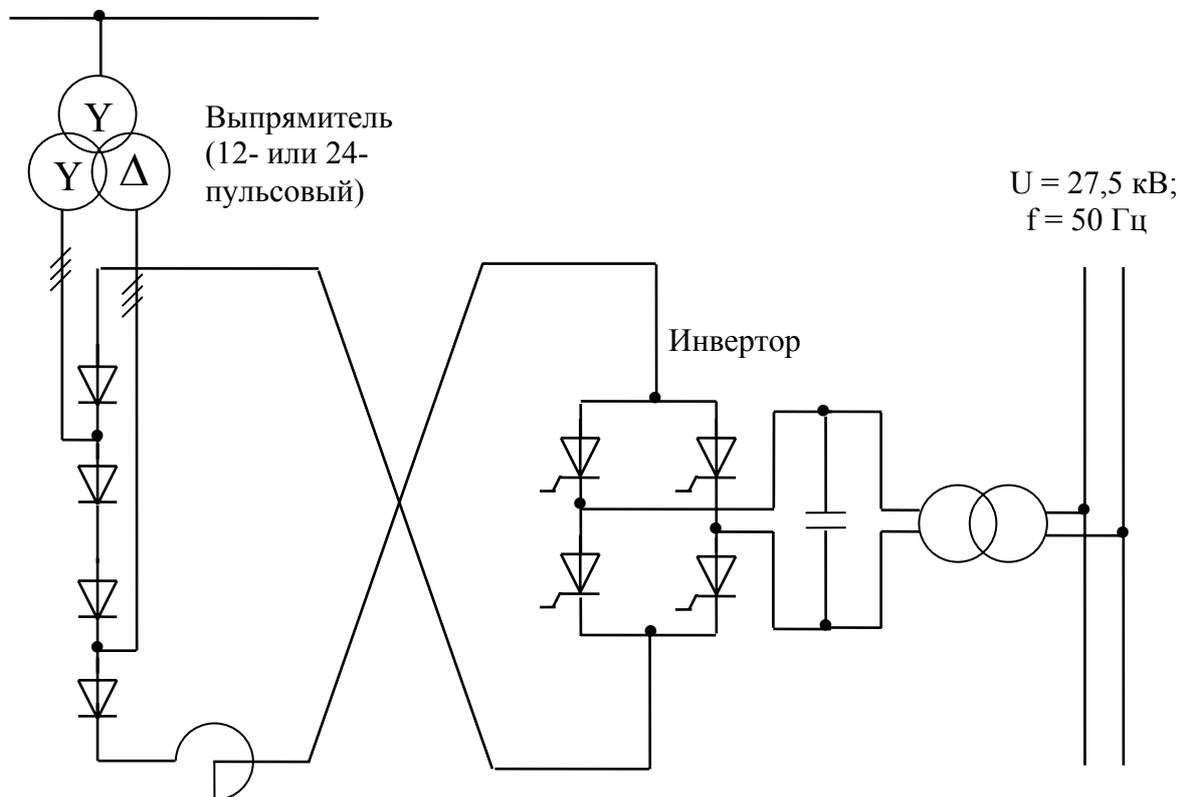


Рис. 26. Система электрической тяги с промежуточным звеном постоянного тока

Таким образом, тяговая подстанция электрической железной дороги при установленном на ней преобразователе (выпрямитель-инвертор) будет представлять собой симметричный приемник электрической энергии с практически синусоидальной формой кривой потребляемого тока и малым значением потребляемой реактивной мощности. Это исключает наиболее выраженные недостатки, присущие тяговым подстанциям переменного тока с установленными на них обычными трансформаторами, а, следовательно, и необходимость установки сложных и дорогостоящих дополнительных устройств, обеспечивающих симметрирование системы потребляемых токов, фильтрацию высших гармонических составляющих и снижение потребления реактивной мощности. При схеме

двухстороннего питания тяговой сети исключаются уравнивающие токи и потери электрической энергии.

На выходе инвертора будет иметь место однофазный переменный ток напряжением 27,5 кВ, частотой 50 Гц. Таким образом, в системе электрической тяги с промежуточным звеном постоянного тока используются:

1) схема тягового электроснабжения электрической железной дороги переменного тока с напряжением в контактной сети 25 кВ (или выше, если это потребуется);

2) серийно выпускаемые электровозы переменного тока, обладающие высокими тяговыми свойствами.

Значительный технико-экономический эффект будет получен и при замене рассматриваемой системой электрической тяги системы электрической тяги постоянного тока напряжением 3 кВ (уменьшение числа тяговых подстанций, увеличение напряжения в тяговой сети, снижение потерь электрической энергии в тяговой сети, устранение станций стыкования, улучшение показателей качества электрической энергии).

Следовательно, система электрической тяги с промежуточным звеном постоянного тока исключает наиболее выраженные недостатки как системы электрической тяги постоянного тока, так и системы электрической тяги переменного тока.

Рассматриваемая система электрической тяги с промежуточным звеном постоянного тока позволяет использовать и подвижной состав с трехфазными асинхронными тяговыми электродвигателями.

Создание специализированных высокоскоростных железнодорожных магистралей более остро ставит вопрос обеспечения надежного и экономичного токосъема при передаче электроэнергии в несколько мегаватт электрическому подвижному составу, перемещающемуся со скоростями более 100 м/с.

Контактная система токосъема в этих условиях не отвечает предъявленным требованиям, поэтому во многих странах [19, 20], в том числе и в России [21, 22], проводятся исследования по использованию способов токосъема без механического взаимодействия токосъемных устройств.

К альтернативным методам электроснабжения электроподвижного состава относят следующие:

- емкостный;
- индуктивный;
- волновой;
- жидкостный;
- электродуговой и др.

Из всего многообразия способов токосъема при высокоскоростном движении электрического подвижного состава предпочтение отдается электродуговому, преимущества которого заключаются в следующем:

высокая скорость перемещения реализуется без нарушения токосъема;

стабилизация и управление дугой достигаются с помощью управляемого магнитного поля;

износ материала контактов при магнитном управлении дугой незначителен.

По оценкам английских специалистов срок службы медного контактного провода при токосъеме с помощью дуги и скорости экипажа выше 33,3 м/с составляет не менее 50 лет. Это превышает срок службы провода при скользящем контакте и существенных скоростях движения.

В Омском государственном университете путей сообщения проведены исследования по созданию модели электродугового токосъемного устройства [23]. Токоприемник имеет аэродинамическое крыло в качестве сглаживающего элемента при переходе с одного вида токосъема на другой и контактный способ поджига силовой дуги (рис. 27).

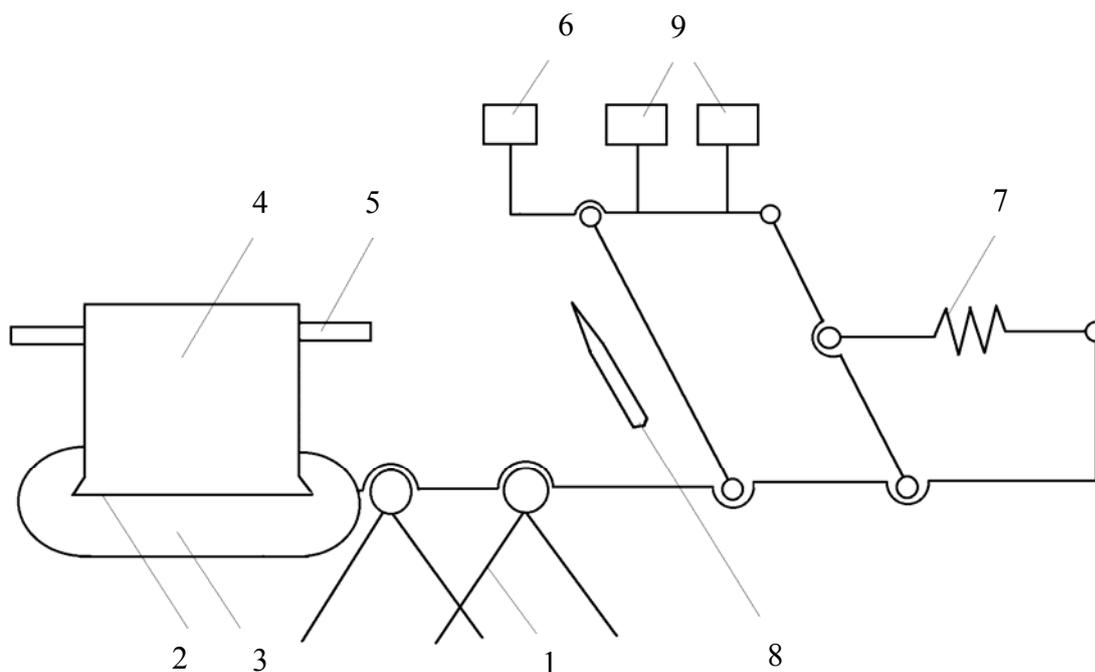


Рис. 27. Токоприемник для электродугового токосъема

Рассмотрим эту схему. Приведение токоприемника в рабочее положение (см. рис. 27) осуществляется поднятием основания 2, расположенного на основной раме 1 до заданной высоты. В режиме контактного токосъема токосъемные пластины 9 прижимаются к токопроводу пружиной 7, которая соединена с приводом, выполненным в виде

аэродинамического элемента 8. При повышении скорости на аэродинамический элемент 8 воздействует набегающий поток. Под действием возрастающей аэродинамической силы контактное устройство постепенно отводится от токопровода. При достижении заданной скорости контактные пластины 9 отходят от токопровода, зажигается электрическая дуга, которая переходит на пластину 6, отрывающуюся последней, а с нее на электрод 5, расположенный между торцами магнитопровода 4 электромагнитной катушки 3. Это происходит за счет втягивания ее магнитным полем катушки 3. В режиме плазменного токосъема передача энергии от токопровода к токоприемнику осуществляется через каналы плазмы горячей электрической дуги.

Указанный токоприемник предназначен для специального высокоскоростного транспорта. Разработан образец и для электроподвижного состава магистральной железной дороги [24].