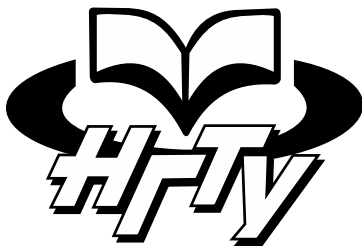


# Монографии НГТУ

---

Серия основана в 2004 году



## **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ «МОНОГРАФИИ НГТУ»**

д-р техн. наук, проф. (председатель) *Н.В. Пустовой*  
д-р техн. наук, проф. (зам. председателя) *А.Г. Вострецов*  
д-р техн. наук, проф. (отв. секретарь) *В.Н. Васюков*

д-р техн. наук, проф. *А.А. Батаев*  
д-р техн. наук, проф. *А.А. Воевода*  
д-р техн. наук, проф. *В.В. Губарев*  
д-р техн. наук, проф. *В.И. Денисов*  
д-р физ.-мат. наук, проф. *А.К. Дмитриев*  
д-р физ.-мат. наук, проф. *В.Г. Дубровский*  
д-р филос. наук, проф. *В.И. Игнатьев*  
д-р филос. наук, проф. *В.В. Крюков*  
д-р техн. наук, проф. *Г.И. Расторгуев*  
д-р физ.-мат. наук, проф. *В.А. Селезнев*  
д-р техн. наук, проф. *Ю.Г. Соловейчик*  
д-р техн. наук, проф. *А.А. Спектор*  
д-р юрид. наук, доц. *В.Л. Толстых*  
д-р техн. наук, проф. *А.Г. Фишов*  
д-р экон. наук, проф. *М.В. Хайруллина*  
д-р техн. наук, проф. *В.А. Хрусталеv*  
д-р техн. наук, проф. *А.Ф. Шевченко*

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ



НОВОСИБИРСК  
2 0 1 4

УДК 621.33.01(075.8)

Б 649

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *В.П. Горелов*

д-р техн. наук, профессор *В.Ю. Нейман*

**Бирюков В.В.**

Б 649 Энергетические аспекты функционирования транспортных систем: монография / В.В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 264 с. (Серия «Монографии НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-2538-1

В монографии рассмотрен комплекс вопросов, связанных с экономией электрической энергии во всех элементах технологической цепочки городского электрического транспорта от источника питания (тяговой подстанции) до подвижного состава.

Книга предназначена для специалистов в области электрического транспорта и студентов в качестве дополнительного источника при формировании целостного взгляда на состояние дел и перспективы развития энергосбережения на электрическом транспорте.

УДК 621.33.01(075.8)

ISBN 978-5-7782-2538-1

© Бирюков В.В., 2014

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2014

# ENERGY SAVINGS IN TRANSPORT

Monograph



NOVOSIBIRSK  
2 0 1 4

UDC 621.33.01(075.8)  
B 649

Reviewers:

Prof. V.P. Gorelov, D.Sc (Eng)  
Prof. V.Ju. Neiman, D.Sc (Eng)

**Biryukov V.V.**

B 649      Power Aspects of Transports System Operation : monograph /  
V.V. Biryukov. – Novosibirsk: NSTU Publisher, 2014. – 264 pp.  
(«NSTU Monographs» series).

ISBN 978-5-7782-2538-1

The complex of questions concerned with energy savings in all elements of transport system from power source (traction substation) to electric transport vehicle are considered in monograph.

The book is oriented to transport specialists and students as additional source in process of forming of complicated opinion on current state and perspectives of energy savings development in transport.

**UDC 621.33.01(075.8)**

**ISBN 978-5-7782-2538-1**

© Biryukov V.V., 2014  
© Novosibirsk State  
Technical University, 2014

*45-летию кафедры «Электротехнические комплексы»  
(«Электрический транспорт») посвящается*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Высокие темпы урбанизации населения вызвали стремительный рост объемов грузо- и пассажироперевозок не только внутри городов, но и между населенными пунктами. Значительная доля этих перевозок падает на электрический транспорт, который, как известно, на сегодняшний день наиболее экологически чистый, а следовательно, и более привлекательный в плане защиты окружающей среды.

В течение последних десятилетий ведутся интенсивные работы по созданию новых и модернизации известных видов транспорта как с электрическими, так и с тепловыми двигателями, направленные на повышение его комфортности, динамичности, экологичности, на энергосбережение и т. д.

Успехи в области транспортных средств с электрическими двигателями были predetermined, прежде всего, бурным развитием элементной базы силовой полупроводниковой техники, внедрение которой на подвижном составе электрического транспорта позволило разработать принципиально новые тяговые приводы, позволяющие добиваться существенной экономии энергии, затрачиваемой на нужды электрической тяги.

Электрический транспорт, как известно, представляет собой сложный электротехнический комплекс, включающий в себя в общем виде источники электрической энергии, устройства ее транспортировки, потребителей (подвижной состав) и т. д. Функционирование каждого из них сопровождается потреблением дополнительной энергии, покрывающей внутренние потери в устройствах. Поэтому несмотря на относительно высокий КПД электрического двигателя (до 92...95 %), преобразующего электрическую энергию в механическую, общий КПД электрической тяги (с учетом потерь во всех элементах комплекса) лежит в пределах 60 %.

Вопросам энергосбережения на электрическом транспорте всегда уделялось значительное внимание, что позволило добиться ощутимых



результатов по экономии электроэнергии. В качестве примера следует привести тот факт, что на наземном электрическом транспорте сокращение расхода энергии на движение при замене резисторно-контакторных систем управления на полупроводниковые позволяет сэкономить от 20 до 30 % от потреблявшейся ранее.

Определенные успехи в деле энергосбережения достигнуты и в системе электроснабжения, и на эксплуатационных предприятиях. Однако целостный подход к энергосбережению на транспорте как электро-техническом комплексе освещался лишь в отдельных публикациях. Ранее автором предпринималась попытка разработать методологию практической оценки состояния и поиска путей эффективного энергосбережения на городском электрическом транспорте, получившая отражение в монографии «Экономия электрической энергии на электрическом транспорте».

Однако за последнее время появилось довольно большое количество публикаций о применении комбинированного привода, объединяющего в себе тепловые и электрические машины. Здесь необходимо отметить, что идея применения в тяговом приводе тепловых и электрических машин не нова – существует такая разновидность транспорта, как теплоэлектрический, где это с успехом реализуется несколько десятилетий. Вместе с тем повышенный интерес к внедрению электрических машин в тяговых приводах с тепловыми двигателями вызван в первую очередь стремлением сэкономить энергию, затрачиваемую на движение транспортного средства (т. е. горючее), чего можно добиться только за счет использования энергии торможения подвижного состава, а это проще всего реализуется с помощью электрических машин. Но в отличие от теплоэлектрического подвижного состава электрическая машина в приводе может иметь значительно меньшую мощность.

На электрическом транспорте проходят испытания опытных образцов подвижного состава, получающего питание от контактной сети и источника на борту. Это позволяет сэкономить не только электроэнергию, но и определенные материальные ресурсы (контактную сеть, тяговые подстанции и т. д.).

Книга состоит из четырех глав, в первой из которых рассматриваются вопросы энергосбережения на подвижном составе.



Вторая глава посвящена исследованию системы электроснабжения, включающей в себя источник энергии (тяговую подстанцию) и тяговые сети.

В третьей главе рассматриваются вопросы, связанные с проектированием тяговых приводов с комбинированной энергетической установкой.

В четвертой главе рассматриваются вопросы энергосбережения на транспортном предприятии, осуществляющем эксплуатацию и ремонт подвижного состава.

Автор признателен сотрудникам кафедры «Электротехнические комплексы» Новосибирского государственного технического университета С.А. Евдокимову, кандидатам технических наук доцентам В.И Сопову и М.В. Калугину, доктору технических наук профессору Г.Н. Ворфоломееву, а также доктору технических наук профессору В.П. Горелову и доктору технических наук, профессору В.А. Нейману за ценные замечания, сделанные при прочтении рукописи.

## ВВЕДЕНИЕ

Состав основных элементов систем городского пассажирского транспорта определяется, прежде всего, видом используемых в них транспортных средств – подвижного состава. В общем виде система включает в себя (рис. В1):

- подвижной состав;
- систему электроснабжения;
- путевые устройства;
- эксплуатационные предприятия;
- устройства организации движения.



Рис. В1. Структура транспорта

В зависимости от вида транспорта система может не содержать некоторых элементов. Так, например, при обслуживании пассажироперевозок только троллейбусом из системы исключаются путевые устройства (поскольку используется общая с автотранспортом путевая струк-

тура), а также служба организации движения, которая может быть объединена с аналогичной автомобильной службой. Вместе с тем в системе сохраняются такие элементы, как система централизованного электроснабжения и эксплуатационные предприятия, без которых невозможна работа подвижного состава.

Эти же элементы являются основными потребителями электроэнергии и вносят свой «вклад» в общие потери энергии в системе.

Рис. В2 отражает структурную схему расхода энергии, получаемой от источника потребителем. Источником служит система внешнего электроснабжения, которой может быть электрическая станция, соединенная с тяговой подстанцией воздушными или кабельными линиями электропередачи. Преобразование электроэнергии на подстанции сопровождается ее потерями, которые и отражены на рисунке в виде потерь  $\Delta P_{т.п/ст.}$ . Электроэнергия к потребителю подается посредством тяговой сети, включающей в себя контактную и рельсовую сети, питающие кабельные или воздушные линии. Потери тяговой сети  $\Delta P_{т.с}$  отражаются на рисунке. Оставшаяся часть потребленной от источника энергии поступает на подвижной состав, где распределяется:

- между тяговым электроприводом;
- нетяговыми потребителями;
- системой управления.

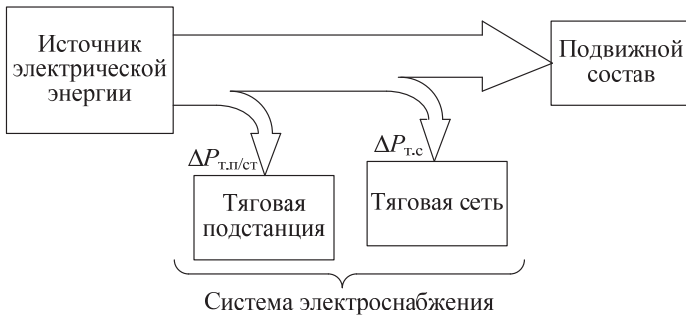


Рис. В2. Потребители энергии

В зависимости от вида электрического транспорта составляющие потерь в каждом из элементов системы разные, но их процентное соотношение различается несущественно. Поскольку наземные виды массо-



вого городского транспорта (трамвай, троллейбус) питаются, как правило, от одних и тех же подстанций, определить долевое участие каждого из них в создании потерь в системе электроснабжения затруднительно и можно оценить только через удельные показатели энергопотребления, в качестве которых выступают затраты энергии на перевозку одной тонны груза (пассажирской нагрузки) на расстояние в один километр. Так, в частности, удельный расход энергии на подвижном составе трамвая в среднем составляет  $35...80 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ , для троллейбуса –  $150...180 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ , для метрополитена –  $50...70 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ . При этом для подвижного состава, например троллейбуса, оснащенного реостатно-контакторной системой управления, характерно следующее процентное соотношение в распределении потребленной энергии между элементами системы тяговая подстанция–тяговая сеть–подвижной состав:

- тяговая подстанция – до 5 %;
- тяговая сеть – до 10 %;
- подвижной состав – свыше 85 %.

На самом подвижном составе распределение энергии между основными потребителями выглядит следующим образом:

- на преодоление сил сопротивления движению – до 46 %;
- на собственные нужды – до 10 %;
- на покрытие потерь в тяговом двигателе – до 10 %;
- на потери в пускотормозных резисторах – до 17 %.

Использование на подвижном составе импульсных систем управления позволяет исключить потери в пускотормозных резисторах, а также несколько уменьшить потери в тяговой сети и на подстанции.

С учетом расхода электроэнергии на эксплуатационных предприятиях суммарные удельные показатели расхода электрической энергии возрастают.

В целях сокращения потребления энергии необходимо произвести структуризацию потерь по всем элементам системы, выявить направления, по которым следует решать проблему их снижения, а также оценить возможности их реализации в настоящей момент и на перспективу.



## ГЛАВА 1

# ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ

**П**отребляемая подвижным составом электрического транспорта при совершении пассажиро- и грузоперевозок электрическая энергия расходуется главным образом на преодоление сил сопротивления движению, которые зависят от целого ряда факторов. Эти факторы можно подразделить на две группы: силы сопротивления движению, зависящие от транспортного средства, которые условно можно назвать внутренними, и не зависящие от подвижного состава, которые можно назвать внешними. Последние обусловлены [1]:

- состоянием путевой структуры;
- профилем пути (наличием уклонов, подъемов, кривых, тоннелей и т. д.);
- режимом вождения подвижного состава (зависит от квалификации водителя);
- качеством электроэнергии (пульсация питающего напряжения, его уровень и т. д.);
- скоростным режимом движения (снижение скорости движения на перегоне уменьшает расход энергии, но увеличивает время в пути).

В качестве примера, иллюстрирующего влияние состояния путевой структуры на расход энергии, можно привести тот факт, что, например, на железнодорожном транспорте при укладке бесстыкового пути из рельсов тяжелого типа, железобетонных шпал и мощного щебеночного балласта основное сопротивление движению грузового вагона массой 18 т на ось при скорости движения 100 км/ч снизилось на 13...15 %.

Не менее значительно на расход энергии влияет и профиль пути, поскольку любое отклонение его от прямолинейного и горизонтального



приводит к появлению дополнительных потерь, на преодоление которых расходуется энергия. Чтобы снизить эти потери, надо по возможности уменьшать крутизну уклонов и увеличивать радиус кривых.

Немаловажным фактором, влияющим на расход энергии на движение, является соблюдение режима вождения подвижного состава, что напрямую зависит от квалификации водителя (машиниста). На любом по длине и профилю перегоне всегда существует оптимальный режим управления поездом, соответствующий минимуму потребления энергии при соблюдении заданной средней скорости движения. Режим этот определяется теоретически на основе построения кривых движения. Однако в реальных условиях движение транспортных средств всегда подвержено мешающему влиянию внешних факторов, главный из которых – подвижной состав других видов транспорта, перемещающийся в попутном направлении (стоящий на той же полосе движения). Исключить подобное воздействие можно лишь выделением обособленной полосы движения либо обособленного полотна дороги. Последнее, кроме того, будет способствовать повышению скорости движения на перегоне при условии использования эстакад и тоннелей.

Из всех показателей качества питающей подвижной состав электроэнергии, регламентированных Госстандартом, наиболее значительно на расход энергии влияет уровень напряжения [2]. Снижение напряжения на токоприемнике подвижного состава приводит к необходимости увеличивать длительность потребления электроэнергии на перегоне в целях соблюдения требований скоростного режима. Это не только увеличивает потери, но и изменяет режим работы элементов электрооборудования, что сопровождается его дополнительным нагревом.

Снижение скоростного режима движения приводит, с одной стороны, к уменьшению расхода энергии на движение одной единицей подвижного состава, но с другой стороны – к сбою графика движения и, как правило, к последующему перерасходу ее при нагоне. Намеренное же занижение скорости на перегоне при составлении графика движения уменьшает провозную способность транспорта со всеми вытекающими отсюда последствиями. Повышение скорости движения (при условии соблюдения требований безопасности) всегда приводит к увеличению расхода энергии, и целесообразность такого повышения должна подкрепляться экономическими расчетами.

Факторы, определяющие силы сопротивления движению и зависящие от подвижного состава, сводятся к следующим [1]:

- конструктивное исполнение кузова и ходовых частей;
- составность поезда;
- техническое состояние подвижного состава.

При перемещении подвижного состава, как известно, одной из составляющих сил сопротивления движению являются силы сопротивления воздушной среды, возрастающие пропорционально квадрату скорости движения транспортного средства. Эти силы зависят как от площади поперечного и продольного сечения кузова, так и от конфигурации его лобовой и хвостовой части. Многочисленные исследования влияния формы кузова подвижного состава на величину действующих на него аэродинамических сил сопротивления показали, что:

- придание лобовой и хвостовой части транспортного средства обтекаемой формы способствует уменьшению сил сопротивления до двух и более раз;
- шарнирно-сочлененная конструкция кузова поезда способствует уменьшению сил сопротивления движению за счет исключения воздействия воздушной среды на лобовые и хвостовые части промежуточных вагонов.

В качестве примера можно привести результаты аэродинамических испытаний моторных вагонов, показавших, что если силы, воздействующие на головной вагон, принять за 100 %, то силы воздействующие на промежуточный, составят 20 %, а на хвостовой – 30...35 %. Применение специальных обтекателей-хвостовиков на последнем вагоне электропоезда ЭР200 позволили снизить аэродинамические силы сопротивления на 4...5 %, а гофрированных уплотнителей между вагонами – на 7...8 %. Сходных результатов следует ожидать и от подвижного состава, работающего по системе многих единиц.

Уменьшение сопротивления воздушной среды на 5...10 % дает снижение основного сопротивления движению на 2...2,5 % при скорости движения 60 км/ч.

Существенно влияет на расход энергии техническое состояние подвижного состава. Известны случаи, когда некачественный ремонт ходовых частей (в частности тормозной системы) приводил к увеличению основного сопротивления движению за счет постоянного подтормаживания колес во время движения. Для исключения подобных явле-



ний на эксплуатационных предприятиях необходимо использовать средства технического контроля и диагностики подвижного состава.

Значительных успехов в деле экономии электроэнергии на подвижном составе удалось достичь с переходом на использование в качестве регуляторов полупроводниковой преобразовательной техники. Внедрение тиристорных и транзисторных преобразователей позволило не только снизить расход энергии при пуске, но и обеспечить возврат в процессе рекуперативного торможения ее части от потребленной при разгоне подвижного состава.

### **1.1. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА КАК ОБЪЕКТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Подвижной состав, как основной потребитель электрической энергии, представляет собой достаточно сложный электротехнический комплекс, энергия на котором потребляется, во-первых, тяговым приводом, где происходит преобразование части электрической энергии в механическую; во-вторых, собственными нуждами и, в-третьих – вспомогательным и дополнительным электрооборудованием. Чтобы более детально проанализировать механизм расхода потребленной энергии и выявить пути снижения непроизводительных ее потерь, необходимо структурировать расход электроэнергии на подвижном составе.

Независимо от вида транспорта и типа подвижного состава, схемного решения электрических цепей и применяемой элементной базы потребление электрической энергии оборудованием транспортного средства может быть представлено в виде структурной схемы (рис. 1.1).

Тяговый электрический привод, как наиболее энергоемкий потребитель, включает в себя совокупность элементов, обеспечивающих преобразование электрической энергии в механическую, реализуемую в виде тягового усилия, например, на ободу колеса. Проанализируем электропривод с целью определения путей сокращения потерь в нем энергии.

Структурная схема тягового электропривода [3], приведенная на рис. 1.2, включает в себя: источник энергии – ИЭ, преобразователь энергии – Пр, электромеханический преобразователь (тяговый электродвигатель) – ЭМПр, механическую передачу (трансмиссию) – МП и движитель (например, колесо) – Дв.

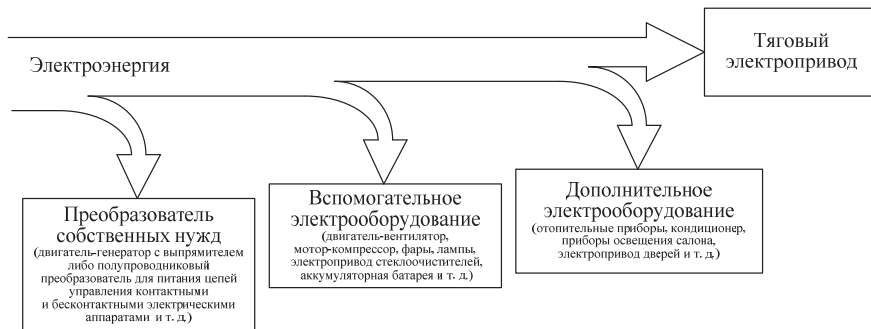


Рис. 1.1. Потребители энергии

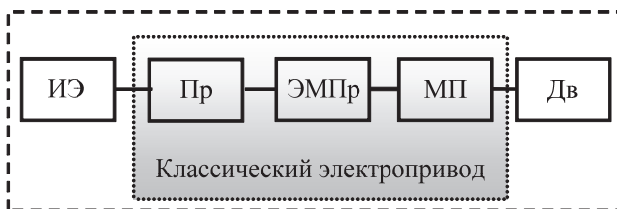


Рис. 1.2. Структурная схема тягового привода

Исходными данными для проектирования любого тягового электропривода служат, как правило, вид подвижного состава, его вместимость (грузоподъемность), максимальная скорость, напряжение источника питания и некоторые другие, ни в коей мере не определяющие однозначно параметры всех элементов привода. Вместе с тем нельзя не отметить, что изменение параметров одного из элементов привода неизбежно вызывает необходимость изменять параметры (схемные решения, элементную базу и т. д.) и остальных элементов.

В процессе проектирования для любого вида транспорта определяются:

- тип движителя, его несущая способность и габаритные размеры;
- тип привода (индивидуальный, групповой, дифференциальный), передаточное отношение механической передачи, состав ее элементов;
- мощность тягового двигателя (а также суммарная мощность тяговых двигателей подвижного состава), род тока, величина номинального напряжения, КПД и т. д.;



- тип преобразователя (постоянно-постоянного тока, постоянно-переменного тока и т. д.), его мощность, количество фаз и пр.;
- вид источника энергии, его номинальное напряжение и мощность и т. д.

Каждый из перечисленных элементов тягового привода обладает КПД, величина которого влияет на общий КПД электропривода, т. е. отражает потери энергии в приводе в целом.

В соответствии с рис. 1.1 потребленная от источника энергия расходуется на питание вспомогательного и дополнительного оборудования и преобразователя собственных нужд, в которых также происходит потеря электрической энергии.

Преобразователь собственных нужд современного подвижного состава, например наземного транспорта, выполняемый на базе полупроводниковых элементов, предназначен для обеспечения питанием потребителей суммарной мощностью  $P_{\text{сн}} = 5 \dots 6$  кВт, что составляет не более 3...5 % от мощности тяговых электродвигателей.

В зависимости от типа подвижного состава, вида транспорта, схемного решения его электрических цепей мощность установленного на нем вспомогательного электрооборудования  $P_{\text{всп}}$  не превышает 5...10 % от мощности тяговых электродвигателей, а с использованием системы принудительной вентиляции преобразователей и двигателей – 20...25 %.

Мощность дополнительного оборудования  $P_{\text{доп}}$ , устанавливаемого на подвижном составе, в значительной мере определяется стремлением обеспечить комфортность перевозок. Так, в частности, требование по поддержанию необходимой температуры в салоне подвижного состава в зимнее время привело к установке отопительных приборов суммарной мощностью до 20...25 % от мощности тяговых электродвигателей.

## 1.2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Один из путей улучшения транспортного обслуживания населения городов – это сокращение времени поездки пассажира за счет уменьшения транспортной составляющей. В условиях сложившейся транспортной сети города уменьшить транспортную составляющую можно



только повышением скорости сообщения, обеспечивая при этом безопасность движения и минимум комфорта, одним из условий которого будет ограничение ускорения при пуске и замедления при торможении величиной  $[a_{\text{доп}}] = 1,5 \text{ м/с}^2$  [4]. Скорость сообщения, как известно, зависит от величины тягового усилия, определяемого мощностью двигателя. История развития транспорта показывает, что модернизация подвижного состава сопровождается увеличением мощности тягового двигателя при сохранении вместимости его салона (т. е. при сохранении веса экипажа). Однако возрастание мощности не может быть беспредельным, так как при этом:

- увеличиваются вес и стоимость оборудования (электродвигателя, регулирующей аппаратуры и т. д.);
- растут габариты оборудования, что может вызвать проблемы с его размещением на подвижном составе;
- возникает вероятность недоиспользования его мощности, а значит, необоснованное увеличение капитальных затрат и, как следствие – увеличение срока окупаемости и стоимости проезда, т. е. снижение конкурентной способности.

Поэтому определение оптимальной величины мощности мотора – одна из важнейших задач при проектировании новых типов подвижного состава.

### 1.2.1. ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ВЕЛИЧИНУ МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Показатели динамичности подвижного состава (величины ускорений и замедлений, максимальная и средняя скорость движения на перегоне и др.) любого вида транспорта, в том числе и электрического, определяются различными факторами, основными из которых в соответствии с законами Ньютона являются масса и ускорение:

$$F = ma,$$

где  $F$  – приложенное (развиваемое тяговыми двигателями) к подвижному составу усилие, называемое иногда тяговым;

$m$  – масса подвижного состава, включающая в себя массу тары и массу полезной нагрузки;

$a$  – ускорение при разгоне.



Поскольку подвижной состав содержит массы, совершающие помимо поступательного еще и вращательное движение, запасаемая при его разгоне кинетическая энергия учитывается в формуле введением коэффициента вращающихся масс  $\gamma$  [1]:

$$F = (1 + \gamma) ma.$$

Энергия, запасаемая вращающимися массами при разгоне, не превышает, как правило, 15...20 % от общей энергии подвижного состава городского электрического транспорта и 20...40 % – магистрального.

Реализуемое на ободе колеса тяговое усилие  $F_t$  есть результат взаимодействия создаваемого на валу тягового двигателя электромагнитного момента и момента от внутренних сил сопротивления тягового электропривода, приведенных к ободу колеса:

$$F_t = F_{эм} - \Delta F,$$

где  $F_{эм} = c_m \Phi I / i_{ред} R_k$  – приведенная к ободу движущего колеса электромагнитная сила, развиваемая электродвигателем;

$c_m$  – механическая постоянная двигателя;

$\Phi$  – поток магнитного поля двигателя;

$I$  – ток двигателя;

$i_{ред}$  – передаточное число трансмиссии подвижного состава;

$R_k$  – радиус движущего колеса подвижного состава;

$\Delta F$  – силы сопротивления, обусловленные наличием электрических, магнитных и механических потерь в тяговом электродвигателе и механической передаче тягового привода.

При движении поезда развиваемое тяговыми двигателями усилие преодолевает не только внутренние, но и внешние силы сопротивления движению  $W$ , зависящие от целого ряда факторов, на которых остановимся ниже.

Создаваемое на колесе тяговое усилие должно не только преодолевать силы сопротивления движению, но и придавать ускорение подвижному составу до тех пор, пока при некоторой скорости  $v$  равнодействующая сил тяги и сопротивления движению не обратится в 0. Величина удельного (приведенного к единице веса подвижного состава) сопротивления движению  $w$  рассчитывается по известной формуле [1]

$$w = a + bv + cv^2 + w_i,$$



где  $a, b, c$  – коэффициенты, зависящие как от типа подвижного состава, так и от режима движения (под током или без тока);

$w_i$  – удельное сопротивление движению подвижного состава от уклона (принимаемое, например, на стандартном перегоне равным  $w_i = 3 \text{ ‰}$ ).

С учетом сказанного развиваемая на ободу колеса движущая сила  $F_d$  может быть определена из выражения

$$F_d = F_t - G_{\text{ПС}}(a + bv + cv^2 + w_i) = (1 + \gamma)a_{\text{п}}G_{\text{ПС}} / g,$$

где  $G_{\text{ПС}}$  – вес подвижного состава (при номинальном наполнении).

При использовании в качестве приводного электродвигателя постоянного тока с учетом характера работы на подвижном составе рекомендуется в процессе пуска форсировать его мощность, допуская практически ее удвоение по отношению к мощности длительного режима работы. С учетом этого замечания единичная мощность тягового двигателя

$$P_{\text{дв}} = P / 2n_{\text{до}},$$

где  $n_{\text{до}}$  – количество движущих (обмоторенных) осей ходовых частей при индивидуальном приводе.

В точке  $a$  (рис. 1.3,  $a$ ) автоматической характеристики полного поля тяговый электродвигатель развивает максимальную мощность. Однако скорость движения при этом существенно отличается от максимальной. Для дальнейшего разгона при пусковом токе производится ослабление поля электрической машины. Ослабление поля электродвигателя при максимальном (пусковом) токе  $I_{\text{п}}$  приводит к уменьшению величины крутящего момента на валу якоря в соответствии с известным соотношением  $M_{\text{дв}} = c_{\text{м}}\Phi I_{\text{п}}$ . Поскольку максимально допустимое ослабление поля  $\Phi_{\text{оп}}$  электродвигателя по условиям коммутации тока на коллекторе может достигать  $\alpha = 35 \text{ ‰}$  от номинальной величины  $\Phi_{\text{нп}}$  при полном поле ( $\Phi_{\text{оп}} = \alpha\Phi_{\text{нп}}$ ), для реализации расчетного момента на ободу колеса (точка  $b$  на рис. 1.3,  $a$ ) необходимо соответственно увеличить пусковой ток электродвигателя, что приводит к необходимости наращивать его мощность, которая с учетом потерь в элементах привода, передающих крутящий момент с вала якоря на обод колеса, определяется выражением



$$P_{\text{дв}} = P / 2\alpha n_{\text{до}} \eta_{\text{дв}} \eta_{\text{МП}},$$

где  $\eta_{\text{дв}}$  и  $\eta_{\text{МП}}$  – КПД тягового электродвигателя и механической передачи соответственно.

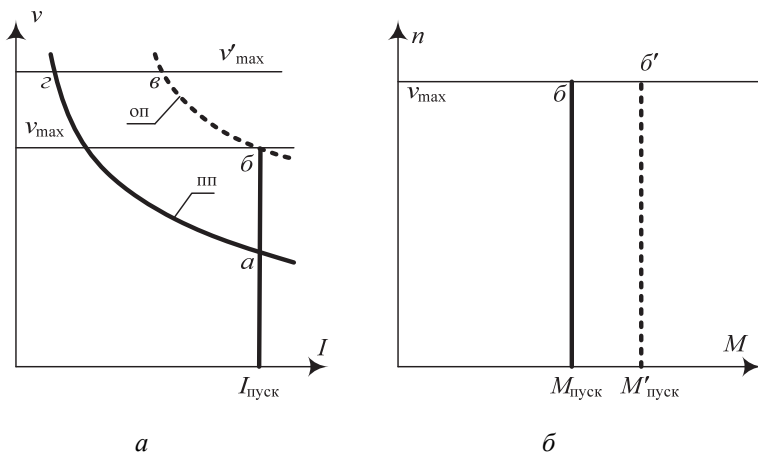


Рис. 1.3. Характеристики двигателей

В том случае, когда конструктивное исполнение ходовых частей не позволяет использовать тяговый электродвигатель расчетной мощности из-за его больших габаритных размеров, максимальная скорость может быть достигнута в точке  $в$  характеристики ослабленного поля. Разгон по этой характеристике (до точки  $в$  на рис. 1.3,  $а$ ) приводит к снижению динамических показателей подвижного состава вследствие уменьшения крутящего момента.

Для асинхронного электродвигателя, имеющего жесткую электро-механическую характеристику (рис. 1.3,  $б$ ), справедливо выражение

$$P_{\text{дв}} = P / 2n_{\text{до}} \eta_{\text{ТЭД}} \eta_{\text{МП}}.$$

Поскольку ослабление поля асинхронного электродвигателя невозможно, мощность наращивается только за счет увеличения тока ротора (переход из точки  $б$  в точку  $б'$ ), что приводит к возрастанию его габаритных размеров.

Действующая на подвижной состав сила  $F_{\text{д}}$  при увеличении скорости движения требует для преодоления сил сопротивления движению постоянного нарастания развиваемой тяговыми двигателями мощности.



В настоящее время существует несколько методов расчета мощности тягового двигателя. Величина мощности может быть определена по эмпирическим зависимостям, привязанным либо к весу подвижного состава, либо к его вместимости. В частности, удельная, т. е. отнесенная к единице веса подвижного состава, мощность двигателя троллейбуса или суммарная мощность двигателей трамвая определяется по формуле [5]

$$P / G_{\text{ПС}} = 7 / \sqrt{av_{\text{пуск}} / 1,3 \cdot 20} \sqrt[3]{v_{\text{уст}} / 60}, \quad (1.1)$$

а для вагона метро

$$P / G_{\text{ПС}} = 7 / \sqrt{av_{\text{пуск}} / 1,3 \cdot 25} \sqrt[3]{v_{\text{уст}} / 90}, \quad (1.2)$$

где  $P$  – мощность электродвигателя;

$G_{\text{ПС}}$  – вес экипажа;

7 – эмпирический коэффициент;

$a$  – численное значение ускорения при пуске;

$v_{\text{п}}$  – пусковая скорость (скорость достижения автоматической характеристики полного поля);

1,3 – базовое ускорение;

20 – численное значение величины скорости достижения автоматической характеристики трамвая (троллейбуса) при базовом ускорении;

$v_{\text{уст}}$  – максимальная скорость проектируемого транспортного средства (конструкционная);

60 – конструкционная скорость трамвая (троллейбуса);

25 – численное значение величины скорости достижения автоматической характеристики вагона метро при базовом ускорении;

90 – конструкционная скорость вагона метро.

Суммарная мощность двигателей подвижного состава может быть определена и как [6]

$$P = (1 \dots 1,5) \Omega, \quad (1.3)$$

где  $\Omega$  – численное значение вместимости салона подвижного состава.

Величина мощности мотора может быть определена и из условия достижения автоматической характеристики при максимально допустимом ускорении

$$P = a G_{\text{ПС}} v_{\text{пуск}}. \quad (1.4)$$



Анализ формул (1.1)–(1.4) показывает, что при одних и тех же исходных данных мощность мотора, рассчитанная по каждой из них, различна. Действительно, при одинаковой вместимости и весе экипажа для разгона его с допустимым ускорением до достижения автоматической характеристики для трамвайного вагона весом 25 тонн (со 130 пассажирами) мощность двигателя согласно (1.1) составляет 188 кВт, согласно (1.3) – 130...195 кВт, согласно (1.4) – 208 кВт. Существенный разброс результатов объясняется тем, что значения входящих в формулы эмпирических коэффициентов носят субъективный характер и выбраны на основе достигнутых к моменту появления формул успехов в транспортном машиностроении, а не строго обоснованных расчетов. Такие расчеты могут быть проведены с помощью определения расхода энергии по кривым движения поезда, построенным, например, графоаналитическим способом, при соблюдении определенных требований. Эти требования можно сформулировать следующим образом:

- идентичность условий движения экипажа;
- объективность критерия, которым может служить потребленная экипажем энергия (в частности удельный расход энергии на движение).

Соблюдение требований идентичности условий движения, во-первых, достигается проведением расчетов на стандартном перегоне (регламентированном Госстандартом), в качестве которого для трамваев и троллейбусов принимается перегон длиной 350 м с подъемом 3 ‰, а для метрополитена – 1700 м с подъемом 3 ‰. Во-вторых, неизменным условием является соблюдение регламентируемых для электрического транспорта требований по величинам ускорения при пуске и замедления при торможении. В-третьих, средняя скорость движения на перегоне должна быть одинаковой при различных мощностях тяговых двигателей, установленных на подвижном составе. И последнее требование касается подвижного состава, тип которого не должен изменяться при изменении мощности установленных на нем электродвигателей.

Принятие за объективный критерий удельного расхода энергии на движение не случайно, так как позволяет сопоставить между собой расход энергии на перевозку одного пассажира (или одной тонны груза) не только для однотипного подвижного состава, но и подвижного состава различных видов транспорта.



**Методика** определения оптимальной мощности мотора заключается в следующем: подвижной состав последовательно оснащается двигателями возрастающей мощности; для каждого варианта строятся кривые движения  $v(t)$ , на которые наносятся кривые потребляемого двигателями тока  $i(t)$ ; по кривым тока определяются расход электрической энергии на движение и величина удельного расхода энергии [7]. Если при этом допустить, что напряжение источника питания  $U_{KC} = \text{const}$ , и учесть, что энергия на движение  $A = \int_0^T u_{KC} i dt = U_{KC} \int_0^T i dt$ , то

подынтегральное выражение есть не что иное, как площадь фигур на кривых движения, ограниченная осями координат и кривой потребляемого двигателями тока. После определения величин удельного расхода энергии на движение по формуле  $A_{уд} = A / G_{ПС} l_{пер}$  строится зависимость  $A_{уд}(P)$  и находится оптимальная мощность мотора, которой соответствует минимальное значение  $A_{уд}$ .

В качестве примера на рис. 1.4 приведены кривые движения для вагона метро весом 58 тонн (в составе 7-вагонного поезда) с двигателями мощностью от 64 до 170 кВт, движущегося на стандартном перегоне. Из рисунка видно, что увеличение мощности тягового двигателя приводит к сокращению времени движения поезда под током. Однако величина потребляемого из сети тока при этом возрастает.

Аналогичный характер носят кривые движения подвижного состава трамвая и троллейбуса.

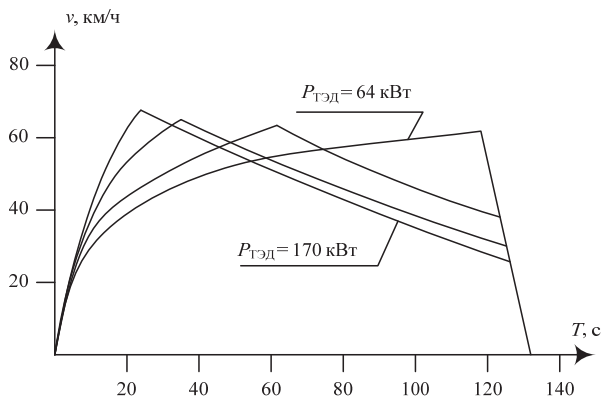


Рис. 1.4. Кривые движения с двигателями различной мощности



По результатам расчетов расхода энергии на движение подвижным составом трамвая, троллейбуса и метрополитена с различными по мощности тяговыми электродвигателями построены зависимости удельного расхода энергии  $A_{уд}$  в функции мощности двигателя  $P$  (рис. 1.5).

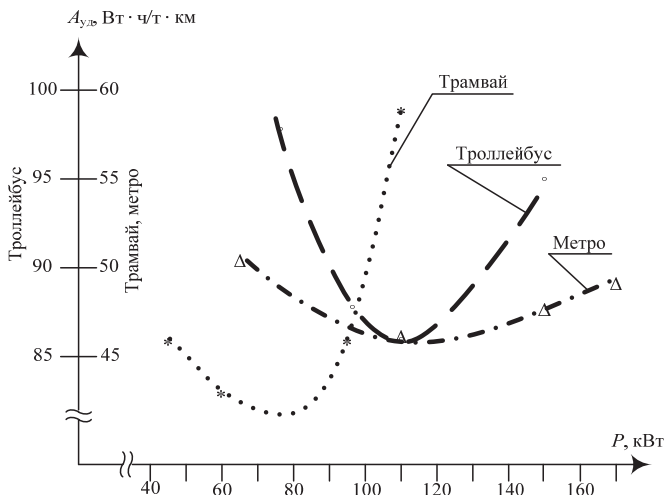


Рис. 1.5. Влияние мощности двигателя на расход энергии

Некоторые данные, характеризующие кривые движения вагона метро, приведены в табл. 1.1, троллейбуса – в табл. 1.2, трамвайного вагона – в табл. 1.3.

Таблица 1.1

| Тип двигателя                                                                | ДК-108А | ДК-117А | ДК-211А | ДК-211БМ |
|------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|----------|
| Номинальная мощность, кВт                                                    | 64      | 110     | 150     | 170      |
| Пусковой ток, А                                                              | 351     | 594     | 540     | 612      |
| Пусковое ускорение, $\text{м/с}^2$                                           | 1,22    | 1,8     | 1,8     | 1,8      |
| Время хода, с                                                                | 131     | 131     | 131     | 131      |
| Среднеходовая скорость, км/ч                                                 | 46,7    | 46,6    | 46,7    | 46,7     |
| Максимальная скорость, км/ч                                                  | 61      | 62      | 66      | 67       |
| Тормозное замедление, $\text{м/с}^2$                                         | 1,2     | 1,2     | 1,2     | 1,2      |
| Удельный расход электроэнергии, $\text{Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ | 50,2    | 46      | 48      | 49,2     |



Таблица 1.2

| Тип двигателя                                 | ДК-255Г | ДК-261А | ДК-102Г | ДК-117А |
|-----------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Номинальная мощность, кВт                     | 46      | 60      | 83      | 110     |
| Пусковой ток, А                               | 345     | 290     | 370     | 335     |
| Пусковое ускорение, м/с <sup>2</sup>          | 1,33    | 1,39    | 1,27    | 1,41    |
| Время хода, с                                 | 38      | 38      | 38      | 38      |
| Среднеходовая скорость, км/ч                  | 33      | 33      | 33      | 33      |
| Максимальная скорость, км/ч                   | 52      | 53,5    | 53,5    | 56      |
| Тормозное замедление, м/с <sup>2</sup>        | 1,5     | 1,5     | 1,5     | 1,5     |
| Удельный расход электроэнергии, Вт · ч/т · км | 46,9    | 43,9    | 46,9    | 58,8    |

Таблица 1.3

| Тип двигателя                                 | ДК-202Б | ДК-207А | ДК-210А3 | ДК-211А |
|-----------------------------------------------|---------|---------|----------|---------|
| Номинальная мощность, кВт                     | 75      | 95      | 110      | 150     |
| Пусковой ток, А                               | 288     | 345     | 396      | 480     |
| Пусковое ускорение, м/с <sup>2</sup>          | 1,25    | 1,25    | 1,25     | 1,25    |
| Время хода, с                                 | 40      | 40      | 40       | 40      |
| Среднеходовая скорость, км/ч                  | 31,5    | 31,5    | 31,5     | 31,5    |
| Максимальная скорость, км/ч                   | 49      | 49      | 49,2     | 49,5    |
| Тормозное замедление, м/с <sup>2</sup>        | 1,6     | 1,6     | 1,6      | 1,6     |
| Удельный расход электроэнергии, Вт · ч/т · км | 98,5    | 88,5    | 86       | 95      |

Анализ кривых движения (см. рис. 1.4) и удельного расхода энергии (см. рис. 1.5) показывает, что независимо от вида транспорта для каждого подвижного состава имеется некоторое значение мощности тягового электродвигателя, при котором удельный расход энергии достигает своего минимума. При уменьшении этого значения мощности удельный расход энергии начинает возрастать, что, очевидно, обусловлено увеличением времени движения поезда под током. При построении кривых движения подвижного состава на стандартном перегоне для всех рассмотренных видов транспорта в целях повышения среднеходовой скорости кривая, соответствующая минимальной мощности двигателя, в отличие от реальной не должна содержать периода выбега.



При увеличении мощности тягового электродвигателя удельный расход энергии начинает возрастать, что очевидно обусловлено ростом внешних сил сопротивления движению. Кроме того, как при уменьшении, так и при увеличении мощности двигателя снижается КПД самого двигателя, что также вызывает необходимость потребления дополнительной энергии.

Таким образом, в результате проведенных исследований выяснилось, что на стандартном перегоне оптимальная величина мощности двигателя вагона метрополитена 110 кВт, троллейбуса – 110 кВт, трамвайного вагона – 80 кВт.

Предложенная методика определения мощности тягового двигателя универсальна, так как не привязана к параметрам какого-либо конкретного типа подвижного состава и позволяет уже на стадии проектирования избежать лишних затрат на разработку новых типов подвижного состава.

### **1.2.2. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА РАСХОД ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ**

Проблема уменьшения потребления электроэнергии для тяговых нужд подвижного состава остается на сегодняшний день одной из наиболее актуальных, несмотря на достигнутые в ее решении успехи. Действительно, переход от резисторно-контакторных схем регулирования к импульсным (тиристорным, транзисторным и т. д.) позволяет, например, в приводах с двигателями постоянного тока сэкономить 40...50 % энергии при пуске подвижного состава от нулевой скорости до выхода на автоматическую характеристику полного поля. Применение импульсного регулирования в режиме рекуперативного торможения теоретически дает возможность (при наличии потребителя) уменьшить общее потребление энергии на движение на 5...15 %. Однако на практике достаточно сложно реализовать режим движения, при котором один подвижной состав рекуперировывает энергию, а другой ее полностью потребляет. Поэтому актуальной становится проблема утилизации энергии рекуперации, что может быть достигнуто за счет установки накопителей ее на подвижном составе либо в системе электроснабжения.

При всем многообразии существующих схем импульсного регулирования значительно уменьшить потребление энергии чисто схемотехнически не удастся, т. е. этот путь при имеющейся элементной базе



исчерпал свои возможности. Снижения потребления энергии за счет применения более совершенных конструкций тяговых машин тоже не следует ожидать, поскольку они также практически достигли своего совершенства.

Вместе с тем существует, по меньшей мере, два пути, каждый из которых позволяет минимизировать величину удельных энергозатрат [8]. Первый из них – применение на подвижном составе оптимальных по мощности тяговых двигателей (см. выше), так как дальнейшее наращивание суммарной мощности тяговых двигателей сопровождается не только необоснованным удорожанием подвижного состава, но и увеличением расхода энергии на движение.

Вторым путем снижения расхода электроэнергии является увеличение длины перегона (т. е. расстояния между остановочными пунктами). Несмотря на возрастание потребления энергии при увеличении длины перегона (рис. 1.6), приведенное к единице длины и веса подвижного состава это потребление имеет явную тенденцию к снижению. Так, исследования по определению удельного расхода энергии однокузовным троллейбусом, оснащенным двигателями мощностью 95, 110 и 150 кВт, выявили экспоненциальный характер снижения удельного расхода энергии со 140...165 Вт · ч/т · км (в зависимости от величины мощности двигателя) при длине перегона в 200 м до 88...110 Вт · ч/т · км при длине перегона 800 м.

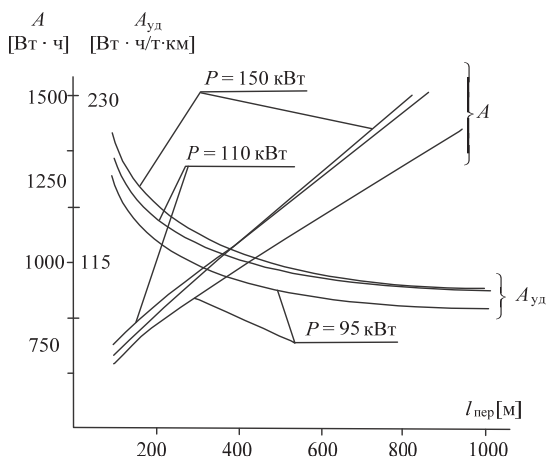


Рис. 1.6. Влияние длины перегона на расход энергии



Дальнейшее увеличение длины перегона не дает сколько-нибудь заметного прироста экономии удельного расхода энергии [9, 10].

Вместе с тем необходимо отметить, что увеличение длины перегона имеет и отрицательные моменты. К ним прежде всего следует отнести снижение привлекательности транспорта как средства достижения пункта назначения и увеличение затрат времени пассажиром на подход к остановочному пункту и отход от него. Поэтому уменьшение затрат энергии на движение не может быть самоцелью при определении оптимальной длины перегона, а становится одним из условий компромиссного решения, где вторым серьезным аргументом является сохранение привлекательности пользования транспортом. Рассмотрим этот аспект несколько подробнее.

Использование транспорта как средства передвижения при перемещении от пункта отправления к пункту назначения, как известно, становится целесообразным, когда транспортная составляющая затрат времени сокращает общее время в пути по сравнению с чисто пешеходным передвижением [11]. Общие средние временные затраты ( $t_o$ ) при комбинированном способе передвижения складываются из времени пешего движения от пункта отправления до остановочного пункта и от остановочного пункта до пункта назначения ( $2t_{\text{пеш}}$ ), времени ожидания ( $t_{\text{ож}}$ ) транспорта и времени движения в транспорте ( $t_{\text{тр}}$ ):

$$t_o = 2t_{\text{пеш}} + t_{\text{ож}} + t_{\text{тр}}.$$

В среднем на долю транспортной составляющей приходится 50 % суммарных временных затрат, на пешеходную – до 30 %. Как одна, так и другая составляющая зависят от целого ряда факторов: планировки города, маршрутной схемы транспорта, численности населения, схемы застройки и т. д. Вместе с тем каждая из составляющих затрат времени на движение описывается известными эмпирическими зависимостями, анализ которых показывает, что увеличение длины перегона ( $l_n$ ), с одной стороны, приводит к возрастанию доли пешеходной составляющей в общих затратах времени, а с другой – к снижению доли транспортной составляющей и времени ожидания

$$t_{\text{пеш}} = (k_{\text{нп}} k_{\text{во}} / v_{\text{пеш}}) [1 / (3\delta) + l_n / 4],$$

где  $k_{\text{нп}} = 1,2$  – коэффициент непрямолинейности подхода;



$k_{\text{во}} = 1 + v_{\text{пеш}} / v_{\text{с}}$  – коэффициент выбора остановочного пункта;

$v_{\text{пеш}}$  – скорость пешехода;

$v_{\text{с}}$  – скорость сообщения рассматриваемого вида транспорта;

$\delta$  – плотность транспортной сети;

$l_{\text{п}}$  – длина перегона.

Временные затраты на передвижение в транспорте включают в себя затраты времени на проезд в транспорте ( $t_{\text{дв}}$ ) и время посадки-высадки ( $t_{\text{пв}}$ ):

$$t_{\text{тр}} = t_{\text{дв}} + t_{\text{пв}} = l_{\text{ср}} / v_{\text{ср}} + l_{\text{ср}} (t_{\text{од}} + t_{\text{пв}} + t_{\text{зд}}) / l_{\text{п}},$$

где  $l_{\text{ср}} \approx 1,3 + 0,3\sqrt{F_{\text{с}}}$  – средняя длина поездки;

$F_{\text{с}}$  – селитебная площадь города;

$t_{\text{од}} + t_{\text{зд}} = 2 \dots 5$  с (по опытным данным) – время открывания и закрывания дверей;

$t_{\text{пв}} = k_{\text{нд}} \rho_{\text{оп}} \Omega_{\text{max}} t_{\text{пас}} / n_{\text{дв}}$  – время посадки и высадки пассажиров;

$k_{\text{нд}} \approx 1,2$  – коэффициент неравномерности посадки и высадки по дверям;

$\rho_{\text{по}}$  – коэффициент пассажирообмена;

$\Omega_{\text{max}}$  – максимальная вместимость подвижного состава;

$t_{\text{пас}} = 1$  – среднее время посадки(высадки) пассажира, с;

$n_{\text{дв}}$  – количество дверей подвижного состава.

Временные затраты на ожидание

$$t_{\text{ож}} = l_{\text{м}} / (w_{\text{дв}} v_{\text{э}}),$$

где  $l_{\text{м}}$  – длина маршрута;

$w_{\text{дв}}$  – количество единиц подвижного состава на маршруте;

$v_{\text{э}}$  – эксплуатационная скорость подвижного состава на маршруте.

Для определения влияния всех составляющих на  $t_0$  при изменении  $l_{\text{п}}$  и выявления зависимости  $t_0 = f(l_{\text{п}})$  необходимо рассмотреть задачу в конкретных условиях. Полагаем, что при изменении расстояния между остановочными пунктами от 100 до 800 м остаются неизменными: пассажиропоток на маршруте  $\Pi_{\text{пасс}}$ , вместимость подвижного состава  $\Omega_{\text{max}}$ , средняя длина поездки  $l_{\text{ср}}$ , плотность транспортной сети наземного транспорта  $\delta = 1,5 \text{ км/км}^2$  ( $\delta = 1,5 \dots 2,5 \text{ км/км}^2$  для мегаполисов), селитебная площадь города  $F_{\text{с}} = 80 \text{ км}^2$ , а скорость пешехода равна  $v_{\text{пеш}} = 4 \text{ км/ч}$ .



Транспортные сети городов в целях оптимизации использования рабочего времени и эксплуатации подвижного состава при составлении расписания поездных бригад длину маршрута  $l_m$  принимают такой, чтобы время полурейса (время движения от пункта отправления до конечного) было равным или близким к одному часу, что соответствует длине маршрута в 20 км.

На основе перечисленных выше исходных данных и с учетом того, что

$$v_3 = 2l_m v_c / [2l_m + (t_{pc} + t_{tc})v_c],$$

где  $t_{pc} = 2 \dots 3$  мин – время стоянки подвижного состава на распорядительной станции;

$t_{tc} = 1 \dots 1,5$  мин – время стоянки подвижного состава на технической станции,

были произведены расчеты средних составляющих затрат времени на передвижение для двух значений коэффициента пассажирообмена  $\rho_{пo1} = 0,1$  и  $\rho_{пo2} = 0,2$ , а также суммарных затрат времени для обоих вариантов, которые сведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

|                                |      |      |      |      |      |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| $l_{п}, \text{ м}$             | 100  | 200  | 350  | 550  | 800  |
| $v_c, \text{ км/ч}$            | 24   | 31   | 36   | 40,5 | 42,5 |
| $v_3, \text{ км/ч}$            | 22,9 | 29,2 | 33,6 | 37,5 | 39,2 |
| $t_{пеш}, \text{ мин}$         | 5,16 | 5,49 | 6,16 | 7,13 | 8,32 |
| $t_{дв}, \text{ мин}$          | 10   | 7,7  | 6,7  | 5,9  | 5,6  |
| $t_{ож}, \text{ мин}$          | 2,62 | 2,05 | 1,79 | 1,6  | 1,5  |
| $t_{од} + t_{зд}, \text{ мин}$ | 3,3  | 1,7  | 0,95 | 0,6  | 0,4  |
| $t_{пo1}, \text{ мин}$         | 6,7  |      |      |      |      |
| $t_{o1}, \text{ мин}$          | 27,7 | 23,6 | 22,3 | 21,9 | 22,5 |
| $t_{пo2}, \text{ мин}$         | 13,4 |      |      |      |      |
| $t_{o2}, \text{ мин}$          | 34,4 | 30,3 | 29   | 28,6 | 29,2 |

Кривые зависимостей  $t_o(l_{п})$  при  $\rho_{пo1} = 0,1$  (кривая 1) и  $\rho_{пo2} = 0,2$  (кривая 2) показаны на рис. 1.7 [10].

Из этих зависимостей видно, что минимальные суммарные затраты времени на передвижение независимо от величины коэффициента пассажирообмена соответствуют длинам перегона  $l_{п} = 500 \dots 600$  метров.

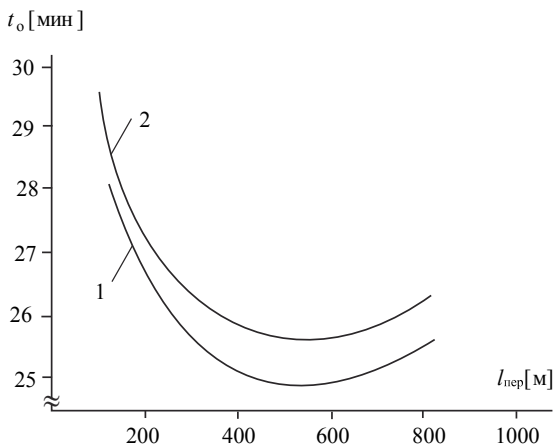


Рис. 1.7. Кривые затрат времени на передвижение

По кривым рис. 1.7 длине перегона  $l_{\text{п}} = 550$  м соответствует величина удельного расхода энергии  $A_{\text{уд}} = 97,6$  Вт · ч/т · км. Приращение расхода и уменьшение его при  $l_{\text{п}} = 500$  и  $l_{\text{п}} = 600$  м соответственно не превышает величины  $\Delta A_{\text{уд}} \% = 2,3$  %.

### 1.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Классический вариант механической части тягового электропривода (трансмиссии) подвижного состава содержит, как известно, следующие основные элементы: редуктор; карданный вал; соединительные муфты, валы, оси [12]. В некоторых случаях трансмиссия дополняется механическими тормозами. В зависимости от вида транспорта и типа подвижного состава в кинематической схеме механической части тягового привода могут отсутствовать или появляться те или иные элементы. Так, в частности, на пневмоколесном подвижном составе с классическим вариантом механической части в схему трансмиссии в обязательном порядке включается дифференциал, обеспечивающий при вписывании в кривые вращение колес с различными угловыми скоростями. В мотор-колесном же приводе из кинематической схемы исключены карданные валы и муфты. Вместе с тем нельзя не отметить,



что в связи с достижением определенных успехов в электромашиностроении в последнее время наметилась тенденция к разработке безредукторных тяговых электроприводов.

Каждый из перечисленных элементов механической передачи при работе испытывает деформации, приводящие к возникновению потерь в нем, а следовательно, и к снижению КПД привода в целом.

Наибольшие потери энергии наблюдаются в редукторе механической передачи, в зубчатом зацеплении которого в результате наличия сил трения возникает момент сопротивления, снижающий КПД редуктора.

### 1.3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ТЯГОВОГО ПРИВОДА

Кинематическая схема механической части тягового электропривода однодвигательного безрельсового подвижного состава в классическом варианте ее исполнения (рис. 1.8, *а*) включает в себя: тяговый электродвигатель 1; редуктор с механическим дифференциалом 2; карданный вал 3; полуоси ведущего моста 4. Недостатки этого варианта давно известны, и попытки устранить их привели в свое время к появлению схемы с разнесенным редуктором, включающим в себя центральную 2' и так называемую бортовую 2'' ступени (рис. 1.8, *б*), а позже – и мотор-колесного варианта (рис. 1.8, *в*) [12].

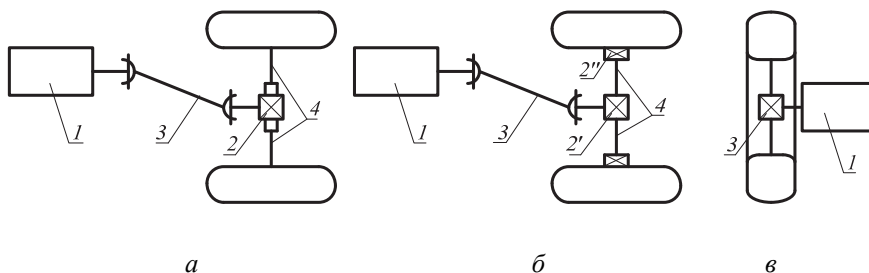


Рис. 1.8. Варианты кинематических схем механической части тягового электропривода однодвигательного безрельсового подвижного состава

Некоторые варианты исполнения кинематической схемы механической части индивидуального и группового привода рельсового подвижного состава показаны на рис. 1.9.

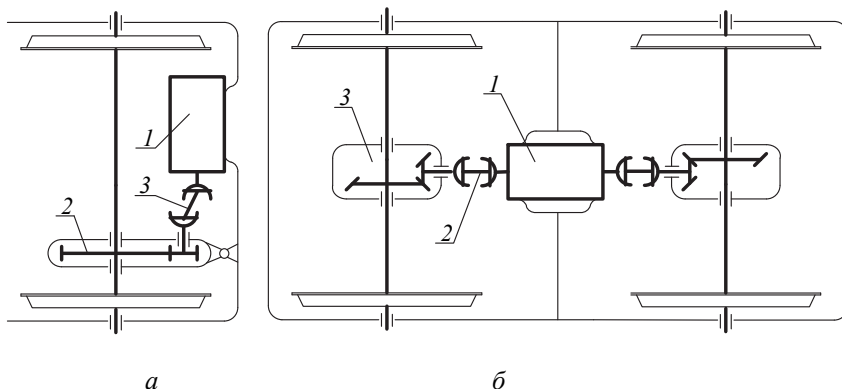


Рис. 1.9. Варианты кинематических схем механической части тягового электропривода однодвигательного рельсового подвижного состава

При определении кинематической схемы трансмиссии необходимо учитывать следующие основные требования, которым должна удовлетворять механическая передача:

- передача крутящего момента с вала якоря (ротора) тягового двигателя на движущее колесо должна осуществляться при всех допустимых эволюциях ходовых частей (колеса) подвижного состава (наезд на преодолимое препятствие, поворот транспортного средства и т. д.);
- выход из строя любого элемента передачи не должен препятствовать транспортировке подвижного состава;
- нагрузки, возникающие в элементах трансмиссии при прохождении неровностей пути, не должны приводить к выходу из строя любого из этих элементов;
- потери энергии при передаче крутящего момента в трансмиссии должны быть минимальными.

Последнее требование напрямую связано с расходом энергии на движение подвижного состава. Потери передаваемой трансмиссией с вала двигателя на обод колеса механической энергии имеют место во всех элементах механической части привода. Однако наибольшая доля их приходится на редуктор. Потери в редукторе зависят от типа зубчатого зацепления, количества ступеней (которое в условиях стесненности габаритов зависит от передаточного числа), функционального назначения (просто передача момента либо еще и распределение его



по движущим колесам), количества участвующих в передаче момента зубчатых элементов.

Общеизвестно, что наименьшими потерями энергии обладают одноступенчатые редукторы с прямозубым зацеплением. Однако применение их на подвижном составе электрического транспорта крайне ограничено вследствие невозможности получить достаточное по величине передаточное число из-за необходимости выполнять требование по обеспечению строго регламентированного клиренса. Кроме того, износ зубьев в процессе эксплуатации способствует появлению зазора в месте их контакта, ударных нагрузок и, как следствие, к выходу редуктора из строя.

Для устранения этих недостатков на рельсовом подвижном составе используются одноступенчатые угловые редукторы с гипоидным зацеплением, двухступенчатые комбинированные (одна ступень цилиндрическая с косозубым зацеплением, вторая – с эвольвентным) и т. д. Эффективным средством повышения противобуксовочных свойств ходовых частей подвижного состава является применение группового привода. Однако все эти решения приводят к значительному возрастанию потерь в редукторе и, как следствие, к увеличению расхода энергии на движение.

Еще большие потери наблюдаются в трансмиссии безрельсового подвижного состава, редуктор которого должен содержать дифференциал. Независимо от конструктивного исполнения дифференциала (угловой, планетарный и т. д.) потери при его включении еще больше снижают средневзвешенный КПД редуктора.

Из показанных на рис. 1.8 и 1.9 кинематических схем трансмиссий видно, что наименьшее количество элементов присуще мотор-колесному тяговому приводу. Однако не следует забывать, что мощность тягового электродвигателя зависит от его габаритных размеров, а они ограничены диаметром ступицы и уровнем пола салона пневмоколесного подвижного состава. Кроме того, редуктор мотор-колеса имеет планетарное исполнение и, как правило, выполняется двух- либо трехступенчатым. Все это создает определенные трудности при проектировании низкопольного подвижного состава.

На рельсовом подвижном составе в зависимости от поставленных целей могут использоваться различные варианты кинематических схем. Вместе с тем при создании высокоманевренного подвижного со-



става повышенной вместимости следует стремиться не использовать одиночные кузова вагонного типа и переходить к шарнирно-сочлененному, что может привести к решению об отказе от тележечного исполнения ходовых частей, а это, в свою очередь, ведет к применению индивидуального привода.

### 1.3.2. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОГО ЧИСЛА ТРАНСМИССИИ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ

Одним из наиболее важных показателей механической части тягового электропривода, определяющего тип зацепления в зубчатой передаче, КПД редуктора и его массогабаритные показатели, является передаточное число  $i_{ред}$ . При заданном диаметре колеса движителя  $D_k$  отношение угловых скоростей вала якоря электродвигателя  $\omega_{дв}$  и колеса  $\omega_k$  однозначно определяет его величину согласно известному выражению

$$i_{ред} = \frac{\omega_{дв}}{\omega_k} = \frac{(U_{дв} - I_{пуск} r_{дв}) D_k}{2c_e \Phi v_{max}},$$

где  $U_{дв}$  — номинальное напряжение двигателя;

$r_{дв}$  — сопротивление цепи якоря электродвигателя;

$c_e$  — постоянная электрической машины.

Стремление повысить максимальную скорость экипажа на перегоне приводит к необходимости уменьшать передаточное число  $i_{ред}$ , что, в свою очередь, снижает тяговое усилие, т. е. влияет на динамические показатели подвижного состава, а также на расход энергии на движение. В результате исследований влияния передаточного числа механической передачи на расход энергии в режиме пуска на примере однокузовного троллейбуса с двигателем ДК-211А на перегоне в 500 м было выявлено, что потребление электроэнергии в удельной форме возрастает с 70 Вт · ч/т · км (при  $i_{ред} = 11,4$ ) до 96 Вт · ч/т · км (при  $i_{ред} = 5$ ) [13]. Максимальная скорость троллейбуса с номинальной нагрузкой на этом перегоне повысилась с 41 до 54 км/ч (рис. 1.10, а). Результаты аналогичных исследований для однокузовного трамвайного вагона и 7-вагонного подвижного состава метрополитена показаны на рис. 1.10, б и 1.10, в соответственно.

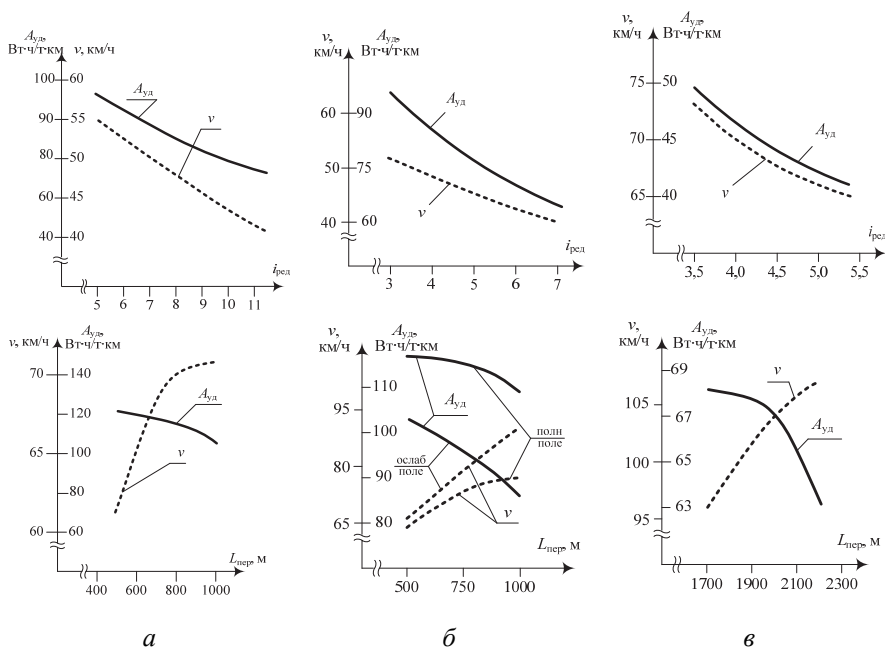


Рис. 1.10. Зависимости расхода энергии и скорости движения на перегоне в функции передаточного числа редуктора и длины перегона

Существенно влияет на параметры элементов тягового привода диаметр ведущего колеса. Поскольку скорость подвижного состава в соответствии с известным соотношением  $v = \omega_K D_K / 2$  пропорциональна величине диаметра, повышения скорости движения на перегоне можно достичь увеличением диаметра. Однако стремление понижать уровень пола салона для повышения скорости пассажирообмена на остановочных пунктах накладывает определенное ограничение на увеличение диаметра ведущего колеса. С другой стороны, если на рельсовом пассажирском транспорте уменьшение диаметра колеса существенно не влияет на его несущую способность, то на пневмоколесном это может привести к радикальному изменению формулы ходовых частей и конструктивного исполнения подвижного состава в целом.

## **1.4. ВЫБОР СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Силовая полупроводниковая техника предоставила в распоряжение проектировщиков широкий спектр элементов, позволяющих реализовывать различные схемные решения силовоточных электрических цепей преобразователей, выполняющих одни и те же функции [4, 14]. Это касается и электрического транспорта, современные модели которого оснащаются полупроводниковыми преобразователями для нужд электрической тяги, собственных нужд и т. д.

При разработке преобразователя для нужд электрической тяги необходимо учитывать, что его выходные характеристики должны обеспечивать:

- наиболее полное использование мощности тягового электродвигателя во всем диапазоне изменения питающего напряжения в режиме пуска и рекуперацию энергии при торможении;
- работу преобразователя с допустимым мешающим влиянием на внешних потребителей электроэнергии, а также на средства телекоммуникации и связи;
- минимальный перегрев тягового двигателя вследствие появления высокочастотной пульсации тока и наведения им в элементах двигателя паразитных магнитных полей.

### **1.4.1. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ И ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

При проектировании тягового привода подвижного состава источник энергии, который будет использоваться для его питания, берут из технического задания. Для автономных транспортных средств таким источником могут быть, как известно, тяговая аккумуляторная батарея, топливные элементы, дизель-генераторная установка и т. д. Для транспортных средств с централизованной системой электроснабжения источником служит существующая тяговая сеть с известным уровнем питающего напряжения. Поэтому возникает необходимость решать задачу электромагнитной совместимости источника питания (тяговой сети) и потребителя (тягового электродвигателя).



Централизованное питание подвижного состава, оснащенного тяговыми двигателями с номинальным напряжением, равным напряжению источника питания, например троллейбусов, не требует обеспечения электромагнитной совместимости в режиме пуска, поскольку и по роду тока, и по уровню напряжения источник и потребитель полностью согласуются. Однако в случае, например, тиристорно-импульсного регулирования на базе SCR-тириستоров для предотвращения срыва регуляторов необходимо применять специальные меры, о которых будет рассказано ниже.

При рекуперативном же торможении тягового электродвигателя, переведенного в генераторный режим и развивающего тормозной момент для служебного замедления, на его зажимах появляется ЭДС, превышающая напряжение в контактной сети почти вдвое, а при просадке его в сети – и более. Поэтому для обеспечения электромагнитной совместимости необходимо либо использовать в электрической цепи между контактной сетью и двигателем буферный элемент, на котором бы падала часть напряжения (так называемый балластный резистор), либо замещать рекуперативное торможение реостатным, либо рекуперировать на накопитель электрической энергии.

Применение на подвижном составе тягового электропривода на переменном токе при централизованном источнике питания на постоянном однозначно предполагает решение проблемы электромагнитной совместимости посредством инвертирования постоянного напряжения в переменное. При этом в целях реализации тяговым двигателем номинальной мощности при просадке напряжения контактной сети до минимального уровня величину его линейного напряжения надо рассчитывать по минимальному напряжению источника питания. Однако пуск двигателя при максимальном напряжении в сети приведет к тому, что подаваемое на него линейное напряжение возрастет в 1,5...2 раза, а это недопустимо. Для предотвращения этого необходимо поднимать частоту инвертирования либо питание инвертора осуществлять не непосредственно от контактной сети, а через регулятор постоянного напряжения, ограничивая величину напряжения на его выходе на уровне минимально допустимого напряжения контактной сети.

При питании подвижного состава, оснащенного тяговым приводом постоянного тока, от сети переменного тока, напряжение в которой, как правило, на порядок превышает номинальное напряжение двигателя,



вопрос электромагнитной совместимости решается путем применения двойного преобразования: сначала понижением уровня переменного напряжения (посредством трансформатора), а затем – выпрямлением переменного тока с последующим регулированием величины подаваемого на тяговый электродвигатель напряжения.

В случае использования на подвижном составе тягового привода на переменном токе подаваемое на тяговый электродвигатель трехфазное питающее напряжение может быть получено непосредственным преобразованием однофазного напряжения вторичной обмотки понижительного трансформатора в трехфазное. При этом справедливы все высказанные выше замечания по уровню напряжения, питающего двигатель, как постоянного, так и переменного тока.

#### 1.4.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Применение статических полупроводниковых преобразователей для нужд электрической тяги подвижного состава постоянного тока, как известно, позволяет существенно сократить нерациональное использование электрической энергии за счет экономии при потреблении ее в режиме пуска и частичного возврата в источник при рекуперативном торможении. Именно этот факт стал мотивацией к замене реостатного способа регулирования подводимой к двигателю энергии импульсным при помощи силовых ключей на полупроводниковых приборах, в качестве которых чаще всего используются тиристоры и транзисторы. Появление в последнее время сильноточных высоковольтных GTO- и IGCT-тириستоров, приходящих на смену SCR-тиристорам, и IGBT-транзисторов позволяет по-новому подойти к вопросу схемотехнического проектирования ключей. К настоящему времени появилось достаточно много работ по применению этих полупроводниковых приборов в области железнодорожного транспорта, электроснабжения, общепромышленного привода. Однако в большинстве случаев выводы носят рекомендательный характер, основанный на опытных данных в конкретной области.

Вместе с тем не следует забывать, что элементная база тягового привода подвижного состава городского электрического транспорта (ГЭТ), особенности его эксплуатации и повышенные требования надежности к обеспечению бесперебойного электроснабжения налагают определенные ограничения как на выбор того или иного схемного решения, так и



на элементную базу ключей. Поэтому возникла необходимость исследовать влияние различных факторов на выбор способа регулирования и схемное решение полупроводниковых ключей на уровне теоретического обоснования и проектирования преобразователей для нужд электрической тяги.

В данном разделе на основе сравнительного анализа приводится методика по выбору элементной базы преобразователя для тягового привода ГЭТ, обеспечивающего минимальные потери энергии в нем при регулировании.

Поскольку элементная база и схемное решение ключей не должны влиять на реализацию заданных режимов движения подвижного состава, анализ проводился при соблюдении определенных условий условий [15, 16]:

- 1) ключи коммутируют одинаковый ток нагрузки (тягового двигателя)  $I_{\text{пуск}}$ , максимальная величина пульсации  $\Delta I$  которого ограничена;
- 2) напряжение источника питания  $U_{\text{КС}}$  постоянно и одинаково для всех ключей;
- 3) структура тягового привода и его параметры для всех ключей идентичны.

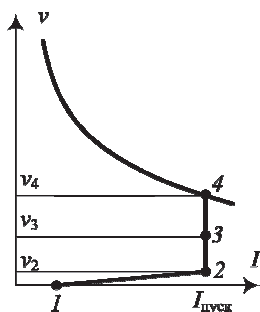


Рис. 1.11. Пусковая диаграмма

**Методика** анализа показана на примере тягового привода постоянного тока для троллейбуса. В качестве расчетного режима работы выбран пуск тягового электродвигателя (ТЭД), поскольку в режиме электрического торможения токовая нагрузка ключей меньше. В соответствии с пусковой диаграммой (рис. 1.11) максимальная величина протекающего через ключ тока определяется пусковым током тягового двигателя. Для большинства моделей троллейбусов этот ток лежит в пределах 220...300 А. Расчет потерь в ключах проводится для тока  $I_{\text{пуск}} = 300$  А

(тяговый электродвигатель ДК-213Б).

Другим немаловажным параметром при определении потерь в ключе является частота регулирования или закон ее изменения за время пуска в соответствии с заданным способом регулирования. В преобразователях для электрической тяги постоянного тока в настоящее

время преимущественное распространение получили два способа регулирования: широтно-импульсный (ШИР) и частотно-импульсный (ЧИР). В качестве альтернативы в данной работе дополнительно рассмотрены комбинированный (с постоянной продолжительностью паузы) и релейный (с постоянной величиной пульсации выходного тока) способы регулирования.

### Задачи и алгоритм расчета

1. Определение наиболее тяжелого режима работы ключа, при котором имеют место максимальная частота (динамические потери), максимальная длительность импульса (статические потери), при несовместимости в одной точке первого и второго выбирается точка с максимальными суммарными потерями, при этом приводятся величины потерь для обеих точек с целью определения возможных путей оптимизации (величина пульсаций тока в определении точки тяжелого режима роли не играет).

2. Определение частоты регулирования или закономерности ее изменения производится в условиях задания допустимой максимальной пульсации тока (5 % от среднего значения) и максимальной частоты регулирования  $f_p$  в процессе пуска – 1 кГц. После этого рассчитываются зависимости частоты регулирования в функции коэффициента заполнения  $\lambda - f_p(\lambda)$  и время пуска  $f_p(t_{\text{пуска}})$  с фиксацией точки максимума ( $\lambda_{\text{max}}$ ) для минимального времени выключения (задержка времени на включение не учитывается в силу незначительной длительности и принимается одинаковой для всех ключей); определяется  $\lambda_{\text{min}}$  при скорости 2...3 км/ч в точке 2 пусковой диаграммы).

3. Определение потерь за период регулирования в ключах при разных способах регулирования в точках тяжелого режима работы ключа.

4. Сравнение составляющих потерь и определение схемного решения ключа и способа регулирования по критерию минимума потерь энергии в нем.

5. При отсутствии однозначного ответа выполняются дополнительные расчеты, цель которых – определение величины интегральных потерь в ключе  $\Delta A_{\text{ключа}}$  за весь пусковой период. При этом статические потери и потери, зависящие от времени проводящего состояния или времени приложения обратного напряжения, увеличатся пропорционально количеству периодов регулирования за время пуска. Энергия же динамических потерь за время пуска  $t_{\text{пуск}}$  рассчитывается по формуле



$$A_{\text{дин}} = E_{\Sigma} \int_0^{t_{\text{пуск}}} f_p dt,$$

где  $E_{\Sigma}$  – энергия динамических потерь за импульс (по справочным данным).

На основе анализа результатов расчетов выбираются окончательный вариант схемного решения ключа и способ регулирования.

В зависимости от способа регулирования максимума потерь энергии в элементах силового ключа следует ожидать в характерных точках 2, 3 и 4 пусковой диаграммы (рис. 1.12). Для каждого способа регулирования указанным точкам будут соответствовать определенные величины частоты регулирования и коэффициента заполнения, которые с достаточной степенью точности вычисляются согласно

$$f_p = (1 - \lambda) \lambda \frac{U_{\text{КС}}}{L \Delta I_i} \quad \text{и} \quad U_{\text{дв}} = \lambda U_{\text{пит}} = I_{\text{пуск}} r_{\text{дв}} + c_e \Phi v,$$

где  $L$  – индуктивность цепи ТЭД;

$U_{\text{пит}}$  – напряжение источника питания;

$r_{\text{дв}}$  – сопротивление цепи двигателя.

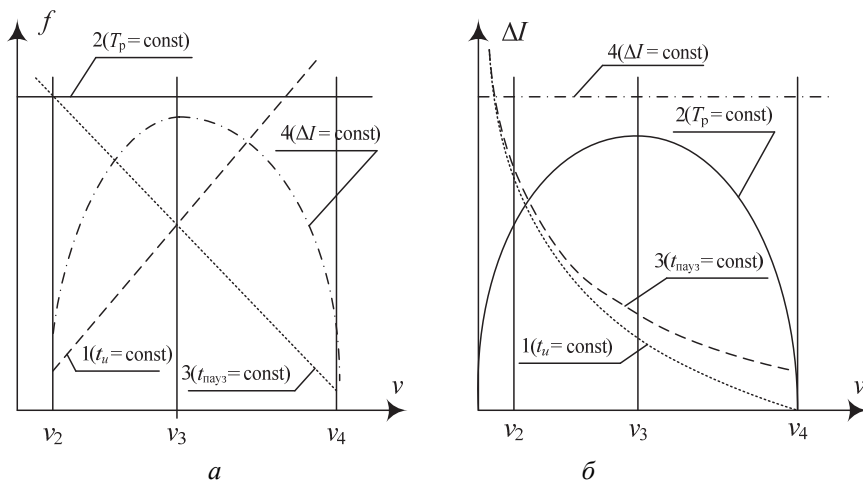


Рис.1.12. Зависимости частоты регулирования и пульсации тока двигателя в функции скважности

Нетрудно показать, что на основе приведенных формул графические зависимости  $f_p(v)$  и  $\Delta I(v)$  носят характер, показанный на рис. 1.12.

На рис. 1.13 представлены расчетные зависимости частоты регулирования от коэффициента заполнения для взятого примера, а в табл. 1.5 – требуемые для дальнейшего анализа параметры расчетных точек.

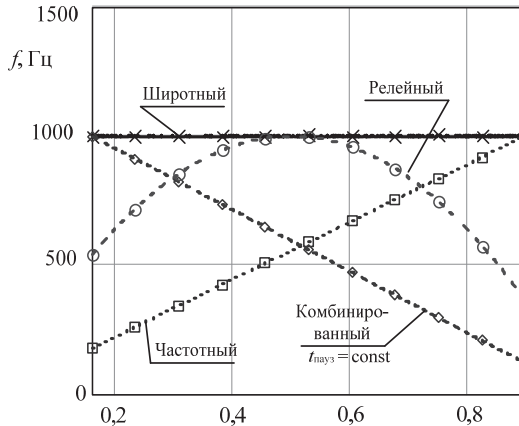


Рис. 1.13. Расчетные зависимости частоты регулирования от коэффициента заполнения

Возможные варианты схемных решений ключей с различной элементной базой и способами регулирования представлены на рис. 1.14: *a* – ключ на основе тиристора SCR с широтным способом регулирования; *b* – на основе тиристора SCR с частотным способом регулирования; *в* – на основе полностью управляемого тиристора GTO; *г* – на основе транзистора IGBT.

Таблица 1.5

| Способ регулирования | Частота, Гц / коэффициент заполнения |            |            |
|----------------------|--------------------------------------|------------|------------|
|                      | Точка 2                              | Точка 3    | Точка 4    |
| Широтный             | –                                    | –          | 1000 / 0,9 |
| Частотный            | 178 / 0,16                           | –          | 1000 / 0,9 |
| Комбинированный      | 1000 / 0,16                          | –          | 119 / 0,9  |
| Релейный             | 538 / 0,16                           | 1000 / 0,5 | 360 / 0,9  |



Для ключа с частотно-импульсным регулированием (рис. 1.14, б) составляющие потерь энергии:

$$A_{\text{стат}} = U_{\text{са}} I_{\text{пуск}} t_{\text{пров}}, \quad A_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{пров}} t_{\text{пров}}}{2} + \frac{U_{\text{пит}} Q_{rr}}{2}, \quad (1.5)$$

$$A_y = U_{\text{пит}} I_y t_{\text{закр}}, \quad A_{\text{упр}} = U_{\text{упр}} I_{\text{упр}} t_{\text{упр}},$$

где  $A_{\text{стат}}$ ,  $A_{\text{дин}}$ ,  $A_y$ ,  $A_{\text{упр}}$  – соответственно энергии статических и динамических потерь и потерь от протекания токов утечки и управления;

$U_{\text{са}}$ ,  $U_{\text{упр}}$  – соответственно падения напряжения на тиристоре в прямом направлении и напряжение управления;

$t_{\text{пров}}$ ,  $t_{\text{вкл}}$ ,  $t_{\text{закр}}$ ,  $t_{\text{упр}}$  – соответственно время проводящего состояния, включения, непроводящего состояния тиристора и время действия импульса управления;

$P_{\text{пров}}$  – мощность потерь в проводящем состоянии;

$Q_{rr}$  – заряд обратного восстановления;

$I_y$ ,  $I_{\text{упр}}$  – соответственно токи утечки и управления тиристора.

Выражения (1.5) определяют непосредственно потери энергии в полупроводниковом приборе, которые дополняются потерями в дросселе насыщения и коммутирующем контуре:

$$A'_{L1} = \frac{4B_s s_{\omega} V}{\tau_{\text{зад}}}, \quad A'_{L1} = I_{\text{пуск}}^2 R_{L1} t_{\text{пров}}, \quad A_C = 2\pi C U_{\text{пит}}^2 \text{tg } \delta, \quad (1.6)$$

$$A_{L2} = \pi R_{L2} U_{\text{пит}}^2 \sqrt{\frac{C^3}{L_2}},$$

где  $A'_{L1}$ ,  $A''_{L1}$  – соответственно потери при перемагничивании сердечника и тепловые потери в дросселе насыщения;

$B_s$  – магнитная индукция;

$s_{\omega}$  – коэффициент переключения;

$V$  – объем сердечника;

$\tau_{\text{зад}}$  – минимальное время задержки при намагничивании;

$A_C, A_L$  – соответственно диэлектрические потери в конденсаторе и тепловые потери в дросселе (здесь потерями на перемагничивание дросселя пренебрегают ввиду их малости) коммутирующего контура;

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла потерь;

$R_{L1}, R_{L2}$  – активное сопротивление катушек дросселей насыщения и коммутирующего. Последние определяются по методике, изложенной ниже.

Для ключа с широтно-импульсным регулированием (рис. 1.14, а) имеют место еще и потери энергии в тиристоре VS2 при перезаряде конденсатора  $C$ , которые определяются по выражениям (1.5), где вместо  $t_{\text{пров}}$  подставляется  $t_{\text{закр}}$ . Тогда время перезаряда конденсатора и время закрытого состояния тиристора

$$t'_{\text{пров}} = \frac{C}{I_{\text{п}}} \sqrt{U_{\text{пит}}^2 - I_{\text{п}}^2 \left( \frac{L_2}{C} \right)} + \frac{U_{\text{пит}} C}{I_{\text{пуск}}}, \quad t'_{\text{закр}} = \lambda T_{\text{р}} - t'_{\text{пров}},$$

где  $T_{\text{р}}$  – период регулирования.

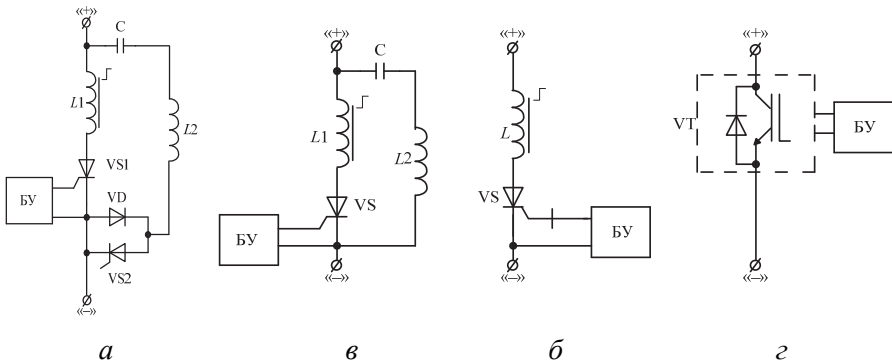


Рис. 1.14. Варианты схемных решений ключей с различной элементной базой и способами регулирования

Для схемы рис. 1.14, в статические потери энергии и потери при протекании токов утечки определяются по формулам (1.5), а динамические – согласно паспортным данным прибора.

Кривые тока и напряжения на аноде и затворе тиристора ГТО, приводимые производителем, показаны на рис. 1.15.



Потери энергии на создание импульсов управления при включении и выключении:

$$A_{\text{упр}} = U_{\text{упр}} I_{\text{упр}} t_{\text{упр}} + \frac{1}{2} U_{\text{затв}} Q_{\text{затв}},$$

где  $U_{\text{упр}}$  – напряжение смещения затвора при включении;

$I_{\text{упр}}$  – ток затвора при включении;

$t_{\text{упр}}$  – время воздействия импульсов управления, необходимое для надежного включения и выключения прибора;

$U_{\text{затв}}$  – напряжение на затворе при выключении;

$Q_{\text{затв}}$  – заряд восстановления области затвора при выключении.

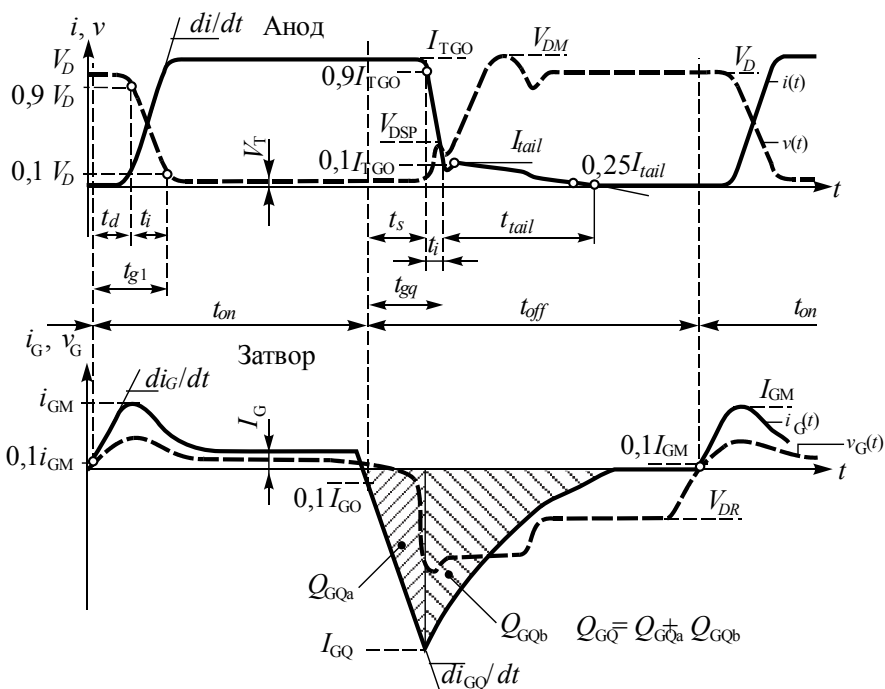


Рис. 1.15. Кривые тока и напряжения на аноде и затворе тиристора GTO

Потери энергии в дросселе насыщения определяются в соответствии с (1.6). Для защиты тиристора от пробоя по скорости нарастания прямого напряжения служит RCD-снаббер, потери в элементах цепи

которого по рекомендациям производителя определяются по выражению

$$A_S = 0,5C_S \sqrt{U_{\text{пит}}^2 + (U_{\text{пит max}} - U_{\text{пит}})^2}, \quad (1.7)$$

где  $C_S$  – емкость конденсатора снаббера;

$$U_{\text{пит max}} = 1,5U_{\text{пит}}.$$

Величина рекомендуемой емкости приводится производителем в справочных данных и выбирается исходя из допустимого полуторакратного перенапряжения на тиристоре при выключении. Потерями в диоде снаббера, возникающими при перезаряде емкости  $C_S$ , пренебрегаем ввиду их малости. Диэлектрические потери в конденсаторе снаббера, а также потери от перемагничивания и тепловые потери в дросселе насыщения определяются согласно (1.6). Эти же выражения используются при расчете потерь в ключах на базе GCT- и IGCT-тиристор.

Отличием является отсутствие в цепях ключа RCD-снаббера и дросселя насыщения. Определение потерь на управление:

$$A_{\text{упр}} = P_{\text{вкл}} t_{\text{вкл}} + P_{\text{выкл}} t_{\text{выкл}} = \frac{P_{\Sigma}}{f_p},$$

где  $P_{\text{вкл}}$ ,  $P_{\text{выкл}}$  – средние мощности потерь в цепи затвора, рассеиваемые в момент включения и выключения соответственно;

$P_{\Sigma}$  – суммарная мощность, потребляемая цепями затвора.

Для схемы рис. 1.14, з (ключ на IGBT-транзисторе) статические потери энергии и потери при протекании токов утечки, как было рассмотрено выше, определяются по формулам (1.5). Динамические потери определяются из графиков расхода энергии на включение и выключение транзистора в зависимости от тока коллектора, на управление – по известной величине заряда емкости затвора  $Q_{\text{затв}}$ :

$$A_{\text{упр}} = \frac{U_{\text{пит}} Q_{\text{затв}}}{2}.$$

Как показывает практика, для надежной работы транзистора, в частности для уменьшения перенапряжений, возникающих при его выключении, также необходима снабберная цепь. В наиболее простом случае снаббер состоит из одного конденсатора, включенного парал-



тельно входной емкости фильтра в непосредственной близости от зажимов транзистора для уменьшения паразитной индуктивности монтажа. Необходимая величина емкости такого снабберного конденсатора обычно приводится производителем и лежит в пределах 1 мкФ на каждые 100 А тока коллектора. Тогда, учитывая допустимую величину перенапряжения  $\Delta U_{\text{пит}} = 100 \text{ В}$  и заменяя в подкоренном выражении формулы (1.7) второе слагаемое под знаком радикала на  $\Delta U_{\text{пит}}$ , определяют потери энергии в этой цепи.

Для расчета потерь использованы данные по элементной базе полупроводниковых ключей, приведенные в табл. 1.6.

Таблица 1.6

| Тип прибора     | Изготовитель  | Диаметр (габариты), мм | Максимальное напряжение / повторяющийся ток, В/А |
|-----------------|---------------|------------------------|--------------------------------------------------|
| SCR             |               |                        |                                                  |
| ТБ153-800       | Отечественный | 49                     | 1200/800                                         |
| GTO             |               |                        |                                                  |
| 5SGA 15F2502    | ABB           | 47                     | 1400/900                                         |
| GCT             |               |                        |                                                  |
| GCU 08BA-130    | Mitsubishi    | 47                     | 6500/800                                         |
| IGCT            |               |                        |                                                  |
| 5SHZ 08F6000    | ABB           | 47                     | 6000/800                                         |
| IGBT            |               |                        |                                                  |
| 5SNE0800M170100 | ABB           | 130*140                | 1700/800                                         |

При выборе номинального (максимального повторяющегося) тока учитывались тепловые характеристики приборов – зависимость тока анода (коллектора) от температуры корпуса или кристалла при заданных тепловых сопротивлениях (стандартный охладитель). По допустимой температуре в заданной точке определяется величина тока, которая должна быть меньше пускового тока двигателя наибольшей мощности из указанного диапазона. При выборе была проанализирована номенклатура таких крупных производителей, как Semikron, ABB, Mitsubishi, Dynex, в том числе и отечественных. Предпочтение отдавалось фирме-изготовителю, выпускающей большинство типов ключей. Разброс в значениях максимального напряжения объясняется различием линейки



номинальных данных и диапазона мощности, на которые выпускается тот или иной прибор.

В качестве примера в табл. 1.7 приведены результаты расчетов потерь энергии в ключах с различными типами полупроводниковых приборов для случая широтно-импульсного регулирования при работе в точке 4 пусковой диаграммы (см. табл. 1.5 и рис. 1.11).

По результатам расчетов построены гистограммы энергии потерь сравниваемых типов ключей для всех расчетных точек (рис. 1.16).

Таблица 1.7

| Тип прибора | Общие | Статика | Динамика |
|-------------|-------|---------|----------|
| SCR         | 0,662 | 0,334   | 0,034    |
| GTO         | 1,604 | 0,462   | 0,35     |
| GCT         | 3,646 | 1,282   | 2,25     |
| IGCT        | 3,14  | 1,387   | 1,72     |
| IGBT        | 1,197 | 0,418   | 0,21     |

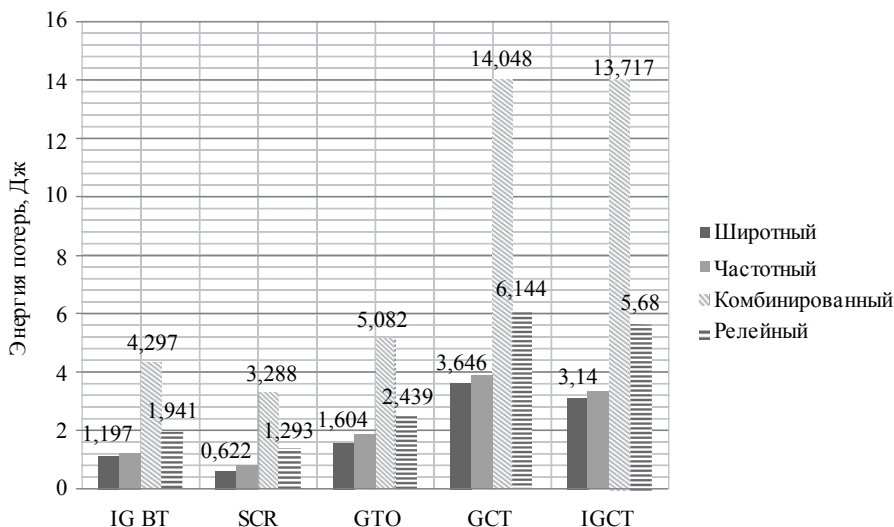


Рис. 1.16. Гистограммы энергии потерь сравниваемых типов ключей для всех расчетных точек



Проведенные исследования показали, наиболее тяжелые режимы работы ключей: для широтно-импульсного, комбинированного и релейного способов регулирования – точка 4, а для частотно-импульсного – точка 2 пусковой диаграммы.

Таким образом, сравнительный анализ показал, что оптимальной по критерию минимума потерь энергии в ключе элементной базой силовых ключей для привода троллейбуса будут тиристоры SCR в сочетании с широтно-импульсным способом регулирования.

Применение ЧИР обеспечивает близкие по значению потери энергии в ключе, но для поддержания пульсаций тока ТЭД в заданном диапазоне требуется установка выходного сглаживающего дросселя с индуктивностью, в 5...6 раз превышающей индуктивность дросселя, необходимого при ШИР.

Предложенная методика определения элементной базы и способа регулирования может использоваться при расчетах приводов постоянного тока различной мощности.

#### **1.4.3. ВЫБОР СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДВОДИМОГО К ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЮ НАПРЯЖЕНИЯ**

Проведенный выше сравнительный анализ целесообразности применения ключей с различной элементной базой для нужд тяги при различных способах регулирования показал приоритетность использования различных полупроводниковых приборов. Вместе с тем очень важно определить и способ регулирования в соответствии с требованиями электромагнитной совместимости источника питания и тягового электродвигателя по напряжению.

В силу сложившейся традиции подвижной состав безрельсового транспорта оснащался тяговыми электродвигателями с номинальным напряжением, равным напряжению источника питания, что позволяло относительно просто управлять им. На рельсовом транспорте, где тяговый привод является многодвигательным, номинальное напряжение двигателя равно половине напряжения источника питания, что привело к необходимости применять при реостатном способе управления последовательное включение двух двигателей в сильноточных цепях привода.

Надежность работы тягового привода транспортного средства оценивается, прежде всего, по его способности сохранять тяговое или

тормозное усилие при выходе из строя того или иного оборудования, обеспечивающего питание тягового двигателя. Применяющиеся при реостатном способе регулирования перегруппировки двигателей с последовательного на последовательно-параллельное соединение неизбежно сопровождаются кратковременной полной или частичной потерей тягового усилия в момент переключения. Переход к импульсному способу регулирования позволяет частично избежать этого явления. Вместе с тем замена способа регулирования не решила этой проблемы полностью. Действительно, последовательное соединение двигателей, рассчитанных на половинное напряжение, приводит к появлению нежелательных явлений (рис. 1.17, а):

- выход из строя одного электродвигателя влечет за собой отключение цепи из двух последовательно включенных электрических машин, в том числе и исправного двигателя;
- при потере сцепления одной из колесных пар тяговое усилие уменьшается не только на буксующей оси, но и на колесной паре, связанной с двигателем, включенным в силовой цепи последовательно с буксующим.

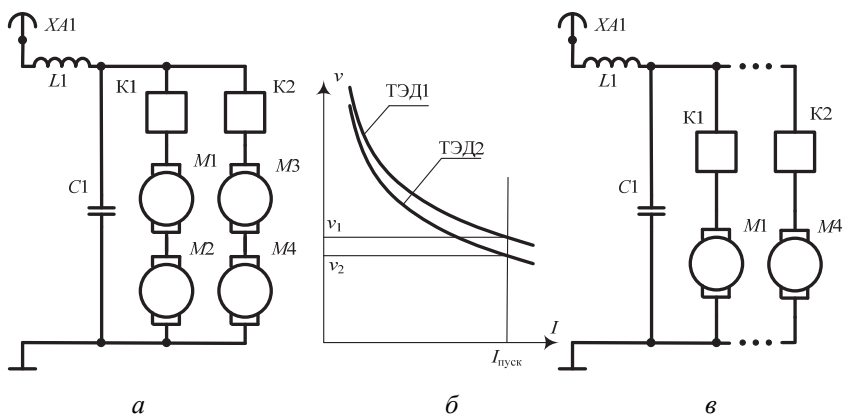


Рис. 1.17. Схемы соединения двигателей

Кроме того, как и в схеме с реостатным пуском, в силу различия электромеханических характеристик тяговых электродвигателей угловые скорости вращения колесных пар, а следовательно, и линейные скорости на ободе их колес различны и не равны линейной скорости подвижного состава (рис. 1.17, б). При этом обе колесные пары



проскальзывают по рельсу: одна колесная пара проскальзывает с буксованием, вторая – с юзом, что приводит, во-первых, к дополнительным потерям энергии и износу бандажей и, во-вторых, к появлению усилий сжатия (растяжения) в рамах ходовых частей [13].

Для исключения этих явлений в многодвигательном приводе целесообразно применять индивидуальное управление (питание) тяговыми электродвигателями, чему способствует использование полупроводниковых преобразователей (рис. 1.17, б). В этом случае выход из строя одного ключа либо тягового электродвигателя (рис. 1.17, в) приведет к снижению тягового усилия лишь на 25 % по сравнению с нормальным режимом работы. Движение же колесных пар осуществляется без проскальзывания.

Применение на электрическом транспорте систем импульсного регулирования подводимой к тяговому двигателю энергии дает возможность получить по сравнению с широко распространенной и заменяемой в настоящее время реостатно-контакторной системой ряд преимуществ, основные из которых:

- более плавный пуск и разгон подвижного состава с предельным по условиям сцепления тяговым усилием;
- увеличение реализуемой тяговым двигателем мощности (до 10 %) за счет стабилизации питающего напряжения и уменьшения пульсации тока;
- экономия электроэнергии при пуске (до 50 %) и за счет рекуперативного торможения.

Поскольку к настоящему времени наибольшее распространение получили тиристорно-импульсные преобразователи постоянно-постоянного тока с частотно- и широтно-импульсным способом регулирования питающего напряжения, сопоставим эти способы. При всем многообразии схемных решений в подавляющем большинстве их лежат схемы однофазных регуляторов с узлом емкостной коммутации SCR-тириستоров.

Отличительной особенностью условий работы тягового электрооборудования, в том числе и преобразователей, по сравнению с общепромышленным является не только широкий диапазон изменения воздействующих на него климатических факторов, но и непрерывно меняющийся уровень питающего напряжения, который, например для подвижного состава трамвая, может изменяться от 400 до 720 В при номинальном его значении на фидере тяговой подстанции 600 В.



Специфические условия работы тяговых двигателей предопределяют ряд требований к преобразователям, основные из которых:

- обеспечение двигателя питанием во всем диапазоне изменения скоростей и тяговых усилий, ограниченном автоматической характеристикой максимального ослабления поля, предельным по сцеплению тяговым усилием и максимальной по условиям «Правил технической эксплуатации» скоростью движения подвижного состава;
- возможность реализации любого закона  $v = f(t)$  как при порожнем, так и при максимально нагруженном подвижном составе;
- возможность обеспечения режима рекуперативного или рекуперативно-реостатного торможения во всем диапазоне скоростей движения подвижного состава вплоть до остановки.

Выбор того или иного способа регулирования влияет, как будет показано ниже, не только на массогабаритные показатели преобразователей в целом, которые помимо собственно статического регулятора включают в себя и фильтровые устройства, но и на их схемное решение. В условиях ограниченности свободного пространства на подвижном составе, а также лимита по весу устанавливаемого оборудования габариты и масса входящих в преобразователь компонентов могут оказаться решающим фактором при выборе как способа регулирования, так и схемы регулятора.

Для определения областей применения частотного и широтного способов регулирования необходимо оговорить условия и критерии оценок, по которым они будут сравниваться. Условиями, в которых производится их сравнение, следующие:

- равенство напряжений источника питания (контактной сети);
- равенство мощностей тяговых двигателей;
- одинаковая элементная база преобразователей;
- опосредованное сравнение через параметры преобразователей и обеспечивающих их работу фильтровых устройств.

В качестве критериев сравнительных оценок используются:

- массогабаритные показатели преобразователей (которые могут быть оценены косвенно по количеству силовых полупроводниковых приборов, входящих в схему);
- массогабаритные показатели фильтровых устройств (которые могут быть оценены также косвенно по номинальным величинам емкостей конденсаторов и индуктивностей дросселей);



- стоимостные показатели преобразователей в целом (которые могут быть оценены по количеству однотипных элементов).

Безусловным при сравнении преобразователей является требование обеспечения одинаковой зоны рабочих режимов двигателей. На рис. 1.18 представлена зона рабочих режимов двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Характерными для нее являются: точка  $a$  – определяется током трогания подвижного состава;  $b$  – соответствует максимальному току двигателя;  $v$  – точка выхода на автоматическую характеристику при максимальном токе;  $z$  – точка ограничения автоматической характеристики по максимальной скорости подвижного состава;  $d$  – точка ограничения скорости при минимальной длительности импульса.

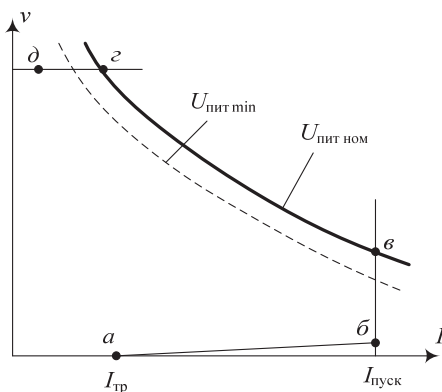


Рис. 1.18. Зона рабочих режимов тягового двигателя подвижного состава

При частотном способе максимального значения частота регулирования достигает в точке  $v$ , а минимального – в точке  $a$  или  $d$ . Если при этом напряжение двигателя равно напряжению питания, то в точке  $v$  импульсы длительностью  $t_{и}$  следуют один за другим без пауз, т. е.  $f_{рег} = f_{max} = 1/t_{и}$ . При широтном способе в точке  $v$  длительность импульса практически равна периоду, а минимального значения она достигает в точке  $a$  или  $d$ .

Таким образом, предметом исследования являются:

- область применения в тяговом электроприводе частотного и широтного способов регулирования питающего напряжения;

- анализ влияния схемных решений преобразователей на зону рабочих режимов тяговых двигателей подвижного состава;
- определение параметров элементов преобразователей;
- определение закона изменения выходного напряжения регуляторов для нужд электрической тяги.

На рис. 1.19 показаны однофазные схемы частотно- (схема *а*) и широтно-импульсного (схема *б*) регуляторов, выполненные на тиристорах, а также диаграммы мгновенных значений токов и напряжений на элементах схем, которые используются при расчете их параметров [17, 18]. Расчет основных параметров элементов преобразователей заключается в выборе силовых полупроводниковых приборов по напряжению, току и рабочей частоте, в расчете величин емкости коммутирующего конденсатора и индуктивности дросселя.

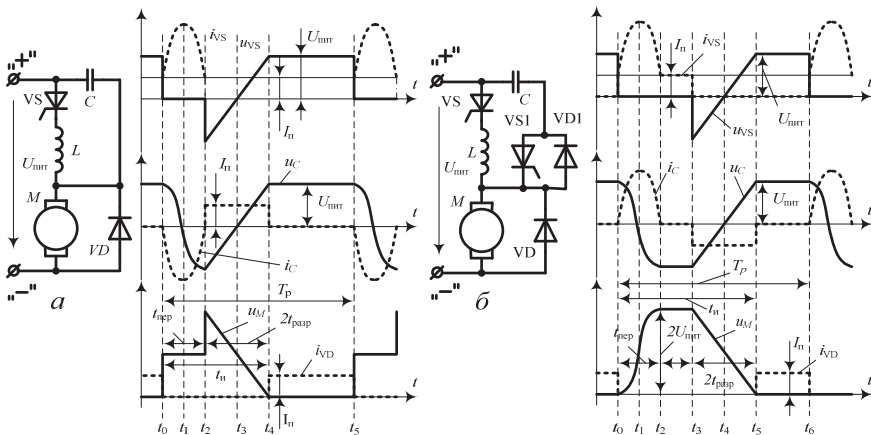


Рис. 1.19. Однофазные схемы частотного (*а*) и широтно-импульсного (*б*) регуляторов

При анализе электромагнитных процессов, протекающих в обеих схемах, выясняется, что прикладываемое к силовым полупроводниковым приборам напряжение – одинаковое и класс приборов по напряжению выбирается из условия  $U_{кл} = k_{зап} U_{эл}$  ( $U_{эл}$  – напряжение на элементе согласно диаграмме,  $k_{зап} = 1,2$  – коэффициент запаса). Равенство мощностей двигателей и их номинальных напряжений приводит к тому, что протекающие в якорях машин токи одинаковы, а следовательно,



тиристоры фаз должны коммутировать одинаковые токи, величина которых  $I_{\pi} = (1,6 \dots 1,8)I_h$ , где  $I_h$  – часовой ток мотора. Величина емкости конденсатора узла коммутации определяется из условия запираания тиристора при самых неблагоприятных условиях – максимальном токе мотора и минимальном напряжении на конденсаторе [18]:

$$C = I_{\text{пуск}} t_{\text{сх}} / U_{\text{пит min}}, \quad (1.8)$$

где  $t_{\text{сх}} = k_{\text{зап}} t_{\text{выкл}}$  – время, предоставляемое схемой для восстановления запирающих свойств тиристора;

$t_{\text{выкл}}$  – паспортное время выключения тиристора.

Величина индуктивности дросселя коммутирующего контура выбирается такой, чтобы при максимальной рабочей частоте преобразователя не происходило перегрева  $p$ – $n$ -перехода тиристора фазы. При использовании в схемах одинаковых тириستоров и частоты работы преобразователей, равной по величине максимально допустимой для тириستоров, в соответствии с диаграммами токов фаз для частотного регулятора при максимальной частоте регулятора (когда импульсы следуют непрерывно) средняя величина тока через тиристор

$$I_{\text{VS}} = (I_{\pi} + 2I_C/\pi) f_{\text{max}} t_{\text{пер}},$$

где  $t_{\text{пер}}$  – время колебательного перезаряда коммутирующего конденсатора;

$I_C$  – амплитуда перезарядного тока конденсатора.

С другой стороны, величина допустимого по условиям перегрева  $p$ – $n$ -перехода тиристора среднего тока [19]

$$I_{\text{VS}} = \sqrt{\frac{U_{\text{VS}}^2}{4r_{\text{VS}}^2} + \frac{[T_{\text{доп}}] - T_a}{r_{\text{VS}} R_T}} - \frac{U_{\text{VS}}}{2r_{\text{VS}}}, \quad (1.9)$$

где  $U_{\text{VS}}$  – пороговое напряжение тиристора;

$r_{\text{VS}}$  – дифференциальное сопротивление тиристора;

$[T_{\text{доп}}]$  – допустимая температура  $p$ – $n$ -перехода;

$T_a$  – температура окружающей среды;

$R_T$  – переходное сопротивление  $p$ – $n$ -переход тиристора–окружающая среда.

Величина индуктивности коммутирующего дросселя может быть определена из условия  $t_{\text{пер}} = t_{\text{и}} - 2t_{\text{сх}}$ . Тогда  $L = t_{\text{пер}}^2 / \pi^2 C$ .

В широтно-импульсном регуляторе величина индуктивности определяется из условия обеспечения минимальной длительности импульса, которая соответствует точке  $I$  зоны ( $t_{\text{и}} = I_{\text{тр}} r_{\text{дв}} / f_{\text{max}} U_{\text{пит max}}$ ). Длительность импульса (см. рис. 1.11), равная  $t_{\text{и}} = t_{\text{пер}} + 2t_{\text{разр}}$ , обеспечивается величиной индуктивности

$$L = \left( I_{\text{тр}} r_{\text{дв}} / f_{\text{max}} U_{\text{пит max}} - 2CU_{\text{пит max}} / I_{\text{тр}} \right)^2 / \pi^2 C,$$

где  $r_{\text{дв}}$  – сопротивление якорной цепи двигателя;

$t_{\text{разр}} = CU_{\text{пит max}} / I_{\text{тр}}$  – время разряда до нуля конденсатора, заряженного до максимального напряжения источника питания [величина емкости конденсатора рассчитывается по формуле (1.8)].

Своего максимального значения средняя величина тока  $I_{\text{VS}}$ , протекающего через тиристор фазы, достигает, как и в схеме частотного регулятора, в точке 4, но для нее

$$I_{\text{VS}} = \left[ I_{\text{пуск}} (T_{\text{р}} - 2t_{\text{сх}}) + 2I_{\text{с}} t_{\text{пер}} / \pi \right] / T_{\text{р}}.$$

Поскольку величина  $t_{\text{пер}}$  в схеме широтно-импульсного регулятора существенно меньше, чем в схеме частотного, амплитуда тока  $I_{\text{с}}$  в ней больше и проверку на перегрев  $p$ - $n$ -перехода тиристора необходимо делать для момента времени окончания протекания  $I_{\text{с}}$ . Тогда величина среднего тока тиристора

$$I_{\text{VS}} = \sqrt{\frac{U_{\text{VS}}^2}{4r_{\text{VS}}^2} + \frac{[T_{\text{доп}}] - T_{\text{а}} - (U_{\text{VS}} + I_{\text{пуск}} r_{\text{VS}}) I_{\text{пуск}} R_{\text{T}}}{r_{\text{VS}} R_{\text{T}}}} - \frac{U_{\text{VS}}}{2r_{\text{VS}}}. \quad (1.10)$$

При сравнении (1.9) и (1.10) выясняется, что второе слагаемое подкоренного выражения (1.10) при реальных параметрах силовых полупроводниковых элементов отличается от аналогичного слагаемого (1.9) не более чем на 5...10 %. Поэтому с достаточной для инженерных расчетов точностью можно положить равными значения допустимых средних токов тиристорov в обеих схемах.

Для оценки параметров фильтровых устройств в обеих схемах необходимо определить минимальную частоту работы преобразователей [20]. В широтно-импульсном она равна  $f_{\text{min}} = f_{\text{max}} = f_{\text{р}}$ , а в частотно-импульсном, как указывалось выше,  $-f_{\text{min}} = f_{\text{а}}$  (см. рис. 1.11).



Для определения величины частоты регулирования в точке 1 воспользуемся известным соотношением [21]

$$U_{\text{дв}} = \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{р}}} U_{\text{пит}} = t_{\text{и}} f_{\text{р}} U_{\text{пит}} = i_{\text{дв}} r_{\text{дв}} + c_e \Phi v, \quad (1.11)$$

в соответствии с которым:

- для точки 1 выражение преобразуется к виду

$$U_{\text{дв1}} = I_{\text{тр}} r_{\text{дв}},$$

где  $I_{\text{тр}} \approx (0,2 \dots 0,25) I_{\text{п}}$  – ток трогания экипажа;

- для точки 2 (когда скорость еще достаточно мала и можно положить  $c_e \Phi v \approx 0$ ) –

$$U_{\text{дв2}} = I_{\text{пуск}} r_{\text{дв}}; \quad (1.12)$$

- для точки 4 –

$$U_{\text{дв4}} = I_{\text{пуск}} r_{\text{дв}} + c_e \Phi v_{\text{пп}}, \quad (1.13)$$

где  $v_{\text{пп}}$  – скорость выхода на автоматическую характеристику (в зависимости от типа используемых ТЭД она колеблется от 14 до 20 км/ч).

Полагая величину  $t_{\text{и}} = \text{const}$  и воспользовавшись (1.12), имеем:

- для точки 1  $U_{\text{дв1}} = t_{\text{и}} f_a U_{\text{пит}} = I_{\text{тр}} r_{\text{дв}};$
- для точки 2  $U_{\text{дв1}} = t_{\text{и}} f_2 U_{\text{пит}} = (4 \dots 5) I_{\text{тр}} r_{\text{дв}},$

откуда  $f_2 = (4 \dots 5) f_a$ .

Соотношения частот регулирования для точек 2 и 4 можно получить на основе выражений (1.12) и (1.13). Положим в (1.12)  $I_{\text{пуск}} r_{\text{дв}} = 0$ , что вполне приемлемо для инженерной точности расчетов, так как у существующих типов ТЭД  $I_{\text{п}} r_{\text{дв}} \approx (0,05 \dots 0,08) U_{\text{пит}}$ . Учитывая, что в точке 2 скорость экипажа не превышает величины  $v_2 = 1 \dots 2$  км/ч, получаем

$$U_{\text{дв}} = c_e \Phi v_2 = t_{\text{и}} f_2 U_{\text{пит}}$$

и

$$U_{\text{дв4}} = c_e \Phi v_{\text{пп}} = t_{\text{и}} f_2 U_{\text{пит}},$$



откуда  $f_4 = \frac{v_{\text{пп}}}{v_4} f_4 \approx 10 f_4 \approx (40 \dots 50) f_1$ .

При одинаковой величине индуктивности дросселя фильтра  $L$  величина емкости конденсатора входного фильтра, определяемая соотношением

$$C = 1 / (1, 2\pi f)^2 L, \quad (1.14)$$

для частотно-импульсного регулятора в 40...50 раз больше, чем в широтно-импульсном, т. е. и массогабаритные, и стоимостные показатели фильтровых устройств несоизмеримы.

При использовании в схеме частотного регулирования двигателя одинаковой мощности, но рассчитанного на половинное напряжение, и одинаковой элементной базы величина среднего тока через тиристор  $I_{\text{VS}} = 2(I_{\text{н}} + I_{\text{C}} / \pi) f_{\text{max}} t_{\text{пер}}$ . Величина допустимого по условиям нагрева среднего тока тиристора

$$I_{\text{VS}} = \sqrt{\frac{U_{\text{VS}}^2}{4r_{\text{VS}}^2} + \frac{[T_{\text{доп}}] - T_{\text{а}}}{r_{\text{VS}} R_T f_{\text{max}} t_{\text{пер}}}} - \frac{U_{\text{VS}}}{2r_{\text{VS}}}.$$

Поскольку частота работы преобразователя в точке  $b$  уменьшилась по сравнению с предыдущим вариантом вдвое, ее можно вдвое увеличить, так как это позволяет сделать рабочая частота полупроводниковых приборов. Увеличение частоты приводит к необходимости уменьшать вдвое длительность импульса, которая теперь определяется как  $t_{\text{и}} = 1/2f_{\text{max}}$ , и при неизменном значении  $t_{\text{cx}}$  — к уменьшению величины  $t_{\text{пер}}$ .

Таким образом, в точке  $a$  зоны частота повышается также в два раза, а величина емкости конденсатора входного фильтра в соответствии с (1.14) уменьшается вчетверо, оставаясь недопустимо большой в сравнении с широтным вариантом. Поэтому, несмотря на большее количество полупроводниковых приборов фазы широтного преобразователя (в 3 раза), его схема предпочтительней, так как суммарные массогабаритные показатели (с учетом фильтра) преобразователя в целом существенно меньше, чем для схемы частотного.

Однако при увеличении количества фаз частотного преобразователя до трех (с целью выравнивания схем по количеству полупроводни-



ковых приборов) и применении сдвига по фазе между ними частота работы фильтра повышается втрое, а величина емкости его конденсатора еще уменьшается в девять раз и становится близкой по значению к конденсатору широтного варианта, т. е. вполне конкурентоспособной.

Увеличение количества фаз преобразователя приводит к необходимости уменьшать длительность импульса, продолжительность которого сокращается в шесть раз по сравнению с первоначальной. Вместе с тем длительность импульса в частотном варианте преобразователя при трехфазной схеме в 2...3 раза больше по сравнению с широтным, а следовательно, тиристоры частотного преобразователя работают в более «мягком» режиме. При переходе к четырехфазной схеме с общим узлом емкостной коммутации (рис. 1.20), несмотря на некоторый проигрыш в количестве силовых полупроводниковых приборов, частотный преобразователь становится предпочтительнее, поскольку:

- массогабаритные и стоимостные показатели фильтровых устройств в обеих схемах практически одинаковы;
- массогабаритные и стоимостные показатели собственно преобразователей почти одинаковы (некоторое увеличение количества тиристоров в частотном варианте может быть скомпенсировано переходом на слаботочные того же типа, так как их токовая нагрузка меньше, чем у тиристора в широтном варианте исполнения);
- частота пульсации (и размах) выходного напряжения, т. е. на коллекторе тягового двигателя, существенно меньше, что улучшает условия его работы;

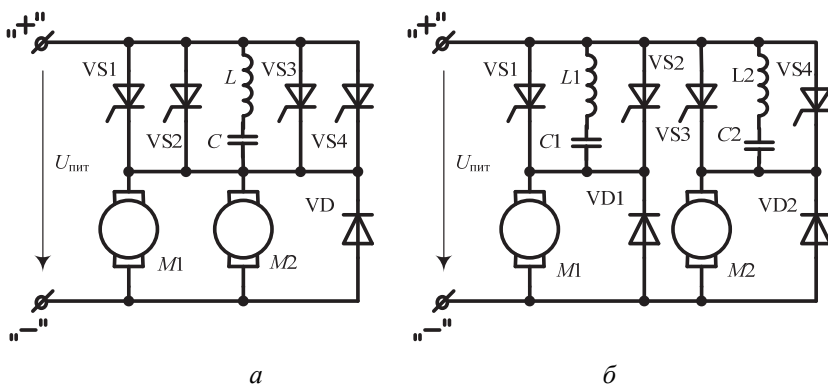


Рис. 1.20. Схемные решения преобразователей



- надежность работы преобразователя, определяемая как способом запираания тиристоров, так и количеством фаз в нем, выше, чем у широтного.

Сравнивая возможности применения частотного и широтного регуляторов в схемах питания тяговых двигателей подвижного состава, нельзя не заметить, что на рельсовом транспорте преимущественное распространение получили двигатели с напряжением на коллекторе, равным половине питающего, которые соответствуют последнему из рассмотренных вариантов. Если при этом учесть, что мощность двигателя на экипаже равна половине от рассмотренной в последнем варианте, то преимущества частотного варианта преобразователя возрастают еще и потому, что:

- четырехфазный преобразователь можно использовать для питания двух тяговых двигателей, соединенных параллельно (такое схемное решение повышает противобуксовочные свойства транспортного средства);

- разбиение четырехфазного преобразователя (рис. 1.20) на два двухфазных (с добавлением еще одного узла коммутации) повышает надежность работы не только преобразователя, но и тягового оборудования в целом (так как выход из строя одной фазы преобразователя или одного тягового двигателя приводит к меньшей потере тягового усилия, чем в схеме широтного варианта);

- при снижении величины питающего напряжения до минимального уровня в схеме с широтным способом мощность тягового двигателя не реализуется полностью, так как напряжение на коллекторе двигателя не достигает номинального значения (см. рис. 1.11).

Анализ возможностей использования преобразователей с тем или иным схемным решением будет неполным, если не исследовать соответствие их выходных характеристик зоне рабочих режимов тягового двигателя. За отправную точку исследований принимается точка 3 зоны рабочих режимов (см. рис. 1.11). Она стала исходной потому, что именно в ней напряжение на коллекторе тягового двигателя становится равным номинальному, а частота работы регулятора достигает максимального значения.

В частотно-импульсном регуляторе изменение частоты работы преобразователя следует производить в функции тока ТЭД и скорости экипажа [21, 22]. Для построения закона регулирования необходимо



рассмотреть более детально, от чего зависит длительность импульса  $t_{\text{и}}$ . Согласно диаграммам рис. 1.19, а

$$t_{\text{и}} = (t_2 - t_0) + (t_4 - t_2) = t_{\text{пз}} + t_3, \quad (1.15)$$

где  $t_{\text{пз}} = \pi\sqrt{LC}$  – время перезаряда коммутирующего конденсатора;

$t_3 \approx 2t_{\text{сх}} = \frac{2U_{\text{пит}}C}{I}$  – время запираания тиристора и заряда  $C$  от 0 до  $U_{\text{пит}}$ .

Из формулы (1.15) видно, что  $t_{\text{и}}$  – величина непостоянная, зависящая от тока ТЭД. После достижения автоматической характеристики (кривая  $U_{\text{дв ном}}$  на рис. 1.21) и дальнейшего разгона экипажа ток мотора уменьшается, что приводит к увеличению длительности  $t_3$  и, как следствие, и увеличению  $t_{\text{и}}$ . При сохранении частоты регулирования это приводит к возрастанию подводимого к ТЭД напряжения (кривая  $U_f$  на рис. 1.21), что недопустимо. Поэтому по мере разгона подвижного состава необходимо либо стабилизировать значение  $t_{\text{и}}$ , либо снижать частоту работы преобразователя. Первое достигается аппаратными средствами путем применения цепей ускоренного перезаряда  $C$ . Но этот способ, во-первых, не позволяет достичь жесткой стабилизации ( $t_{\text{и}}$ , как было показано в схеме широтно-импульсного регулятора, продолжает увеличиваться, хотя и в меньшей степени); во-вторых, ведет к усложнению и удорожанию преобразователя. Второй способ более привлекателен, поэтому рассмотрим его подробнее.

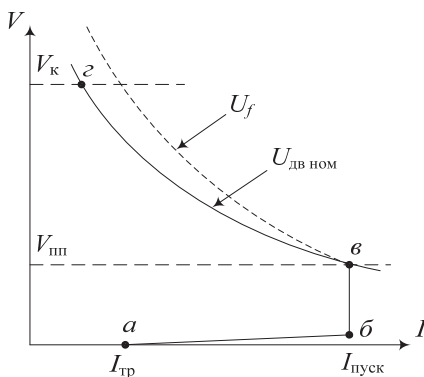


Рис. 1.21. Пусковые характеристики при различных  $U$



Представив выражение (1.15) в виде

$$t_{\text{и}} = k_1 + \frac{k_2}{i_{\text{дв}}} \quad (1.16)$$

и используя (1.16), проанализируем влияние изменения  $i_{\text{дв}}$  и  $v$  на величины  $t_{\text{и}}$  и  $f_{\text{р}}$ . Из (1.16) следует, что функция  $t(i_{\text{дв}})$  носит гиперболический характер. Зависимость  $u_{\text{дв}}(v)$  – более сложная: первая составляющая выражения (1.16) зависит от  $i_{\text{дв}}$  линейно; вторая – нелинейно от  $i_{\text{дв}}$  (что связано с кривой  $B(H)$  намагничивания стали) и линейно от  $v$ . Решая совместно (1.11) и (1.16) и учитывая, что кривая  $\Phi(i_{\text{дв}})$  может быть представлена в виде

$$\Phi = k_3 i_{\text{дв}} - \frac{k_4}{i_{\text{дв}}^2},$$

получаем выражение для закона регулирования

$$f_{\text{р}} = \frac{u_{\text{дв}}}{t_{\text{и}} U_{\text{пит}}} = \frac{i_{\text{дв}} r_{\text{дв}} + c_e \Phi v}{t_{\text{и}} U_{\text{пит}}} = \frac{i_{\text{дв}}^2 r_{\text{дв}} + c_e \left( k_3 i_{\text{дв}}^2 - \frac{k_4}{i_{\text{дв}}} \right) v}{k_1 i_{\text{дв}} + k_2},$$

который носит трансцендентный характер.

На участках  $a-b$  и  $в-г$  пусковой диаграммы трансцендентный характер зависимости проявляется в полной мере. На участке  $б-в$  закон регулирования носит линейный характер и приводится к виду

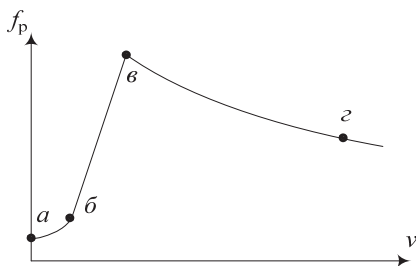
$$f_{\text{р}} = k_5 + k_6 v,$$

$$\text{где } k_5 = \frac{r_{\text{ТЭД}} I_{\text{пуск}}^2}{(k_1 I_{\text{пуск}} + k_2)};$$

$$k_6 = \frac{c_e \left( k_3 I_{\text{пуск}}^2 - k_4 / I_{\text{пуск}} \right)}{(k_1 I_{\text{пуск}} + k_2)}.$$

Кривая зависимости  $f_{\text{р}}(v)$  представлена на рис. 1.22.

В широтно-импульсном регуляторе длительность импульса определяется суммой трех периодов:  $t_{\text{пер}}$  – временем проводящего состояния

Рис. 1.22. Зависимость  $f_p(v)$ 

тиристора, когда через него протекает ток двигателя и ток перезаряда коммутирующего конденсатора;  $t_{\text{дв}}$  – временем проводящего состояния тиристора, когда по нему протекает только ток мотора;  $2t_{\text{разр}}$  – временем разряда коммутирующего конденсатора током мотора до нуля и перезаряда его до напряжения источника питания ( $t_{\text{и}} = t_{\text{пер}} + t_{\text{дв}} + 2t_{\text{разр}}$ ). Длительность  $t_{\text{пер}}$  зависит от параметров  $C$  и  $L$ ,  $t_{\text{разр}}$  – от величины питающего напряжения и тока двигателя (см. выше) при принятом  $C$ , а  $t_{\text{дв}}$  – от величины напряжения, которое необходимо подать на двигатель (в точке  $б$  рис. 1.18 она максимальна, в точке  $а$  равна нулю). Если первое слагаемое – величина неизменная в любой точке зоны рабочих режимов, то третье изменяется в широких пределах. Так, при постоянстве тока двигателя (кривая  $б-в$ ) изменение питающего напряжения на токоприемнике подвижного состава трамвая от минимального до максимального значения приводит к двукратному изменению его длительности. При переходе от точки  $б$  к точке  $а$  зоны уменьшение тока мотора в 4...5 раз увеличивает длительность  $t_{\text{разр}}$ , что приводит к возрастанию  $t_{\text{и}}$ , а следовательно, и  $I_{\text{тр}}$ , а это недопустимо. Уменьшать  $I_{\text{тр}}$  можно либо увеличением  $T_p$ , что нежелательно, так как это приводит к недоиспользованию тиристора по частоте с вытекающими отсюда последствиями, либо сокращением  $t_{\text{разр}}$ . Последнего достигают обычно схемным путем, стабилизируя время разряда включением дополнительных контуров ускоренного перезаряда коммутирующего конденсатора  $C$ . Наиболее эффективно применение тиристорного контура ускоренного перезаряда (рис. 1.23). Индуктивность дросселя  $L$  контура определяется исходя из величины допустимой амплитуды тока перезарядного тиристора VS1(VS2), рассчитанной по условию нагрева  $p-n$ -перехода. Однако даже применение такого контура не позволяет полностью

исключить влияние уменьшения коммутируемого тока на длительность времени перезаряда (рис. 1.23). При движении по автоматической характеристике (кривая  $\epsilon$ – $z$  на рис. 1.18) по мере разгона подвижного состава ток тягового двигателя снижается, что, так же как и при движении по кривой  $a$ – $b$ , приводит к увеличению  $t_{\text{разр}}$  и необходимости его стабилизации. Необходимость стабилизации усугубляется тем фактом, что длительность импульса достигла величины периода регулирования и схема не обеспечивает запаса времени на полный перезаряд коммутирующего конденсатора, а это неизбежно приведет к срыву процесса регулирования. Поскольку, как отмечалось выше, достичь абсолютной стабилизации времени разряда не удастся, в качестве вынужденного решения приходится прибегать к понижению частоты регулирования, которое тем значительнее, чем существеннее уменьшение тока двигателя.

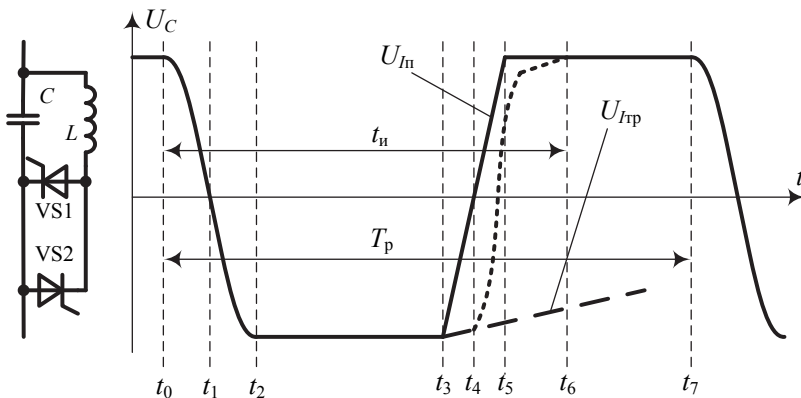


Рис. 1.23. Схема и диаграммы напряжений цепи ускоренного перезаряда

При движении по линии ограничения скорости подвижного состава (кривая  $z$ – $d$ ) уменьшается длительность импульса, что позволяет постепенно поднять частоту регулирования до первоначального значения. В точке  $d$ , положение которой на кривой определяется величиной тока тягового двигателя из условия равенства силы тяги силам сопротивления движению ( $F_{\text{тяг}} = W_{\text{сопр}}$ ), длительность импульса становится минимальной.

На рис. 1.24 показаны зона рабочих режимов тягового двигателя и кривые предельных зависимостей  $T(v)$  и  $t_{\text{и}}(v)$  для широтного и  $f_{\text{рег}}(v)$  –



для частотного регуляторов, позволяющих осуществлять движение экипажа по кривой  $a-b-v-z-d$ . Там же приведены кривые зависимости изменения длительности импульса при реализации предельной по условиям сцепления силы тяги и предельные кривые закона регулирования частоты в функции напряжения питания. Для построения использовали зависимости  $t_n(I)$ ,  $f(I)$ , а также электромеханические характеристики  $F(I)$ ,  $v(I)$  тяговых электродвигателей.

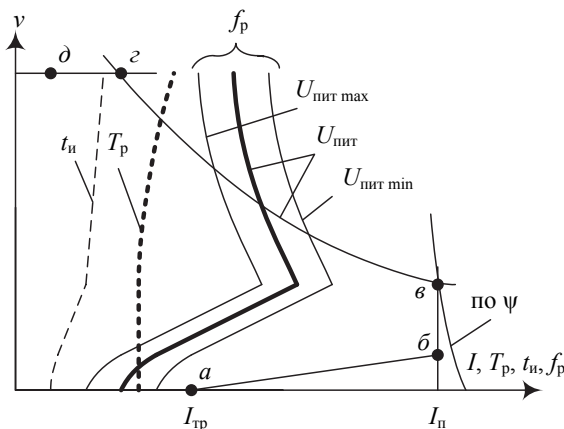


Рис. 1.24. Кривые предельных зависимостей  $T(v)$  и  $t_n(v)$

Проведенный сравнительный анализ целесообразности применения различных способов регулирования для нужд тяги показал, что:

- при использовании на подвижном составе тяговых двигателей с номинальным напряжением, равным напряжению источника питания, предпочтение следует отдавать широтно-импульсным преобразователям, а при напряжении двигателя, равном половине напряжения источника питания, — частотно-импульсным;
- при определении параметров элементной базы преобразователей необходимо оперировать предельными значениями величин токов и напряжений в схемах согласно диаграммам их мгновенных значений с использованием рекомендованных коэффициентов запаса;
- применение в схемах преобразователей контуров стабилизации времени перезаряда коммутирующего конденсатора не позволяет достичь этой цели в полной мере, вследствие чего после достижения

автоматической характеристики необходимо уменьшать частоту регулирования как при широтном, так и при частотном способе управления;

- аналитические выражения законов регулирования носят трансцендентный характер, а графическое выражение представлено на рис. 1.24;

- использование на подвижном составе тяговых двигателей с номинальным напряжением, равным напряжению источника питания, позволяет реализовать заложенную в них мощность полностью при любом способе регулирования только при напряжениях источника не ниже номинального напряжения двигателя. При использовании двигателей с меньшим номинальным напряжением – всю зону.

Последнее условие практически не выполняется. В качестве примера следует привести разброс величины питающего напряжения в контактной сети троллейбуса: при номинальном напряжении на токоприемнике в 550 В (равном номинальному напряжению мотора) минимально допустимое составляет лишь 400 В. Столь значительное в сравнении с общепромышленным приводом снижение питающего напряжения ведет не только к потере подвижным составом динамических показателей, но и утяжелению режима работы электрооборудования, включая и полупроводниковый преобразователь.

#### 1.4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В качестве критериев сравнительной оценки преобразователей следует использовать традиционные для технических устройств массогабаритные и стоимостные показатели с соблюдением условия единства элементной базы при выборе способа регулирования, а также единства способа регулирования при сравнении элементной базы. Так как для обеспечения работоспособности любого преобразователя необходимо применять входные и выходные фильтровые устройства, то при сравнении преобразователей учитываются массогабаритные и стоимостные показатели и фильтров. Поскольку элементная база фильтровых устройств преобразователей для электрической тяги не зависит от способа регулирования и элементной базы собственно преобразователей, определять показатели фильтровых устройств следует по количественному составу



входящих в них элементов. В дополнение необходимо отметить, что на подвижном составе требование обеспечения работоспособности преобразователя по критерию ограничения минимальной величины просадки входного напряжения менее жесткое по сравнению с требованием защиты потребителей от воздействия радиопомех, вызванных работой преобразователя транспортного средства.

Особенностью подвижного состава электрического транспорта в сравнении с другими видами является наличие в соответствии с нормативными документами, по меньшей мере, двух независимых систем торможения, одна из которых непременно должна осуществлять электрическое торможение. Поэтому импульсный преобразователь, используемый для пуска тягового двигателя, должен обеспечивать и режим его электрического торможения и в первую очередь – рекуперативного, позволяющего, как указывалось ранее, уменьшить энергопотребление, повысив тем самым конкурентоспособность электрического транспорта по отношению к другим видам. Наибольшего эффекта при рекуперации энергии удастся достичь на сравнительно коротких перегонах, которые характерны для наземного городского транспорта. Объясняется это тем, что при увеличении длины перегона движение по нему осуществляется, как правило, с регламентированной скоростью под током, а это приводит к росту потребления электроэнергии при неизменной величине запасенной кинетической энергии подвижного состава, часть которой и реализуется в процессе рекуперативного торможения в виде электрической, возвращаемой в источник.

Для количественной оценки доли сэкономленной (за счет рекуперации) энергии в функции длины перегона воспользуемся известной методикой расчета кривых движения при следующих условиях:

- используется один и тот же подвижной состав на перегонах различной длины;
- за базовый принимается стандартный перегон (при изменении длины перегона на нем сохраняется уклон базового);
- предельная величина скорости экипажа не превышает допустимую (регламентированную «Правилами дорожного движения», либо конструктивной скоростью);
- напряжение на токоприемнике подвижного состава неизменно и равно номинальному напряжению сети.

При проведении исследований учитывалась только та часть энергии, которая расходовалась на движение. Аналитическое выражение



баланса энергии, затраченной на движение без учета потерь в приводе, имеет вид

$$A_{\text{ист}} = A_{\text{кин}} + A_w = (1 + \gamma)G_{\text{пс}}v_{\text{в}}^2 / 2g + \int_0^{l_{\text{п}}} G_{\text{пс}} w dl, \quad (1.17)$$

где  $A_{\text{ист}} = \int_0^{t_{\text{п}}} u i dt$  – потребленная подвижным составом за время пуска

ка  $t_{\text{п}}$  энергия;

$A_{\text{кин}}$  – кинетическая энергия подвижного состава, накопленная к моменту перехода на выбег;

$v_{\text{в}}$  – скорость начала выбега.

Поскольку величина тока  $i$ , потребляемого из сети, зависит от электромеханических характеристик двигателя и представление его в аналитическом виде затруднительно, используемые в настоящее время методы расчета основаны на замене подынтегральных зависимостей эквивалентными их значениями по длине перегона.

Аналитическое выражение (1.17) описывает классическую схему движения транспортного средства, выполненного в режиме «пуск–выбег–торможение», которому соответствует движение на обособленном полотне. В реальных условиях из-за влияния случайных факторов схема движения, как правило, содержит повторные пуски и подтормаживания, что приводит к увеличению затрат энергии на движение. В этом случае аналитическое выражение для расчета потребленной от источника энергии на движение без учета потерь в приводе приобретает вид

$$A_{\text{ист}} = (1 + \gamma)G_{\text{пс}}v_{\text{в}_k}^2 / 2g + G_{\text{пс}} \sum_1^k \left( \int_{l_{k1}}^{l_{k2}} W_{\text{п}} dl + \int_{l_{k1}}^{l_{(r+1)1}} W_{\text{в}} dl + \int_{l_{(k+1)1}}^{l_{\text{неп}}} W_{\text{в}} dl \right),$$

где  $l_{k1}$  и  $l_{k2}$  – положение экипажа на перегоне в начале и конце  $k$ -го пуска;

$W_{\text{п}}$  – удельное сопротивление движению при пуске;

$W_{\text{в}}$  – удельное сопротивление движению при выбеге.

Повторный пуск подвижного состава производится, как правило, после выбега, подтормаживания (служебного электрического тормо-



жения с замедлением не более  $1,5 \text{ м/с}^2$ ) или экстренного торможения, при котором величина замедления достигает  $3,5 \dots 4 \text{ м/с}^2$  за счет совместного действия электрического и механического тормозов. Рекуперация энергии подвижным составом в режимах подтормаживания и экстренного торможения возможна при соблюдении следующих требований:

- наличия достаточной кинетической энергии (снижение скорости ниже определенного уровня приводит к неэффективности электрического торможения и необходимости замещать его механическим);
- наличия потребителя электрической энергии;
- схемного обеспечения перехода из режима пуска в режим рекуперативного торможения.

Запасенной подвижным составом при разгоне кинетической энергии достаточно для обеспечения рекуперативного торможения с конструктивной скорости до минимальной, определяемой выражением

$$v_{\min} = k(U_{\text{пит}} + I_{\text{торм}}r) / c_e \Phi ,$$

где  $I_{\text{торм}}$  – тормозной ток, обеспечивающий замедление  $1,5 \text{ м/с}^2$ ;

$r$  – сопротивление контура рекуперации;

$k = R_k / i_{\text{ред}}$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от радиуса колеса ( $R_k$ ) и передаточного числа редуктора ( $i_{\text{ред}}$ ).

При использовании на подвижном составе импульсного регулирования эффективное рекуперативное торможение возможно до скорости  $5 \dots 7 \text{ км/ч}$ , а при отсутствии регулятора – до  $15 \dots 20 \text{ км/ч}$  [23, 24].

Для количественной оценки теоретически возможного возврата энергии в источник воспользуемся статистическими данными по длинам перегонов. При оптимальной длине перегона для мегаполисов в  $500 \dots 600 \text{ м}$ , как указывалось выше, минимальная его длина составляет  $200 \dots 250 \text{ м}$ , а максимальная –  $800$  и более. Проведенные тягово-энергетические расчеты показывают, что, например, для однокузовного троллейбуса, оснащенного тяговым двигателем ДК-210А3, для перегонов более  $250 \text{ м}$  в процессе пуска скорость не поднимается выше  $60 \text{ км/ч}$ , а величина скорости начала торможения незначительно зависит от длины перегона и может быть принята равной  $30 \text{ км/ч}$  (рис. 1.25). При исполнении классической схемы движения на перегоне оптимальной длины к моменту начала торможения по-



движной состав сохраняет лишь 25 % кинетической энергии от накопленной к моменту начала выбега. Часть этой энергии (до 10 %) расходуется на преодоление сопротивления движению при выбеге и торможении до полной остановки, а часть (до 3 %) – в механических тормозах при дотормаживании со скорости 5...7 км/ч. Таким образом, в классическом варианте движения теоретически возможна рекуперация до 20 % (а с учетом КПД импульсного регулятора и мотора – до 17 %) энергии от накопленной экипажем кинетической при разгоне до 60 км/ч.

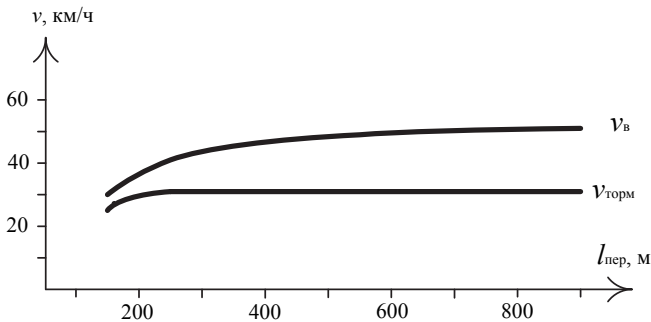


Рис. 1.25. Зависимости скоростей начала выбега и торможения в функции длины перегона

На рис. 1.26 показана кривая процентного отношения энергии рекуперативного торможения  $A_{\text{торм}}$  к потребленной при пуске  $A_{\text{пуск}}$  в функции длины перегона для того же троллейбуса. Приведенная зависимость показывает, что с уменьшением длины перегона  $l_{\text{пер}}$  доля рекуперированной энергии возрастает. Кроме того, с уменьшением длины перегона, как следует из рис. 1.27, снижается и расход энергии на движение. Однако при этом:

- существенно снижается скорость сообщения, а следовательно, и привлекательность троллейбуса для пассажиров (в плане затрат времени на поездку);
- резко возрастает удельный расход энергии на движение, который служит обычно универсальным показателем экономичности транспортного средства.

Потребителем возвращаемой энергии может быть как сам подвижной состав, так и первичный источник – контактная сеть. Однако

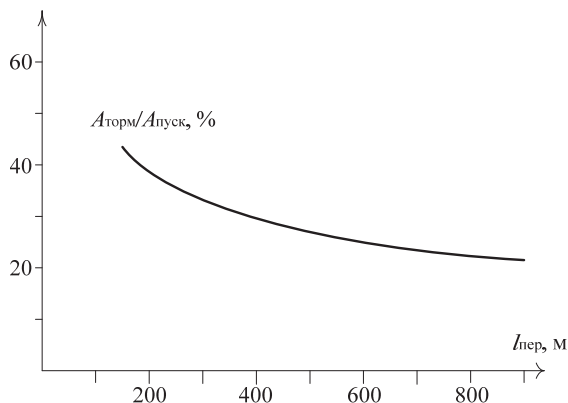


Рис. 1.26. Зависимость  $A_{\text{торм}}/A_{\text{пуск}}$  в функции длины перегона

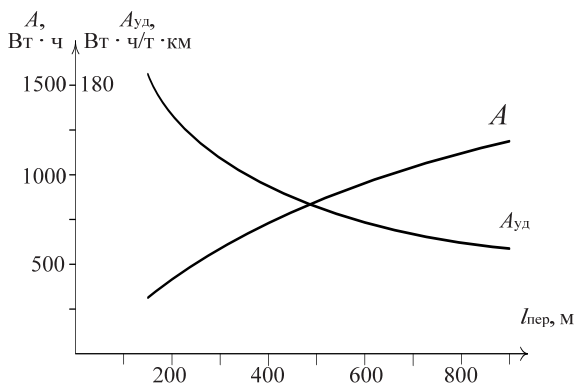


Рис. 1.27. Кривые полного и удельного расхода энергии в функции длины перегона

последний готов потребить энергию только в том случае, когда производится пуск другого подвижного состава. При допущении постоянства интервала движения среднее расстояние между рекуперирующим и пускающимся подвижным составом достигает при этом величины примерно 10 км [25]. Если принять во внимание, что при полном электрическом соединении контактных подвесок параллельных путей активное удельное сопротивление питающей подвижной состав



сети троллейбуса составляет  $r_{уд} = 0,2$  мОм/м, то при таком среднем расстоянии между подвижными единицами в момент рекуперации сопротивление сети будет 2 Ом. Поскольку тормозной ток  $I_{\text{торм}}$  равен примерно  $I_{\text{торм}} = 300...400$  А, все напряжение, вырабатываемое тормозящим подвижным составом, упадет в питающей сети, что делает процесс рекуперации нецелесообразным.

Выход из такой ситуации – в рекуперации на накопитель энергии в межподстанционной зоне, либо на транспортном средстве. Последний вариант предпочтителен, так как потери на передачу энергии потребителю в этом случае минимальны, хотя и более затратен, поскольку оснащать накопителем необходимо каждую единицу подвижного состава.

Переход из режима пуска в режим электрического торможения сопровождается, как известно:

- коммутацией электрических цепей подвижного состава с целью обеспечения возникновения самого процесса торможения;
- созданием тормозного контура.

Независимо от вида электрического торможения (реостатное, рекуперативное) оно обычно достигается в машинах постоянного тока реверсированием обмотки якоря и производится тем же аппаратом, который используется для изменения направления движения контактным (рис. 1.28, *а*) либо бесконтактным (рис. 1.28, *б*) реверсором.

Для создания тормозного контура в режиме реостатного торможения необходимо подключить тормозной резистор, установив в силовых цепях подвижного состава еще один контактор. Вариант исполнения схемного решения для однодвигательного экипажа показан на рис. 1.29. При пуске замыкается контакт К1, присоединяя двигатель постоянного тока к источнику питания через импульсный регулятор, выполненный на IGBT-транзисторе. При переходе к режиму реостатного торможения размыкается контакт К1, отключая цепь мотора от источника питания, производится реверсирование якорной обмотки двигателя *М* и замыкается контакт К2, что приводит к образованию тормозного контура.

Если же применяется рекуперативное торможение, то создать тормозной контур можно двумя способами:

- коммутацией цепей импульсного регулятора, что достигается добавлением в электрические цепи подвижного состава дополнительных контактных либо бесконтактных (полупроводниковых) аппаратов;

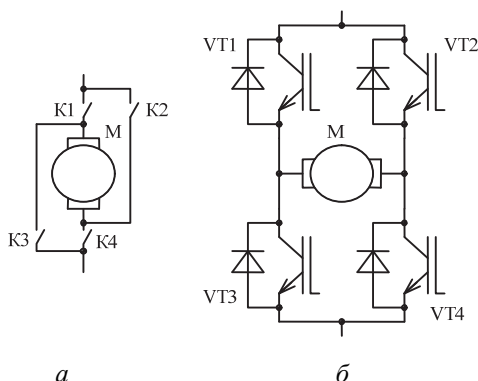


Рис. 1.28. Схемы реверсоров

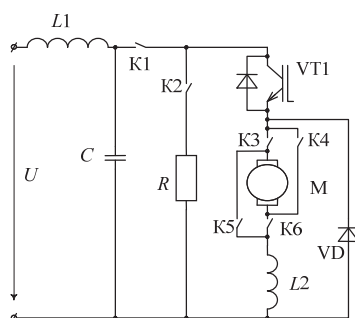


Рис. 1.29. Схема с тормозным резистором

- включением второго импульсного регулятора, работающего только в режиме рекуперативного торможения.

Примером схемного решения первого способа для однодвигательного подвижного состава служит комбинация узлов схем рис. 1.28, б и 1.29 (рис. 1.30). Отличительная ее особенность – совмещение функций ключей, реализующих как переход с пуска на торможение, так и изменение направления вращения якоря машины. В режиме пуска в зависимости от направления движения попарно включены транзисторы  $VT1$  и  $VT4$  либо  $VT2$  и  $VT3$  при замкнутом ключе  $K1$ . При переходе в генераторный режим размыкается ключ  $K1$ , а тормозной контур образуется включением второй (не работавшей в режиме пуска) пары транзисторов.

На рис. 1.31 представлен вариант схемного решения тяговых цепей для однодвигательного подвижного состава для случая использования отдельных импульсных регуляторов в режимах пуска и торможения. В режиме пуска замкнут контакт  $K5$  и регулирование подводимой к мотору  $M$  энергии осуществляется регулятором, выполненным на транзисторе  $VT1$ , при торможении контакт  $K5$  разомкнут, а регулятором является транзистор  $VT2$ .

Отличительная особенность цепей обеих схем заключается в том, что потребителем рекуперированной энергии является контактная сеть, не всегда готовая, как указывалось выше, к ее приему. Поэтому необходимо предусмотреть резервный потребитель – резистор, установленный на подвижном составе (как в схеме рис. 1.29).

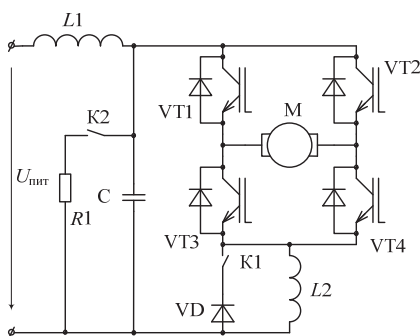


Рис. 1.30 Схема цепей однодвигательного привода с электронным реверсором

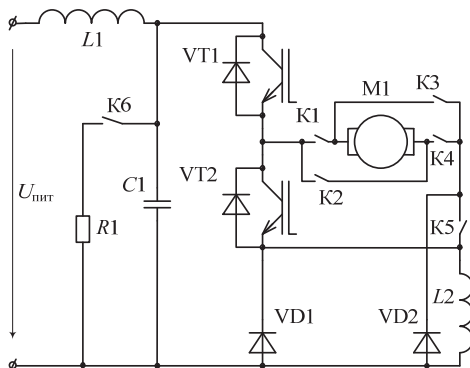


Рис. 1.31 Схема цепей однодвигательного привода с реверсором контактного исполнения

При сопоставлении затрат на производство подвижного состава со схемами рис. 1.29 (реостатное торможение) и рис. 1.31 (рекуперативно-реостатное) – наиболее простыми в схемотехническом решении – видно, что расходы на полупроводниковую часть последнего варианта больше, и применение его становится целесообразным только после проведения дополнительных технико-экономических расчетов. При выполнении таких расчетов важно определить КПД преобразователя, который отражает потери энергии в его элементах. Методика сравнительного анализа потерь в полупроводниковых приборах преобразователей приводилась выше. Однако некоторые типы преобразователей (с емкостной коммутацией) содержат и другие элементы, в частности дроссели, конденсаторы и т. д. При проектировании преобразователей снижения потерь в конденсаторах можно добиться подбором его типа из серийно выпускаемых промышленностью в соответствии с режимом его работы. Дроссели же, как правило, выполняются индивидуально, так как их параметры должны отвечать требованиям конкретного схемного решения преобразователя. При этом одному и тому же значению индуктивности дросселя могут отвечать различные варианты его конструктивного исполнения, отличающиеся различным активным сопротивлением.

Поскольку сопротивление проводника, как известно, при прочих равных параметрах пропорционально его длине, а потери энергии в



нем соответствуют величине сопротивления, критерием минимума потерь может служить расход материала проводника.

Рассмотрим методику определения конфигурации и геометрических размеров дросселя, отвечающего требованию обеспечения минимальных потерь энергии, на примере дросселя цепи емкостной коммутации полупроводникового ключа на базе SCR-тиристора [26].

Величина индуктивности дросселя обуславливается не только количеством витков, но и их геометрическими размерами, расположением относительно друг друга, формой, т. е. конфигурацией катушки [27]. Определение оптимальной конфигурации катушки производится при условии, что токовая нагрузка дросселя (а следовательно, и сечение проводника) сохраняется неизменной. В качестве дросселей обычно применяются тороидальные бескаркасные катушки, прямоугольное поперечное сечение которых имеет плоскую, квадратную или прямоугольную форму.

При расчете величин индуктивностей были приняты следующие допущения:

- витки катушки представляют собой коаксиальные круговые контуры;
- изоляция витков бесконечно тонкая;
- витки уложены равномерно как по длине, так и в радиальном направлении;
- ток распределен по сечению отдельных витков равномерно.

Поскольку дроссели совместно с коммутирующим конденсатором  $C$  образуют колебательный контур, величина индуктивности дросселя  $L$  может быть рассчитана так:

$$L = \frac{CU_{\max}^2}{I_c^2},$$

где  $I_c$  – амплитуда синусоидального тока коммутирующего контура (контура ускоренного перезаряда);

$C$  – величина емкости коммутирующего конденсатора;

$U_{\max}$  – максимальная величина напряжения на коммутирующем конденсаторе, определяемая величиной питающего напряжения.

Расчетные величины индуктивностей при одном и том же среднем диаметре тороидальной катушки  $d$  и количестве витков в ней  $W$  могут быть определены из соотношений:



- для катушки плоского сечения  $L = \frac{\mu_0 W^2 d \Psi}{8\pi}$ ;
- катушки квадратного сечения  $L = \frac{\mu_0 W^2 d \Phi}{8\pi}$ ;
- катушки прямоугольного сечения  $L = \frac{\mu_0 W^2 d \Phi}{4\pi}$ ,

где  $\Psi$  и  $\Phi$  – параметры, зависящие от соотношения линейных размеров катушки (длины и толщины).

На рис. 1.32, 1.33 и 1.34 представлены кривые зависимостей  $L(d)$  соответственно для катушек с сечением в форме прямоугольника, полосы и квадрата.

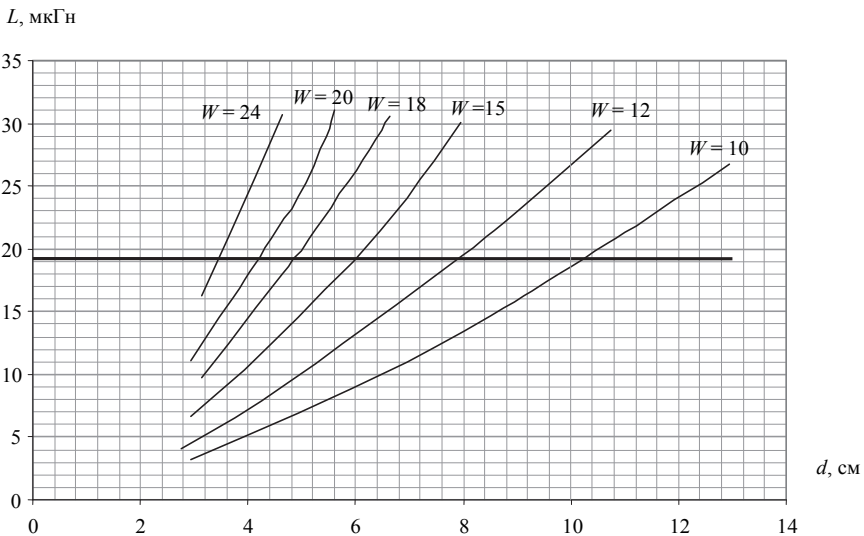


Рис. 1.32 Кривые зависимостей величины индуктивности дросселей в функции количества витков и геометрических размеров для проводника прямоугольного сечения

Анализ полученных теоретических зависимостей (например, для дросселя индуктивностью  $L = 20$  мкГн) показывает, что предпочтение следует отдавать катушкам с прямоугольным либо квадратным сечением. Однако если учесть, что в качестве материала при изготовлении дросселей по соображениям технологической целесообразности



используется, как правило, обмоточная медь прямоугольного сечения, сортамент которой носит дискретный характер, то сечение катушки должно быть квадратным.

$L$ , мкГн

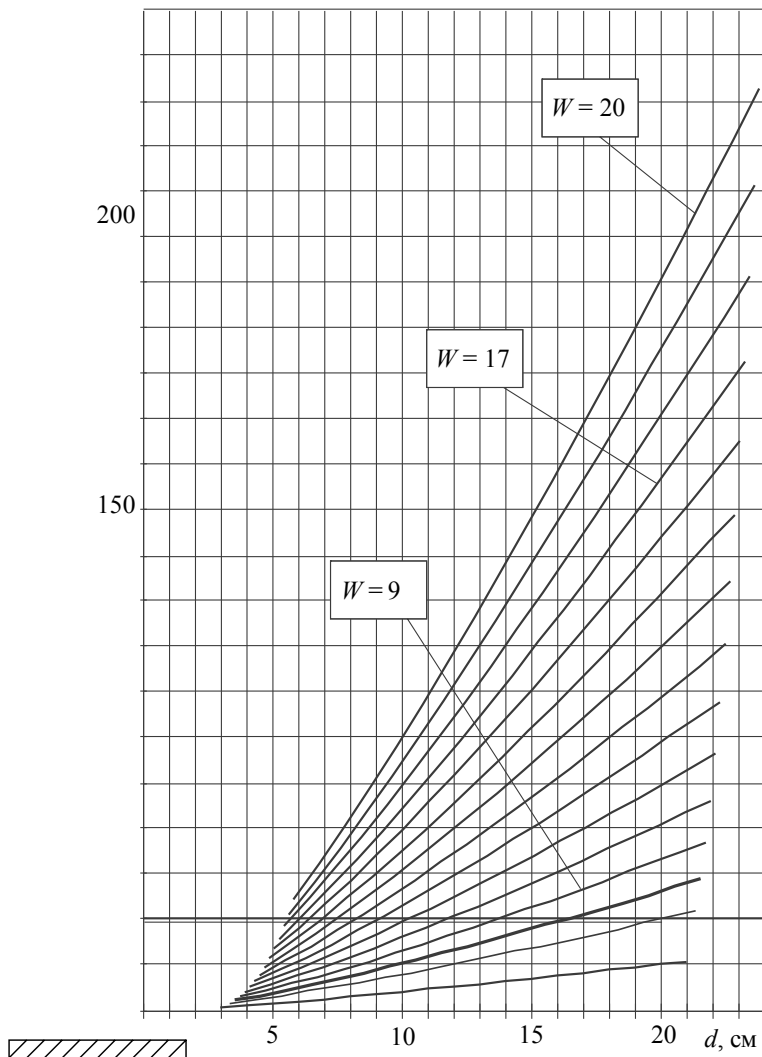
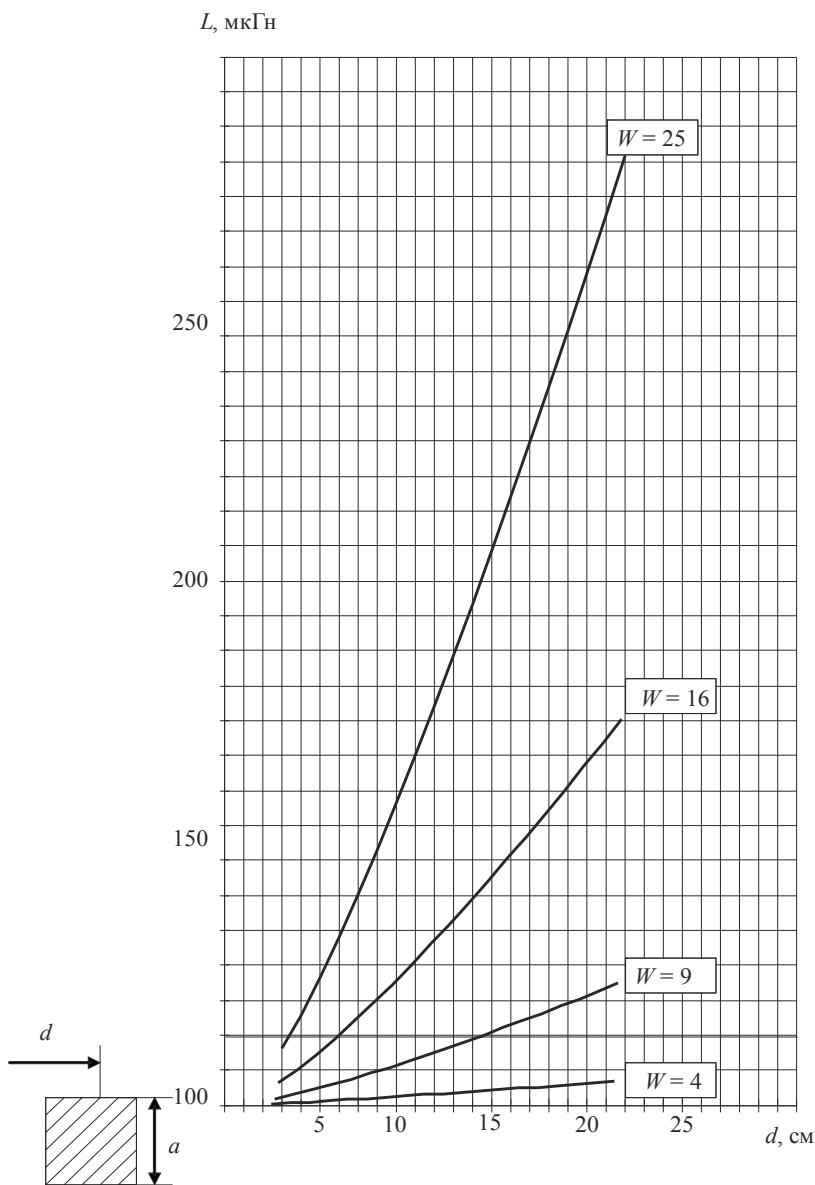


Рис. 1.33. Зависимость  $L(d)$  для шины

Рис. 1.34. Зависимость  $L(d)$  для квадрата



Активные потери в катушке рассчитываются по формуле

$$P = I_{\text{эф}}^2 R,$$

где  $R$  – сопротивление провода, которое при условии равенства токовой нагрузки и плотности его в проводнике, для катушек с различной конфигурацией сечения пропорционально длине  $l$  шины обмоточной меди ( $R \equiv l$ ), Ом.

Минимальная величина потерь соответствует минимальной длине проводника, которая для заданного значения  $L$  индуктивности дросселя достигается при соотношении между средним диаметром катушки  $d$  и стороной сечения  $a$  как  $d/a = 3/1$ .

Величина индуктивности в этом случае

$$L = 8,497 \frac{\mu_0}{4\pi} W^2 d = kW^2 d.$$

Выразив сопротивление проводника и площадь его сечения через средний диаметр катушки и заданную величину индуктивности, получим расчетную формулу для определения активных потерь

$$P = \frac{9\pi}{k} I_{\text{эф}}^2 \rho \frac{L}{d^2},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление меди.

Реальное значение индуктивности отличается от расчетного наличием покровного слоя изоляции у проводника, что приводит к изменению как собственной индуктивности витка, так и взаимной индуктивности между витками катушки.

При необходимости можно выполнить уточненный расчет величины индуктивности дросселя. Однако различие величин индуктивностей (реальной и теоретической) не превышает нескольких процентов, допускаемых инженерной точностью расчетов, поэтому уточнение, как правило, не производится.

Таким образом, методика расчета параметров дросселей заключается в следующем:

- по заданному значению индуктивности  $L$  и допустимым габаритам (определяемым средним диаметром  $d$  катушки) находится количество витков катушки (по кривым рис. 1.32);
- далее производится определение потерь в меди катушки (их значение необходимо для последующего поверочного расчета температуры нагрева).



## **1.5. ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ КАК ФАКТОР КОРРЕКТИРОВКИ СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА**

Взаимное влияние элементов тягового привода в полной мере относится и источнику энергии. Но если на автономном подвижном составе это проявляется в полной мере – выбор того или иного типа источника может привести к принципиальным изменениям в структуре привода, то на подвижном составе с централизованным электроснабжением, где источник известен, изменению подвержен чаще всего преобразователь, обеспечивающий, как отмечалось выше, электромагнитную совместимость источника и потребителя.

Изменения эти могут касаться, прежде всего, схмотехнического решения силовых цепей преобразователя, в частности выбора способа регулирования. Как отмечалось выше, в зависимости от уровня напряжения источника питания рекомендуется использовать тот или иной способ регулирования. Поэтому, например, при увеличении напряжения в контактной сети подвижного состава с ТЭД, номинальное напряжение которого совпадает с напряжением источника, необходимо в целях повышения экономичности привода переходить с широтного на частотный способ управления.

### **1.5.1. УРОВЕНЬ НАПРЯЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ КАК СРЕДСТВО ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Рассмотрим более подробно последний элемент тягового электропривода – источник энергии. Как упоминалось выше, источником энергии городского наземного электрического транспорта служат тяговая подстанция и тяговая сеть. Снизить потери электрической энергии на тяговых подстанциях можно повышением пульсовости выпрямительных агрегатов при преобразовании трехфазного переменного тока в постоянный. Однако и здесь имеется предел – повышение пульсовости не может быть бесконечным. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен далее.

Тяговая сеть – это специфическое звено в системе электроснабжения, посредством которой электроэнергия передается от источника к потребителю. Специфика тяговой сети заключается в том, что электрические параметры сети постоянно изменяются. Это вызвано, прежде всего, тем, что:



- в процессе эксплуатации вследствие механического контактирования провода с движущимся токоприемником происходит их износ, а следовательно, и возрастание электрического сопротивления провода;
- вследствие движения подвижного состава изменяется длина участка тяговой сети, соединяющая его с тяговой подстанцией;
- изменение температуры окружающей среды, а также нагревание контактного провода при протекании по нему тока приводят к изменению омического сопротивления контактной сети как в течение суток, так и по временам года.

Первый и третий из перечисленных факторов в рамках ограниченного временного интервала незначительно влияют на величину активного электрического сопротивления контактного провода, и поэтому ими можно пренебречь при рассмотрении электромагнитных процессов в цепи тяговая подстанция–контактная сеть–тяговый электрический привод при движении, например, по перегону.

Одним из радикальных путей снижения потерь электроэнергии в контактной сети является повышение напряжения, которое сопряжено с необходимостью ответа на ряд вопросов, основные из которых следующие:

- по каким критериям следует производить оценку возможности повышения напряжения;
- какова оптимальная величина уровня питающего напряжения;
- как повлияет повышение напряжения в контактной сети на остальные элементы электротехнического комплекса?

Повышение напряжения на любой электроустановке связано, прежде всего, с необходимостью решить две задачи:

- сохранение работоспособности электрооборудования;
- обеспечение электробезопасности при работе с новым уровнем питающего напряжения.

Электробезопасность установки определяется способностью изоляции ее токоведущих частей препятствовать протеканию токов утечки и появлению на корпусе электрооборудования опасного для жизни человека потенциала. В соответствии с градацией действующих «Правил устройства электроустановок» городской наземный электрический транспорт относится к электроустановкам до 1000 В. Поэтому электрооборудование его элементов рассчитывалось на работу в диапазоне напряжений до 1000 В. Вместе с тем следует учитывать и тот факт, что напря-



жение в контактной сети в рабочих режимах может подниматься согласно нормам до 20 % от номинального значения, равного  $U_{\text{ном}} = 600$  В. Кроме того, существует регламентированная линейка питающих напряжений, которой надо придерживаться. Сопоставление этих факторов позволяет предположить, что максимально возможный уровень питающего напряжения в контактной сети может быть принят равным  $U_{\text{ном}} = 825$  В. Действительно, даже по достижении максимально допустимого приращения напряжения в сети оно не превысит 1000 В [28].

Под сохранением работоспособности электрооборудования подразумевается, прежде всего, выявление способности тягового привода выполнять свои функции при новом уровне питающего напряжения. И определяющим здесь будет номинальное напряжение тягового электродвигателя, которое равно 550 В для подвижного состава троллейбуса и 275 В – для трамвая. Применение импульсного управления при регулировании подачи электроэнергии в тяговый двигатель позволяет, как известно, стабилизировать величину напряжения на двигателе независимо от колебаний его в контактной сети. Более того, именно эта способность системы управления позволяет допускать некоторое повышение напряжения на двигателе (до 10 % от номинального значения) с целью увеличения скорости движения при пуске.

Особый интерес для рассмотрения представляет режим рекуперативного торможения. В процессе торможения с высоких скоростей движения напряжение на зажимах тягового электродвигателя, работающего в генераторном режиме, может быть поднято почти до двукратного по отношению к номинальному. Так, в частности, допустимое по условиям коммутации напряжение на коллекторе тягового двигателя троллейбуса типа ДК-211Б достигает при полном поле величины в 1000 В. Чтобы пояснить возможность реализации режима рекуперативного торможения, обратимся к рис. 1.35. На рисунке показаны электромеханические характеристики (скоростные) двигателя, приведенные к ободу колеса при полном поле и номинальном напряжении (кривая  $V_{\text{пп}}$ ). Здесь же нанесены ограничения по сцеплению колеса с путевой структурой (кривая по  $\psi$ ), по предельно допустимым скоростям, предусмотренным «Правилами дорожного движения» (кривая  $V_{\text{пдд}}$ ) и заводом-изготовителем (кривая  $V_{\text{констр}}$ ), по напряжению источника питания (кривая по  $U_{\text{пит}}$ ) и максимально допустимому по условиям коммутации на коллекторе (кривая по  $U_{\text{доп}}$ ).

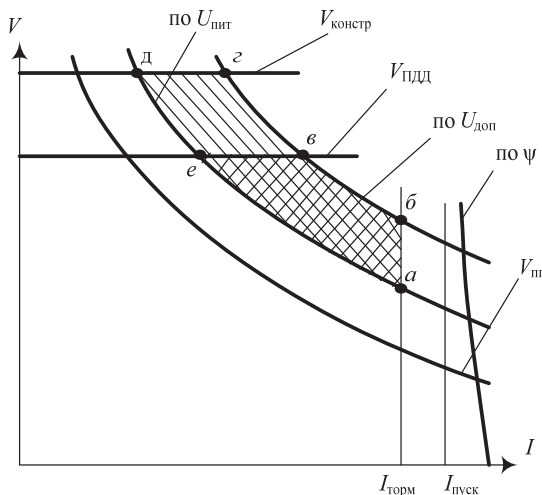


Рис. 1.35. Зона рабочих режимов

При пуске разгон с регламентированной величиной пускового ускорения осуществляется с постоянным током  $I_{\text{п}}$  до достижения характеристики номинального напряжения при полном поле с последующим ослаблением его, если это необходимо. Рекуперативное же торможение двигателя можно выполнить в зоне, ограниченной кривыми допустимой скорости движения  $V_{\text{ПДД}}$  в городе (или  $V_{\text{констр}}$  на междугородных трассах), тормозного тока  $I_{\text{торм}}$  и кривой ограничения напряжения на коллекторе по предельно допустимому значению его на источнике питания (кривая по  $U_{\text{пит}}$ ). Из рисунка видно, что эффективное торможение (с регламентированным замедлением) может осуществляться в этой зоне только по кривой  $I_{\text{торм}}$  со скорости, определяемой положением точки  $a$  и ниже. Если напряжение на коллекторе поднять до величины допустимого по условиям коммутации, то зона рекуперативного торможения значительно расширится (добавится область  $a - б - в - е - а$ ), а эффективное торможение может осуществляться со скорости, определяемой положением точки  $б$  и ниже.

Однако в этом случае схема электрических цепей подвижного состава претерпевает изменения. Для пояснения изменений воспользуемся схемой электрических цепей однодвигательного подвижного состава, показанной на рис. 1.36. Энергия к двигателю при пуске подводится



ключом, выполненным на транзисторе VT1, в режиме рекуперативного торможения заданная величина тормозного тока в двигателе поддерживается ключом, выполненным на транзисторе VT2. При ограничении напряжения на коллекторе двигателя во время рекуперативного торможения на уровне максимально допустимого значения по источнику питания, т. е. 720 В, двигатель к конденсатору входного Г-образного LC-фильтра присоединяется непосредственно. Баланс напряжений в цепи рекуперации в этом случае описывается уравнением

$$u_c = c_e \Phi v - I_{\text{торм}} r .$$

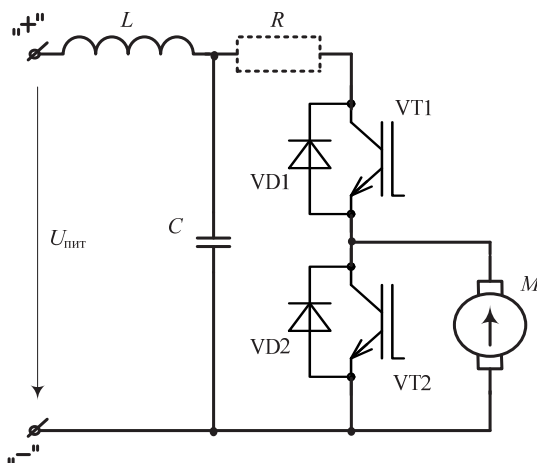


Рис. 1.36. Схема электрических цепей однодвигательного подвижного состава

При поднятии напряжения на коллекторе выше 720 В избыточное напряжение необходимо скомпенсировать. С этой целью в цепь рекуперации вводится резистор  $R$  (в схеме показан пунктиром). Баланс напряжений в цепи рекуперации в этом случае описывается уравнением

$$u_c = c \Phi v - I_{\text{торм}} (r + R).$$

При необходимости регулировать величину тормозного тока резистор к тому же должен быть переменным.

Поднятие напряжения на коллекторе двигателя до максимально допустимой величины при движении с конструкционной скоростью



позволяет расширить зону рекуперации за счет добавления площади поля, ограниченной точками  $a - б - в - г - д - е - a$ . При этом значительно возрастает величина минимального тормозного тока (на рис. 1.35 из точки  $e$  переходит в точку  $в$ ), а следовательно, и эффективность электрического торможения.

Потерь энергии, рассеиваемой в резисторе  $R$ , можно избежать, подняв напряжение источника питания до уровня 825 В. Кроме того, поднятие напряжения в контактной сети позволяет получить дополнительную экономию энергии за счет двойного эффекта – снижения потерь в тяговой сети в режиме пуска и в режиме торможения.

Расчеты, проведенные с подвижным составом троллейбуса, оснащенным тяговым электродвигателем типа ДК-211Б, показали, что общие потери энергии снижаются до 7,5 %. При этом доля потерь в тяговых сетях снижается до 50 %, а за счет исключения балластного резистора – до 6,5 %.

### 1.5.2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА ДВИЖЕНИЕ

Норма расхода электрической энергии – важный критерий, позволяющий объективно оценить эффективность функционирования электрического подвижного состава (ЭПС). Разработка норм энергопотребления городского наземного электротранспорта представляется сложной задачей в связи с особенностями эксплуатации различных его видов. Основная доля потребленной энергии расходуется, как указывалось выше, на движение ЭПС. Кроме того, заметная часть ее теряется в устройствах электроснабжения, используется на технологические нужды и т. д.

Движение ЭПС на маршруте представляет собой реализацию некоторого случайного процесса (СП). В связи с этим расход энергии поездом даже в рамках одного маршрута существенно отличается от рейса к рейсу, а, значит, задача нормирования расходов энергии на движение ЭПС заключается в определении основных характеристик энергопотребления как случайного процесса.

Нормы расхода электрической энергии (ЭЭ) определяют обычно в ватт-часах, отнесенных к тонно-километрам ( $Вт \cdot ч/т \cdot км$ ) или к пассажиро-километрам ( $Вт \cdot ч/пас \cdot км$ ).

При нормировании расхода ЭЭ различают два вида норм: индивидуальную (на движение ЭПС) и групповую, включающую энергию на



все нужды для обеспечения процесса функционирования ЭПС. Для дальнейшего анализа в групповой норме целесообразно выделить две составляющие: основную и технологическую. В основную часть групповой нормы входит энергия, потребленная ЭПС при реализации полезной работы, и энергия потерь в системе электроснабжения на постоянном токе, связанная с реализацией этой работы. Технологическая часть нормы включает в себя энергию потерь на переменном токе (кроме потерь в ЛЭП – 6 или 10 кВ) и часть энергии на постоянном токе, связанную со вспомогательными передвижениями ЭПС (маневры, учебные и обкаточные послеремонтные пробеги, «нулевые» пробеги), работой путевых машин, станков и других устройств с питанием от контактной сети (КС) (рис. 1.37).

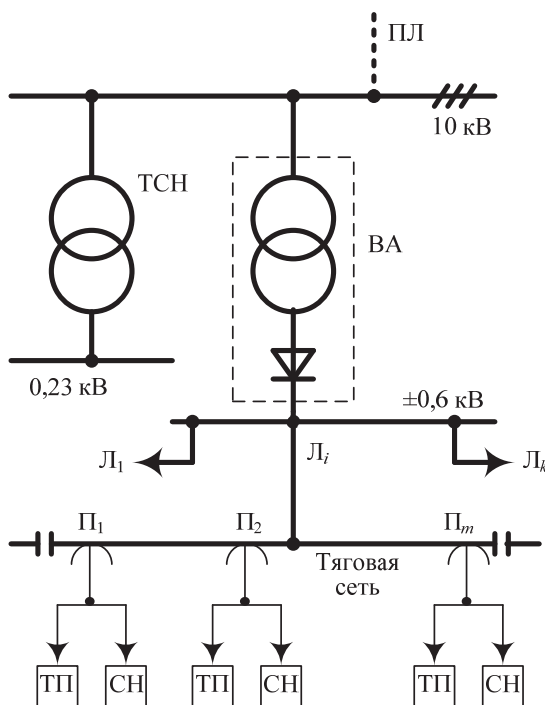


Рис. 1.37. Структурная схема распределения энергии

Структурная схема включает в себя: ПЛ – питающую линию 10 кВ; ВА – выпрямительные агрегаты; ТЧН – трансформатор собственных



нужд;  $L_1 \dots L_i \dots L_k$  – питающие линии участков тяговой сети; ТС – тяговую сеть; П – поезд; ТП – тяговый привод; СН – собственные нужды поезда.

В соответствии со структурной схемой часть групповой нормы  $a_{гр}$  для потребителей на постоянном токе можно представить как

$$a_{гр} = a_{дв} + a_{техн} + a_{ЭЭ}; \quad a_{дв} = A_{уд} + a_{СН};$$

$$a_{техн} = a_{вп} + a_{ст}; \quad a_{э} = a_{КС} + a_{Л} + a_{ВА} + a_{Л},$$

где  $a_{дв}$ ,  $a_{техн}$ ,  $a_{ЭЭ}$  – удельные нормы расхода энергии ЭПС на пассажирское (грузовое) движение, технологические (производственные) нужды и потери в системе электроснабжения соответственно;  $A_{уд}$ ,  $a_{СН}$ ,  $a_{вп}$ ,  $a_{ст}$  – нормы на тягу, вспомогательные (собственные) нужды ЭПС, вспомогательные пробеги и стенды соответственно;  $a_{к}$ ,  $a_{Л}$ ,  $a_{ВА}$ ,  $a_{Л}$  – нормы, связанные с потерями энергии в КС, фидерных линиях постоянного тока, выпрямительных агрегатах и питающих линиях соответственно.

Технологическая часть групповой нормы для потребителей на переменном токе далее не рассматривается. Расходы энергии на технологические нужды на постоянном токе следует учитывать при оценке потерь в системе электроснабжения.

Нормы расхода энергии могут быть определены расчетным и опытным путем. Расчетные методы основаны на построении кривых движения, которое может производиться аналитическим и эмпирическим способом с нанесением на них зависимостей тока от времени или пути –  $I(t)$ ,  $I(l)$ . Тогда норма расхода электроэнергии на нужды тяги вычисляется по формулам:

$$A_{уд} = \frac{U_{пит} I_0}{G_{ПС} v_c}, \quad I_0 = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} I(t) dt,$$

где  $I_0$  – средний ток поезда за время движения  $T_d$ .

Норма удельного расхода на собственные нужды ЭПС:

$$a_{в} = \frac{P_{СН0}}{G_{ПС} v_c}, \quad P_{СН0} = \sum_{i=1}^n k_{исп i} k_{в} P_{СН i},$$



где  $P_{\text{CH0}}$  – средняя мощность потребителей собственных нужд;

$P_{\text{CHi}}$  – номинальная мощность  $i$ -го потребителя;

$k_{\text{исп}i}$ ,  $k_{\text{в}i}$  – коэффициенты использования и включения  $i$ -го потребителя.

Величина  $P_{\text{CH0}}$  может быть определена по расходу энергии на собственные нужды ЭПС за рейс по маршруту.

При определении удельной нормы на тягу аналитическим методом оперируют усредненными значениями детерминированных величин, а при эмпирическом методе – величинами средних токов или удельной энергией на тягу, полученными при некоторых базовых условиях (величинах скорости, уклона, длины перегона, температуры) для конкретного типа ЭПС. Отклонения от базовых условий учитываются поправочными коэффициентами: на скорость –  $k_v$ , профиль пути –  $k_i$ , длину перегона –  $k_{\text{п}}$ , метеоусловия –  $k_{\text{м}}$ , условия движения –  $k_y$ .

Средний ток поезда при наполняемости салона по вместимости определяется по формуле

$$I_0 = k_v k_i k_{\text{п}} k_y I_{\text{дв}} + I_{\text{CH}}, \quad (1.18)$$

где  $I_{\text{дв}}$ ,  $I_{\text{CH}}$  – средние токи на тягу и собственные нужды, определяемые при базовых условиях для лета и зимы.

Индивидуальная норма на нужды тяги рассчитывается по формуле

$$A_{\text{уд}} = A_{\text{уд0}} k_i k_v k_{\text{м}}, \quad (1.19)$$

где  $A_{\text{уд0}}$  – индивидуальная норма на тягу при базовых условиях.

Из анализа формул (1.18) и (1.19) следует, что поправочные коэффициенты вводятся как на детерминированные, так и на стохастические факторы (метеоусловия).

Сравнение результатов расчетов по разнообразным методикам для реальных маршрутов показало различие удельных норм расхода энергии на 25...35 %, а проведенные экспериментальные исследования на тех же маршрутах выявили существенное их отличие от полученных теоретическим путем.

Объясняется это, прежде всего, тем, что перечисленные методы отражают идеализированные условия движения (например, движение на



обособленном полотно), при которых отсутствует мешающее влияние транспортных средств, движущихся в попутном направлении, режим ведения поезда и т. д.

Аналитические исследования влияния режима ведения поезда на перегоне, показали, что при соблюдении графика движения (поддержании средней скорости движения на перегоне) расход энергии на движение при повторном пуске (рис. 1.38) возрастает в зависимости от длины перегона на 12...17 %, при трех пусках – до 25 %. Расчеты проводились для случая движения на обособленном полотне и не учитывали критических ситуаций. Поэтому для случая двух пусков на перегоне в точке  $a$  кривой движения  $v_1(l)$  начинался выбег, завершавшийся в точке  $b$  кривой  $v_2(l)$  повторным пуском.

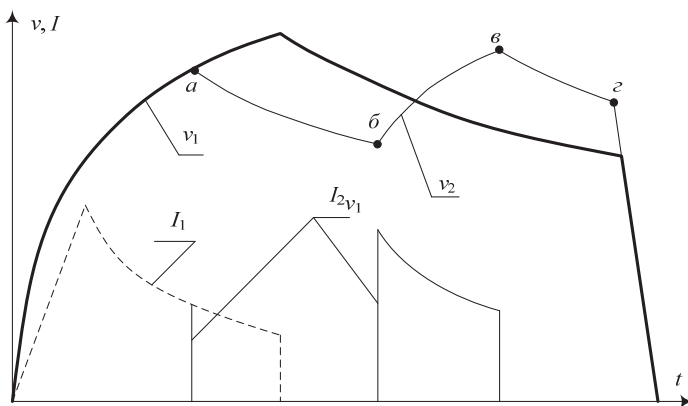


Рис. 1.38. Кривые движения с повторным пуском

В действительности точка  $a$  может находиться в любом месте кривой движения, а при возникновении критической ситуации пуск, как правило, завершается режимом торможения до любой скорости, в том числе и до полной остановки.

На рис. 1.39 показаны осциллограммы потребляемых токов при трехкратном проезде одного из перегонов в г. Новосибирске, полученные на магнитографе в опытах для троллейбуса с импульсным регулятором.

Из осциллограмм видно, что кривые  $I(t)$  существенно различны, носят случайный характер и могут определяться как случайные про-



цессы. Для оценки норм расхода энергии в этом случае следует найти математическое ожидание СП  $I(t)$ . Обозначим:  $M[I(t)] = m_i(t)$ . Норму в этом случае можно определить по формуле

$$A_{\text{уд}} = \frac{U_{\text{ср}}}{G_{\text{ПС}} l_{\text{пер}}} \int_0^{T_d} m_i(t) dt,$$

где  $U_{\text{ср}}$  – среднее напряжение на токоприемнике за время движения  $T_d$ ;  
 $l_{\text{пер}}$  – длина перегона.

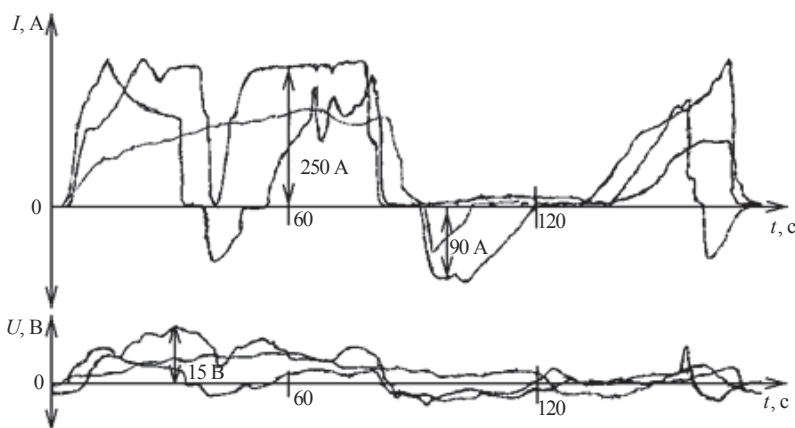


Рис. 1.39. Осциллограммы потребляемых токов

Экспериментальные исследования по определению расхода электроэнергии на движение (тягу) и собственные нужды (СН), проведенные на трамвайном вагоне Т-3М по маршрутам г. Барнаула в летний и зимний периоды года, также подтверждают вероятностный характер зависимости в функции пассажиропотока, интенсивности движения и т. д. В качестве примера в табл. 1.8 представлены выборочные данные по одному из маршрутов.

По результатам измерения величин основного сопротивления движению ( $w_0$ ) вагонов, полученным в опытных поездках, летние и зимние значения в начале рейса отличаются в 2,3 раза, а в конце – почти в 3 раза. В конце рейса значения  $w_0$  снижаются в 1,2...1,5 раза. Согласно нормативам увеличение  $w_0$  зимой должно быть не более чем в 1,15 раза.



Собранные по  $w_0$  данные имеют широкий разброс и могут квалифицироваться как случайная величина.

Таблица 1.8

| Маршрут                            | Период | Среднее количество пассажиров | Длина участка, км | Время, мин | Расход ЭЭ, кВт · ч |      | Удельный расход ЭЭ тяга, Вт · ч/т · км | Средняя мощность, кВт |      |
|------------------------------------|--------|-------------------------------|-------------------|------------|--------------------|------|----------------------------------------|-----------------------|------|
|                                    |        |                               |                   |            | тяги               | СН   |                                        | тяги                  | СН   |
| Докучаево – пл. Свободы            | Зима   | 48                            | 14,32             | 54,3       | 20,4               | 13,4 | 71,6                                   | 22,5                  | 14,8 |
| пл. Свободы – Докучаево            | Зима   | 60                            | 14,32             | 57,3       | 35,0               | 13,3 | 116                                    | 36,6                  | 13,9 |
| Депо № 1 – Докучаево               | Зима   | 0                             | 15,62             | 55,5       | 29,2               | 12,4 | 119                                    | 31,6                  | 13,4 |
| Докучаево – депо № 1               | Зима   | 0                             | 14,84             | 53,6       | 23,8               | 12,0 | 97                                     | 26,7                  | 13,4 |
| Докучаево – депо № 1               | Лето   | 16                            | 14,84             | 61,2       | 21,3               | 2,1  | 81,5                                   | 20,9                  | 2,1  |
| Докучаево – депо № 1               | Лето   | 0                             | 14,84             | 53,4       | 15,9               | 2,2  | 65                                     | 17,9                  | 2,5  |
| Депо № 1 – пл. Свободы – Докучаево | Лето   | 0                             | 18,03             | 73,3       | 27,1               | 2,4  | 92                                     | 22,2                  | 2,0  |
| Депо № 1 – Докучаево               | Лето   | 33                            | 15,62             | 59,3       | 31,2               | 2,2  | 106                                    | 31,6                  | 2,2  |

Средние скорости движения в рейсах составили 14,56...16,88 км/ч, в том числе с пассажирами 14,56...15,88 км/ч. Энергопотребление вагонов можно оценить по удельным расходам электроэнергии, которые составили по рейсам: зимой 71,6...119 Вт · ч/т · км, или в среднем 101 Вт · ч/т · км; летом 65...106 Вт · ч/т · км, или в среднем 86,2 Вт · ч/т · км.

Величины удельного расхода энергии в зимний и летний периоды отличаются в 1,17 раза. На рис. 1.40 показаны диаграммы расхода энергии на перегонах на участке «Колизей – Докучаево». Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что расход энергии в каждом рейсе представляет собой реализацию случайного процесса. Статистическая обработка этого процесса дает возможность получить математическое ожидания и корреляционную функцию норм расхода энергии по периодам года, оценить возможные их отклонения.

Измерения расхода энергии на собственные нужды показали, что в зимнее время он составляет 30...40 % от энергии на нужды тяги, в летний период (при отключенных отопительных приборах) – 7...14 %.

Норму расхода электроэнергии подвижным составом целесообразно устанавливать для каждого маршрута, а в случае необходимости –



для каждого транспортного предприятия или для сети в целом. Норму расхода для предприятия и сети необходимо определять как средневзвешенные величины.

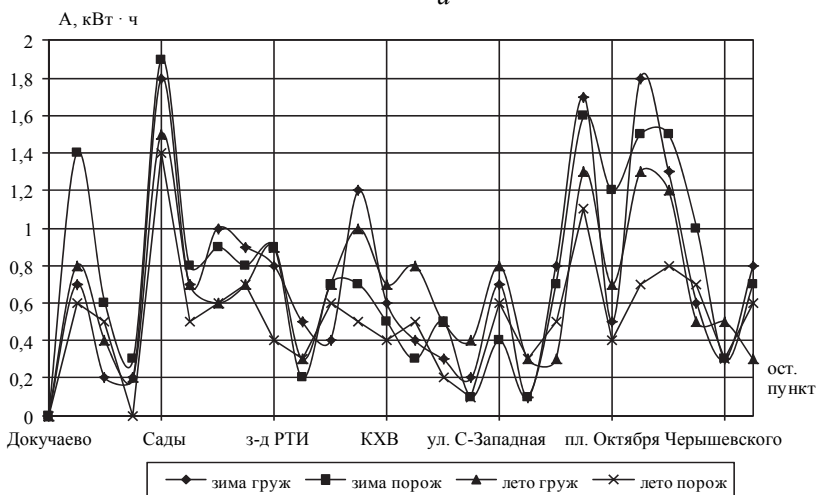
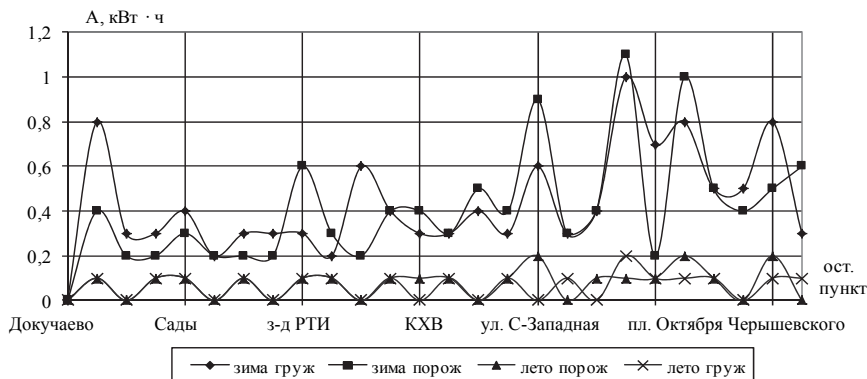


Рис. 1.40. Кривые расхода энергии по временам года

Поскольку основная доля расхода энергии на перегоне зависит от совокупности детерминированных факторов, включающих в себя массу поезда, электромеханические характеристики двигателей, профиль пути, определять ее следует расчетным путем. Для ускорения процесса



расчета можно воспользоваться имитационным моделированием движения поезда на перегоне, позволяющим проводить оптимизационные расчеты по критериям минимального времени хода по перегону или минимальному расходу электроэнергии.

Суть моделирования состоит в получении характеристик движения  $v(t)$ ,  $v(l)$  и зависимостей поездных токов  $I(t)$ ,  $I(l)$ . В основу модели тяговых расчетов положены известные математические описания, базирующиеся на законах движения поезда. Полученная таким образом норма расхода энергии  $A_{\text{уд. расч}}$  принимается за базовую для данного перегона и коррелируется далее посредством коэффициентов, учитывающих стохастический характер внешних факторов, таких как помехи попутного транспорта, состояние пути, режим ведения поезда, напряжение на токоприемнике, метеоусловия и пр. Перечень основных случайных факторов, влияющих на расход энергии поездом, и обозначения коэффициентов для их учета показаны в табл. 1.9.

С учетом принятых обозначений индивидуальную норму расхода электроэнергии на нужды тяги  $A_{\text{уд}}$  можно рассчитать по формуле

$$A_{\text{уд}} = A_{\text{уд. расч}} k_{\text{сл}} = A_{\text{уд. расч}} k_U k_m k_n,$$

где  $k_{\text{сл}}$  – коэффициент учета случайной составляющей в норме;

$k_n = k_t k_j k_w k_e k_i$  – коэффициент учета путевых помех (по пунктам 1...5, 8 табл. 1.9).

Таблица 1.9

| № п/п | Наименование случайных факторов                       | Обозначения коэффициентов |
|-------|-------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1     | Помехи попутного транспорта                           | $k_t$                     |
| 2     | Межпоездные интервалы                                 | $k_j$                     |
| 3     | Состояние пути (дорожного полотна)                    | $k_w$                     |
| 4     | Перекрестки, специальные части пути и контактной сети | $k_e$                     |
| 5     | Режим ведения поезда                                  | $k_e$                     |
| 6     | Напряжение на токоприемнике                           | $k_U$                     |
| 7     | Метеоусловия                                          | $k_m$                     |
| 8     | Суточное время рейса                                  | $k_i$                     |



Для определения нормы  $A_{уд}$  достаточно найти математическое ожидание  $M[k_{сл}]$  для периодов года со сходными погодными условиями.

Величину  $M[k_{сл}]$  можно найти по статистическим данным о расходе энергии ЭПС в рейсах по маршруту. В случае установления закона распределения вероятностей случайной величины  $k_{сл}$  можно решить задачу посредством имитационного моделирования с использованием метода статистических испытаний.

На рис. 1.41 приведены расчетные (базовые) и экспериментальные кривые энергопотребления при движении трамвая по маршруту. Расхождение экспериментальных и полученных при моделировании величин расхода электроэнергии по одному и тому же перегону свидетельствует о присутствии в этих величинах случайной составляющей. Для учета влияния случайных факторов в результаты расчетов по детерминированным факторам и вводятся указанные выше поправочные коэффициенты. Сравнение результатов эксперимента и расчета показывает, что на маршруте есть как энергоемкие перегоны, на которых велико влияние случайных факторов на расход энергии при движении, так и перегоны, на которых отмечается хорошая сходимость показателей энергопотребления с расчетными значениями.

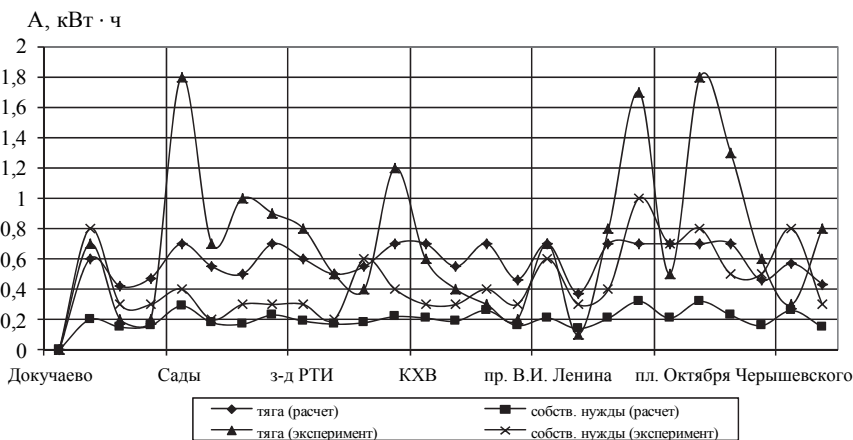


Рис. 1.41. Расчетные (базовые) и экспериментальные кривые энергопотребления



Для сравнения результатов теоретических исследований по расходу энергии на движение с экспериментальными были проведены аналитические расчеты и замеры количества энергии, потребляемой в режиме тяги и возвращаемой в режиме торможения, на базе троллейбуса типа ЗиУ-682Г одного из депо г. Новосибирска. В электрическую цепь тягового двигателя были включены два счетчика электрической энергии (СЭ1 и СЭ2), (рис. 1.42).

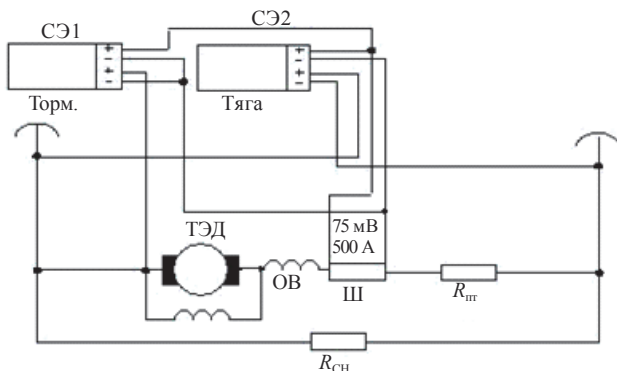


Рис. 1.42. Схема измерительных цепей

Для проведения экспериментов был выбран маршрут протяженностью 11,8 км по оси улиц. Маршрут имеет 41 перегон с длинами от 300 до 1000 м с максимальными уклонами до 67 %, проходит по улицам с большой и средней интенсивностью движения транспортных средств, имеет несколько сложных транспортных развязок, светофорное регулирование движения. Опыты состояли в фиксации наблюдателями количества пассажиров в салоне, потребляемой и возвращаемой энергии на каждом перегоне, времени остановок и проводились в различные периоды суток. Расчетные величины удельной энергии в режимах тяги и торможения определялись по формуле [29]

$$A_{\text{уд}} = \frac{A}{l_n (G_{\text{т}} + qn)},$$

где  $A$  – энергия тяги или торможения, фиксируемая счетчиками на перегоне;

$G_{\text{т}}$  – вес тары троллейбуса;



$q$  – среднестатистический вес пассажира;

$n$  – количество пассажиров в салоне.

В результате проведения эксперимента выяснилось, что удельная энергия изменяется случайным образом, различаясь как по перегонам, так и от рейса к рейсу. Таким образом, удельная энергия могла рассматриваться как случайная величина, выборка которой выполнена методами математической статистики. Обработка выборки включала выполнение следующих операций:

- упорядочение и группирование ряда;
- определение числовых характеристик, оценку их надежности и точности;
- подбор выравнивающей функции и проверку ее по критериям согласия;
- построение гистограмм статистической и выравнивающей функций.

Числовые характеристики определялись по выражениям:

- начальные и центральные моменты

$$\alpha_s[X] = \sum_{i=1}^n x_i^s P_i; \quad \mu_s[X] = \sum (x_i - m_x)^s P_i; \quad (1.20)$$

- математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратичное отклонение

$$M[X] = m_x = \sum_{i=1}^n x_i P_i;$$

$$D[X] = \mu_2(X) = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 P_i; \quad (1.21)$$

$$\sigma[X] = \sqrt{D(X)}.$$

Точность оценок числовых характеристик (ЧХ) рассчитывалась по формулам:

$$P(|\tilde{m} - m| < \xi_\beta) = 2\Phi^*\left(\frac{\xi_\beta}{\sigma_{\tilde{m}}}\right) - 1 = \beta;$$



$$\xi_{\beta} = \sigma_{\tilde{m}} \arg \Phi^* \left( \frac{1 + \beta}{2} \right); \quad I_{\beta} = (\tilde{m} - \xi_{\beta}; \tilde{m} + \xi_{\beta}),$$

где  $X$  – случайная величина, соответствующая удельному расходу электрической энергии;

$m$  – ЧХ, а  $\tilde{m}$  – ее оценка;

$\xi_{\beta}$  – точность оценки ЧХ;

$\beta \approx 0,9 \dots 0,95$  – доверительная вероятность попадания ЧХ в интервал  $I_{\beta}$ ;

$\sigma_{\tilde{m}}$  – среднее квадратичное отклонение оценок ЧХ;

$\Phi^*(\cdot)$  – функция Лапласа.

Величина  $\sigma_{\tilde{m}}$  для оценок математического ожидания и дисперсии определяется по формулам:

$$\sigma_{\tilde{m}} = \sqrt{\frac{\tilde{D}_x}{n}}, \quad \sigma_{\tilde{D}} = \sqrt{\frac{2}{n-1} \tilde{D}_x}.$$

Соответствие статистических данных выравнивающей функции проверялось по критериям Пирсона  $\chi^2$  и А.Н. Колмогорова на основе формул

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i}, \quad D\sqrt{n} \geq \lambda,$$

где  $P_i^*$ ,  $P_i$  – вероятности статистическая и теоретическая;

$n$ ,  $k$  – количество членов выборки и разрядов группирования;

$D$  – максимальное расхождение функций статистической и теоретической.

По  $\chi^2$  и  $\lambda$  определялись вероятности соответствия теоретических функций статистическим данным.

Выборка величин удельной энергии при торможении составила 327 элементов, которые были сгруппированы в 16 разрядов с шагом интервала  $5 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ , а в 17 разряде определена средняя плотность для интервала от 80 до  $140 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ . Сгруппированный статистический ряд показан в табл. 1.10, в которой удельная энергия торможения



приведена в именованных  $A_{\text{уд. торм}}$  (Вт · ч/т · км) и относительных ( $A_{\text{уд. торм}}^* = A_{\text{уд. торм}} / m_x$ ) единицах. Здесь же показано число попаданий значений  $A_{\text{уд. торм}}$  в  $i$ -й разряд ( $m_i$ ), статистические плотности ( $P_i^* = m_i / n$ ) и функция  $\left( F_i^* \sum_{i=1}^i P_i^* \right)$ .

Таблица 1.10

| №<br>П/П | $A_{\text{уд. торм}}^*$ | $A_{\text{уд. торм}}$ | $m_i$ | $P_i^*$ | $P_i$  | $F_i^*$ | $F_i$ |
|----------|-------------------------|-----------------------|-------|---------|--------|---------|-------|
| 1        | 5                       | 0,4                   | 11    | 0,034   | 0,012  | 0,034   | 0,012 |
| 2        | 10                      | 0,8                   | 6     | 0,018   | 0,051  | 0,052   | 0,063 |
| 3        | 15                      | 1,2                   | 39    | 0,119   | 0,088  | 0,171   | 0,151 |
| 4        | 20                      | 1,6                   | 37    | 0,113   | 0,107  | 0,284   | 0,258 |
| 5        | 25                      | 2,0                   | 43    | 0,132   | 0,113  | 0,416   | 0,372 |
| 6        | 30                      | 2,4                   | 35    | 0,107   | 0,109  | 0,523   | 0,481 |
| 7        | 35                      | 2,8                   | 27    | 0,083   | 0,099  | 0,606   | 0,579 |
| 8        | 40                      | 3,2                   | 36    | 0,110   | 0,086  | 0,716   | 0,665 |
| 9        | 45                      | 3,6                   | 23    | 0,070   | 0,0721 | 0,786   | 0,737 |
| 10       | 50                      | 4,0                   | 19    | 0,058   | 0,059  | 0,844   | 0,796 |
| 11       | 55                      | 4,4                   | 11    | 0,033   | 0,047  | 0,877   | 0,844 |
| 12       | 60                      | 4,8                   | 14    | 0,043   | 0,037  | 0,92    | 0,881 |
| 13       | 65                      | 5,2                   | 9     | 0,028   | 0,029  | 0,948   | 0,911 |
| 14       | 70                      | 5,6                   | 4     | 0,012   | 0,022  | 0,96    | 0,933 |
| 15       | 75                      | 6,0                   | 3     | 0,009   | 0,017  | 0,969   | 0,950 |
| 16       | 80                      | 6,38                  | 1     | 0,003   | 0,013  | 0,972   | 0,963 |
| 17       | 140                     | 11,16                 | 9     | 0,028   | 0,037  | 1       | 1     |

Из табл. 1.10 по формулам (1.20) и (1.21) определены числовые характеристики, приведенные в табл. 1.11.

Таблица 1.11

| Обозначение ЧХ |                   | $M^*[X]$ | $D^*[X]$ | $\sigma^*[X]$ | $\alpha_2^*[X]$ |
|----------------|-------------------|----------|----------|---------------|-----------------|
| Значения<br>ЧХ | именованные ед.   | 35,3     | 443      | 21,0          | 1662            |
|                | относительные ед. | 1        | 0,354    | 0,595         | 1,34            |



Точность оценок числовых характеристик определена по формулам при доверительной вероятности  $\beta = 0,95$ . Получены интервалы для математического ожидания и дисперсии:  $I_{0,95} = (35,3 - 2,3; 35,3 + 2,3)$ .

Выборка величин расхода энергии в удельной форме для режима тяги приведена в табл. 1.12.

Таблица 1.12

| №  | $A_{\text{уд. торм}}^*$ | $A_{\text{уд. торм}}$ | $m_i$ | $P_i^*$ | $P_i$<br>Гамма-<br>функция | $P_i$ , нор-<br>мальное | $F_i^*$ | $F_i$<br>Гамма-<br>функ-<br>ция | $F_i$ , нор-<br>маль-<br>ное |
|----|-------------------------|-----------------------|-------|---------|----------------------------|-------------------------|---------|---------------------------------|------------------------------|
| 1  | 10                      | 0,090                 | 2     | 0,006   | 0,00002                    | 0,0031                  | 0,006   | 0,000                           | 0,000                        |
| 2  | 20                      | 0,181                 | 1     | 0,003   | 0,000797                   | 0,0091                  | 0,009   | 0,001                           | 0,001                        |
| 3  | 30                      | 0,271                 | 12    | 0,036   | 0,005136                   | 0,0153                  | 0,046   | 0,006                           | 0,039                        |
| 4  | 40                      | 0,361                 | 11    | 0,035   | 0,016047                   | 0,0226                  | 0,079   | 0,022                           | 0,062                        |
| 5  | 50                      | 0,452                 | 21    | 0,064   | 0,031                      | 0,0316                  | 0,143   | 0,053                           | 0,093                        |
| 6  | 60                      | 0,542                 | 20    | 0,061   | 0,051                      | 0,0401                  | 0,204   | 0,104                           | 0,135                        |
| 7  | 70                      | 0,632                 | 17    | 0,052   | 0,069                      | 0,0532                  | 0,256   | 0,173                           | 0,187                        |
| 8  | 80                      | 0,723                 | 31    | 0,095   | 0,083                      | 0,0647                  | 0,351   | 0,256                           | 0,251                        |
| 9  | 90                      | 0,813                 | 19    | 0,058   | 0,091                      | 0,075                   | 0,408   | 0,347                           | 0,326                        |
| 10 | 100                     | 0,903                 | 18    | 0,055   | 0,093                      | 0,0826                  | 0,463   | 0,440                           | 0,409                        |
| 11 | 110                     | 0,994                 | 18    | 0,055   | 0,09                       | 0,087                   | 0,518   | 0,530                           | 0,496                        |
| 12 | 120                     | 1,084                 | 23    | 0,070   | 0,084                      | 0,0865                  | 0,588   | 0,614                           | 0,579                        |
| 13 | 130                     | 1,174                 | 28    | 0,085   | 0,074                      | 0,0835                  | 0,674   | 0,688                           | 0,663                        |
| 14 | 140                     | 1,265                 | 18    | 0,055   | 0,065                      | 0,0761                  | 0,729   | 0,753                           | 0,739                        |
| 15 | 150                     | 1,355                 | 25    | 0,076   | 0,054                      | 0,0662                  | 0,805   | 0,807                           | 0,805                        |
| 16 | 160                     | 1,445                 | 27    | 0,082   | 0,044                      | 0,0548                  | 0,887   | 0,851                           | 0,860                        |
| 17 | 170                     | 1,536                 | 10    | 0,031   | 0,0343                     | 0,0416                  | 0,918   | 0,877                           | 0,902                        |
| 18 | 180                     | 1,626                 | 9     | 0,027   | 0,026                      | 0,033                   | 0,945   | 0,915                           | 0,935                        |
| 19 | 190                     | 1,716                 | 10    | 0,031   | 0,0208                     | 0,0237                  | 0,976   | 0,937                           | 0,958                        |
| 20 | 260                     | 2,349                 | 8     | 0,024   | 0,0195                     | 0,0206                  | 1,000   | 1,000                           | 1,000                        |

Результаты расчетов числовых характеристик приведены в табл. 1.13.

Точность оценок при доверительной вероятности  $\beta = 0,95$  составляет для математического ожидания и дисперсии:  $I_{0,95} = (110,7 - 4,97; 110,7 + 4,97)$ .



Т а б л и ц а 1.13

| Обозначение ЧХ |                   | $M^*[X]$ | $D^*[X]$ | $\sigma^*[X]$ | $\alpha_2^*[X]$ |
|----------------|-------------------|----------|----------|---------------|-----------------|
| Значения<br>ЧХ | именованные ед.   | 110,7    | 2103     | 45            | 14543           |
|                | относительные ед. | 1        | 0,186    | 0,41          | 1,18            |

В качестве модели закона распределения энергий в режимах тяги и торможения рассмотрено гамма-распределение, плотность вероятностей которого имеет вид

$$f_k(x) = \frac{\lambda^k}{\Gamma(k)} x^{k-1} e^{-\lambda x}. \quad (1.22)$$

В системе относительных единиц  $m_x = 1$ ,

$$k = \lambda = m = \frac{1}{\tilde{\sigma}_{x_*}^2},$$

тогда выражение (1.22) примет вид

$$f_k(x_*) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} x_*^{m-1} e^{-mx_*},$$

где  $\Gamma(m)$  – полная гамма-функция с параметром « $m$ ».

Функцию гамма-распределения при этом можно представить в форме

$$F(x_*) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} \int_0^{x_*} x_*^{m-1} e^{-mx_*} dx_*.$$

На основе данных о ЧХ параметры моделирующих функций будут иметь значения: в режиме тяги  $m = 5,8$ ; в режиме торможения  $m = 2,8$ .

Дополнительно в качестве модели для режима тяги рассмотрено нормальное распределение:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad t = \frac{x-m}{\sigma}.$$



Оценка соответствия статистических данных и выравнивающих функций выполнена по критериям А.Н. Колмогорова и Пирсона  $\chi^2$  и приведена в табл. 14.

Таблица 1.14

| Режим      | Вероятности по критериям |                 |                          |                 |
|------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
|            | Колмогорова              |                 | Пирсона                  |                 |
|            | Нормальное распределение | Г-распределение | Нормальное распределение | Г-распределение |
| Тяга       | 0,964                    | 0,964           | 0,42                     | 0,42            |
| Торможение | ---                      | 0,99            | ---                      | 0,41            |

Сравнение гистограмм и моделей законов распределений величины энергии в режимах тяги и торможения показано на рис. 1.43 и 1.44.

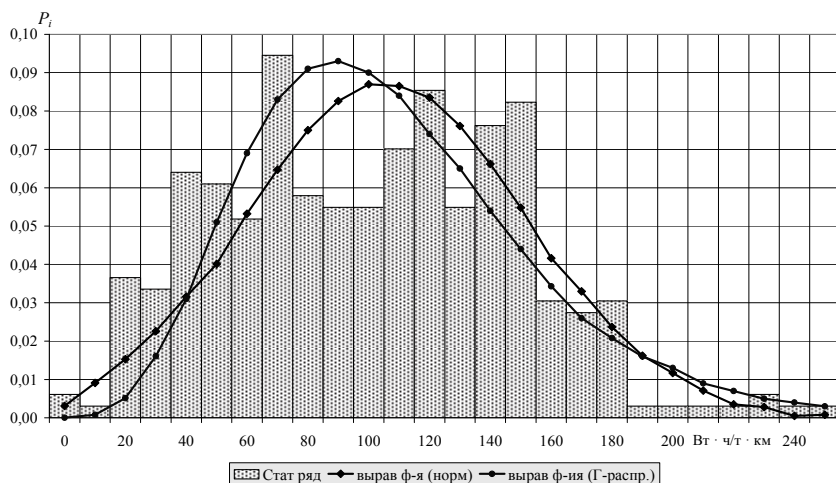


Рис. 1.43. Гистограммы и модели законов распределений величины энергии в режимах тяги

Таким образом, в результате обработки экспериментальных данных было выявлено, что:

- удельные значения электрической энергии в режимах торможения и тяги могут представляться как случайные величины, что обусловлено наличием значительного числа случайных факторов, влияющих на процессы движения;

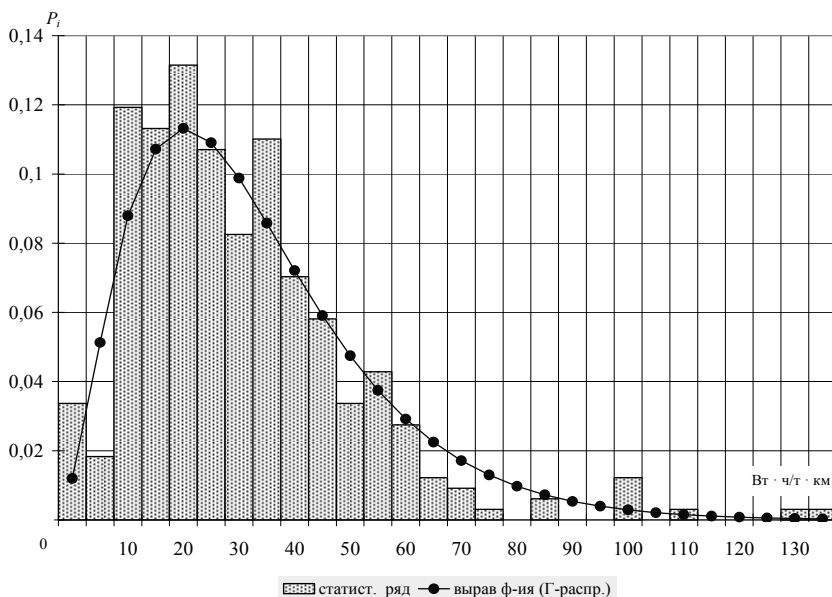


Рис. 1.44. Гистограммы и модели законов распределений величины энергии в режимах торможения

- основным законом распределения вероятностей удельных значений электрической энергии в режимах тяги и торможения является гамма-распределение. При  $m \geq 6$  целесообразно переходить от гамма-распределения к нормальному закону;
- в условиях значительных помех при движении подвижного состава в общем потоке в схеме движения преобладают фазы пуска и торможения. Длительность фазы выбега существенно уменьшается, что и приводит к увеличению скорости начала торможения и возрастанию энергии рекуперации, которая может достигать 33 % от энергии, потребленной при пуске.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория электрической тяги: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; под ред. И. П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 297 с.
2. ГОСТ 13109–97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 1999–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.: ил.
3. Диагностирование электротранспортных систем / В. В. Бирюков, Б. В. Малоземов, С. А. Аршинов, Г. Н. Ворфоломеев // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2005. – № 4 (24). – С. 81–85.
4. *Ефремов И. С.* Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта: учеб. для вузов / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М.: Высшая школа, 1976. – 480 с.
5. *Пролыгин А. П.* Электрооборудование подвижного состава городского электрифицированного транспорта / А. П. Пролыгин, А. А. Рабинович. – М.: Энергия, 1973. – 352 с.
6. *Бирюков В. В.* Городской электрический транспорт / В. В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1982. – 52 с.
7. Определение мощности тягового двигателя подвижного состава по критерию минимума удельного расхода энергии / В. В. Бирюков, М. Ю. Никулин, А. В. Трейзе, Т. А. Ворок // Автоматизированные электромеханические системы: монография / под ред. В. Н. Аносова. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С. 235–240.
8. *Бирюков В. В.* Пути повышения экономичности пассажироперевозок на электрическом транспорте / В. В. Бирюков // Транспортные проблемы Сибири: материалы II Всерос. науч.-техн. конф. 25–26 нояб. 2004 г., Красноярск / под ред. В. Н. Катаргина. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 29–31.
9. *Бирюков В. В.* Определение оптимальной длины перегона по критерию минимума удельных энергозатрат / В. В. Бирюков, Г. Н. Ворфоломеев // Электроэнергия и будущее цивилизации: материалы междунар. науч.-техн. конф., Томск, 19–21 мая 2004 г. – Томск: Изд-во ТГУ, 2004. – С. 257–259.
10. *Бирюков В. В.* Определение оптимальной длины перегона наземного городского электрического транспорта по критерию минимума удельных энергозатрат / В. В. Бирюков, Г. Н. Ворфоломеев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: НГАВТ, 2005. – № 1–2. – С. 204–206.
11. *Ефремов И. С.* Теория городских пассажирских перевозок: учеб. пособие для вузов / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. А. Юдин. – М.: Высшая школа, 1980. – 535 с., ил.



12. *Ефремов И. С.* Теория и расчет механического оборудования подвижного состава городского электрического транспорта: учеб. пособие для вузов / И. С. Ефремов, Б. П. Гущо-Малков. – М.: Стройиздат, 1970. – 480 с.

13. *Бирюков В. В.* Определение параметров элементов тяговых приводов электрического транспорта / В. В. Бирюков // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 15–18.

14. *Зиновьев Г. С.* Основы силовой электроники: учеб. пособие / Г. С. Зиновьев. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 672 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).

15. Сравнительный анализ элементной базы ключей для нужд электрической тяги на постоянном токе / А. П. Вертохвостов, Д. А. Чумачев, В. В. Бирюков, Ю. А. Рылов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 36–40.

16. *Бирюков В. В.* Анализ элементной базы статических полупроводниковых преобразователей подвижного состава постоянного тока / В. В. Бирюков, Б. В. Малоземов // Электронные средства и системы управления: материалы междунар. науч.-практ. конф. (6–8 окт. 2004 г.): в 3 ч. / Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, НИИ автоматики и электромеханики. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атмосферы СО РАН, 2004. – Ч. 1. – С. 123–126.

17. *Бирюков В. В.* Сравнительный анализ схемных решений статических полупроводниковых преобразователей подвижного состава постоянного тока / В. В. Бирюков // Электротехнические материалы и компоненты: тр. V междунар. конф. МКЭМК-2004 (ICEMC-2004), 20–25 сент. 2004, Крым, Алушта. – М.: Изд-во МЭИ (ТУ), 2004. – С. 219–221.

18. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока / В. Е. Розенфельд, В. В. Шевченко, В. А. Майбога, Г. П. Долаберидзе. – М.: Транспорт, 1970. – 240 с.

19. *Чебовский О. Г.* Силовые полупроводниковые приборы: справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во Энергоатомиздат, 1985. – 512 с.

20. Выбор начальной частоты регулирования в тиристорно-импульсных системах управления ТЭД / В. В. Бирюков, Н. Е. Ершов, В. Ф. Николаев, Н. И. Щуров // Труды МЭИ. – М.: МЭИ, 1975. – Вып. 236. – С. 47–52.

21. *Бирюков В. В.* Определение некоторых параметров и закона регулирования тиристорно-импульсных регуляторов для питания тяговых двигателей постоянного тока / В. В. Бирюков, Г. А. Черкашин // Совершенствование технических средств электрического транспорта. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – Вып. 3. – С. 44–49.

22. *Бирюков В. В.* Определение закона регулирования частотного тиристорно-импульсного преобразователя постоянного тока в режиме пуска / В. В. Бирюков // Омский науч. вестн. – 2006. – № 10 (48). – С. 87–90.



23. *Бирюков В. В.* О возможности и целесообразности рекуперации энергии торможения подвижным составом / В. В. Бирюков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2005. – № 1–2. – С. 207–211.

24. *Бирюков В. В.* Рекуперативное торможение подвижного состава городского электрического транспорта: возможность, эффективность, целесообразность / В. В. Бирюков, Г. Н. Ворфоломеев // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 4 (28). – С. 81–85.

25. *Щуров Н. И.* Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н. И. Щуров – Новосибирск, 2003. – 34 с.

26. *Бирюков В. В.* Методика определения оптимальных параметров и конфигурации дросселя контура емкостной коммутации по критерию минимума потерь / В. В. Бирюков, А. С. Костенко, А. П. Вертохвостов // Транспортные проблемы Сибири: материалы II Всерос. науч.-техн. конф., 24–25 нояб. 2005 г. / под ред. В. Н. Катаргина. – Красноярск: Изд-во ИПЦ КГТУ, 2005. – С. 20–22.

27. *Калантаров П. Л.* Расчет индуктивностей: справ. кн. / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1986. – 488 с.

28. Оптимизация системы электроснабжения городского наземного электрического транспорта / В. В. Бирюков, В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, Е. А. Спиридонов, А. А. Штанг // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 2. – С. 24–27.

29. Исследование энергетических показателей режимов тяги и торможения троллейбусов / В. И. Сопов, Е. А. Спиридонов, Ю. А. Прокушев, В. В. Бирюков, А. А. Штанг // Омский науч. вестн. – 2006. – № 9 (46). – С. 124–129.



## ГЛАВА 2

# ЭКОНОМИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

**Д**альнейшее совершенствование и развитие транспортной инфраструктуры мегаполисов неизбежно приводит к необходимости переходить от экстенсивного пути (простого наращивания количества транспортных средств) к интенсивному – замене существующих типов подвижного состава наземного городского электрического транспорта более вместимыми и энерговооруженными. Однако увеличение мощности тягового привода неизбежно ведет к возрастанию нагрузки питающих линий, что в большинстве случаев невозможно, так как линии уже работают на пределе по току. Анализ, выполненный по электрическому подвижному составу троллейбуса, показал, что наращивание мощности тягового привода влечет за собой необходимость совершенствовать существующую систему тягового электроснабжения.

Система централизованного электроснабжения подвижного состава электрического транспорта включает в себя [1] все устройства от первоисточника электрической энергии (например, тепло- или гидроэлектростанции, распределительной подстанции и т. д.) до токоприемника транспортного средства. При этом различают две составляющие этой системы: внешнее и внутреннее электроснабжение. Внешнее электроснабжение образуют устройства передачи и преобразования электрической энергии от электрической станции до первичных (вводных шин) тяговой подстанции. Поскольку электрическая энергия, потребляемая для нужд тяги в системе внешнего электроснабжения, составляет небольшую долю в дебете электростанции, далее эта система не рассматривается.

Внутреннее электроснабжение, называемое системой тягового электроснабжения, включает в себя тяговую подстанцию, предназначенную



для приема электроэнергии от источника и преобразования ее до необходимого уровня напряжения и рода тока для питания потребителей (подвижного состава), и тяговую сеть, включающую в себя устройства для передачи энергии от шин вторичного напряжения тяговой подстанции до токоприемника подвижного состава. Тяговую сеть образуют фидеры – провода и кабели, соединяющие тяговую подстанцию с контактной и рельсовой сетями (собственно контактная и рельсовая сети).

Поскольку преобразование и передача энергии от источника к потребителю всегда сопровождается потерями ее во всех элементах технологической цепи, в целях определения путей сокращения этих потерь следует более детально рассмотреть эти элементы.

## 2.1. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Структурная схема системы электроснабжения на постоянном токе с нанесенными на нее потоками электроэнергии показана на рис. 2.1.

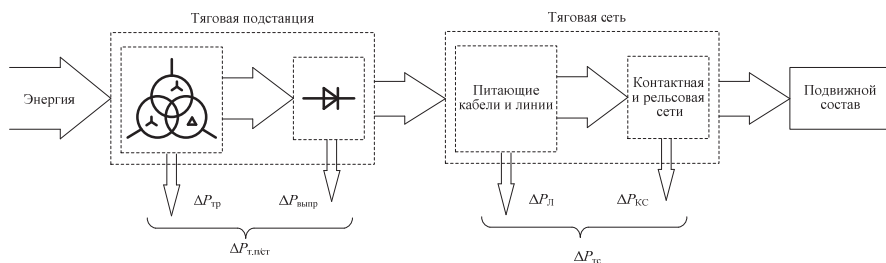


Рис. 2.1. Структурная схема системы электроснабжения на постоянном токе

Электрическая энергия в подавляющем большинстве систем высоковольтного электроснабжения передается по трехфазным линиям переменного тока. Поступающая на тяговую подстанцию электроэнергия подвергается двойному преобразованию: на первой ступени трехфазное напряжение понижается до необходимого уровня, а на второй – переменное напряжение преобразуется в постоянное.

Для реализации на тяговой подстанции первой ступени преобразования используются трехфазные понизительные трансформаторы с различными схемами включения вторичных обмоток. Поскольку параметры обмоток и их количество существенно влияют на потери энергии в



трансформаторе [2], необходимо отыскать оптимальный вариант исполнения тягового трансформатора (по схеме включения обмоток и их параметрам), позволяющий при одинаковой мощности иметь минимальные потери  $\Delta P_{\text{тр}}$ .

Преобразование трехфазного переменного напряжения в постоянное на тяговых подстанциях осуществляется при помощи выпрямителей, выполненных по мостовой схеме. Так как к любому источнику питания предъявляются определенные, строго регламентированные требования по качеству напряжения, то в целях удовлетворения этих требований при выпрямлении стремятся повысить количество пульсаций напряжения, что приводит к необходимости изменять как схемное решение самих выпрямителей, так и систему многофазного напряжения, подаваемого на вход выпрямителей. Поэтому возникает необходимость в поиске схемного решения выпрямителей с минимальными потерями  $\Delta P_{\text{выпр}}$  [3–6].

Поскольку взаимное влияние схемных решений тягового трансформатора и выпрямителя велико, отдельное рассмотрение их довольно затруднено и поэтому может выполняться и совместно.

Потери энергии в питающих линиях и кабелях тяговой сети  $\Delta P_{\text{л}}$  при выбранных сечениях проводников зависят только от расположения подстанций и точек подключения их к контактной и рельсовой сетям. Поэтому потери в них следует оценивать как совокупные с потерями в контактной и рельсовой сетях  $\Delta P_{\text{КС}}$ .

## 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Преобразовательный агрегат тяговой подстанции, образованный понижающим трансформатором и выпрямителем, в классических схемах исполнения позволяет получить на выходе шестикратную пульсацию выпрямленного напряжения за счет использования трехфазной системы питающего напряжения. С целью повышения количества пульсаций в выпрямленном напряжении до 12 на вход выпрямителя необходимо подавать шестифазное напряжение. Одним из вариантов получения 12-пульсового выпрямления является использование двух отдельных трехфазных систем, питающих свои мостовые выпрямители, при усло-



вии наличия сдвига по фазе между векторами напряжений в 60 эл. град. Это достигается применением понизительных трансформаторов, выполненных по схеме «звезда» / «звезда» – «треугольник». При этом выпрямители могут соединяться как последовательно, так и параллельно.

Для нужд электрической тяги целесообразно применять преобразовательные агрегаты с количеством пульсаций примерно 16...24 [3], чего невозможно добиться простой комбинацией шести вторичных обмоток понизительного трансформатора. С целью повышения фазности системы напряжений приходится увеличивать количество вторичных обмоток.

В свою очередь рост количества вторичных обмоток вызывает необходимость увеличивать количество полупроводниковых элементов в выпрямителях, что ведет к поиску новых схемных решений выпрямительных агрегатов, так как стандартная мостовая схема соединения уже не отвечает требованию минимума потерь.

### 2.2.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

При анализе работы выпрямительных устройств, питающихся от трехфазных источников с идеальной фазной и амплитудной симметрией линейных напряжений, используются как аналитические (на основе исследования диаграмм электромагнитных процессов), так и графоаналитические (например, с использованием круговых диаграмм) методы. При этом определение текущих значений аргумента  $\omega t$  при резкой деформации графика исследуемой функции обычно не вызывает затруднений. Однако при исследовании реальных схем выпрямления в режимах с амплитудно-временными отклонениями значений токов и напряжений неизвестны значения аргументов, определяющих начало или завершение переходных процессов.

С целью совершенствования исследований электромагнитных процессов предлагается **графоаналитический метод** [7–9], в основе которого лежит совмещение векторных построений с развернутыми относительно топологического центра полярными графиками результирующих напряжений. В этом случае функции, определяющие векторные построения, задаются параметрически. Для пояснения сущности метода далее приведены примеры оценки влияния конструктивной несимметрии вторичных обмоток преобразовательного трансформатора на



форму выпрямленного напряжения и величину его постоянной составляющей.

Использование векторных диаграмм результирующих напряжений позволяет наглядно иллюстрировать процесс исследования, получать уравнения, отражающие связь основных энергетических и конструктивных параметров с пульсовостью выпрямителя и особенностями его схмотехнического решения.

Каждый вектор диаграммы описывает результирующую функцию, состоящую из суммы синусоидальных фазных напряжений вентильных обмоток. Совмещение векторной диаграммы с полярными графиками, параметрически описывающими синусоидальные функции, позволяет достаточно просто определить значения всех аргументов, необходимых для исследования выпрямителей. В качестве примера на рис. 2.2, *а* и *б* приведены векторная диаграмма результирующих напряжений 12-пульсового выпрямителя последовательного типа и ее фрагмент, совмещенные с полярными графиками; на рис. 2.2, *в* и *г* – векторная диаграмма линейных и результирующих напряжений и ее фрагмент при конструктивной несимметрии обмоток трансформатора.

Внешняя огибающая всех окружностей является кривой выпрямленного напряжения; модуль вектора ее равен амплитуде пульсации выпрямленного напряжения, а векторная полусумма смежных векторов определяет минимальное значение выпрямленного напряжения (рис. 2.2, *б*). Геометрические построения позволяют установить положение кривой выпрямленного напряжения в процессе коммутации (рис. 2.2, *г*), что облегчает составление уравнения полусуммы пары коммутирующих напряжений.

Уменьшающиеся вследствие конструктивной несимметрии в схемах выпрямления последовательного типа модули результирующих векторов остаются равными между собой (рис. 2.2, *в*), но появляется сдвиг фаз, приводящий к увеличению периода повторяемости формы выпрямленного напряжения в 2 раза (рис. 2.2, *г*). При этом в выпрямленном напряжении появляются гармоники, кратные шестой.

Векторная диаграмма с использованием полярных графиков результирующих напряжений для 12-пульсового выпрямителя параллельного типа (рис. 2.3, *а*) при симметричных и синусоидальных напряжениях внешне не отличается от диаграммы результирующих напряжений выпрямителя последовательного типа, но развернута на 15 эл. град. относительно диаграмм выпрямителя последовательного типа.

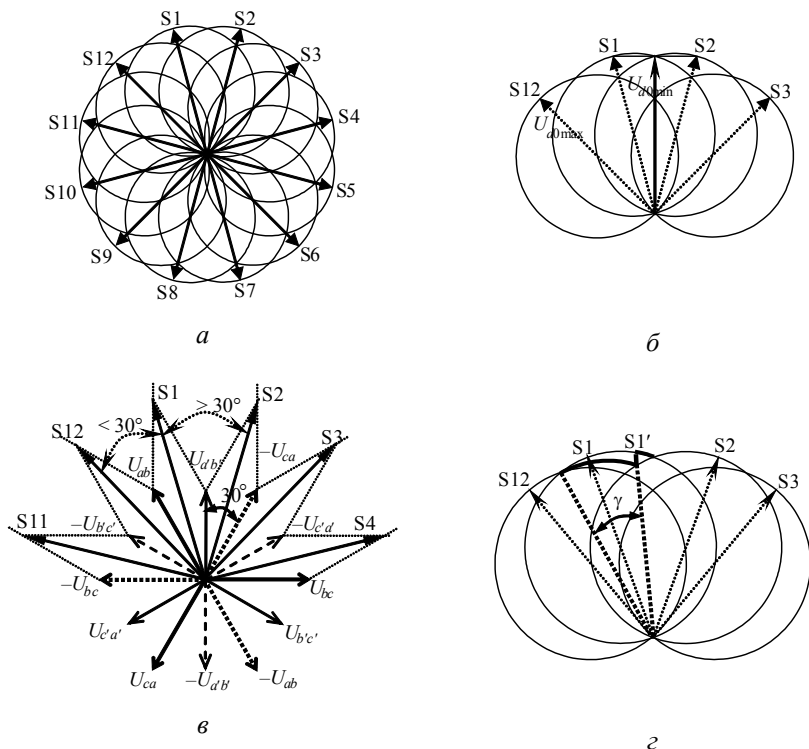


Рис. 2.2. Векторная диаграмма результирующих напряжений последовательного типа

При конструктивной несимметрии в схеме параллельного типа модули смежных векторов не равны и не сдвинуты по фазе (рис. 2.3, б). Период повторяемости формы кривой выпрямленного напряжения также возрастает в 2 раза, что порождает гармоники, кратные шестой, и форма кривой выпрямленного напряжения отличается от формы кривой при последовательном выпрямлении (рис. 2.4).

Для определения момента начала коммутации в выпрямителе параллельного типа с конструктивной несимметрией вентильных обмоток графическим способом по фрагменту рис. 2.3, б на основе построений рис. 2.5 получены следующие соотношения:

$$U_0 = U_{\Delta JI \max} \cos \lambda = U_{YJI \max} \cos \beta = U_{\Delta JI \max} K \cos \beta \quad (2.1)$$

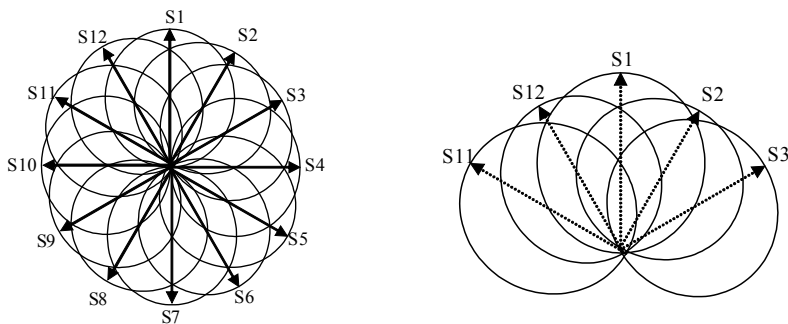


Рис. 2.3. Векторная диаграмма с использованием полярных графиков

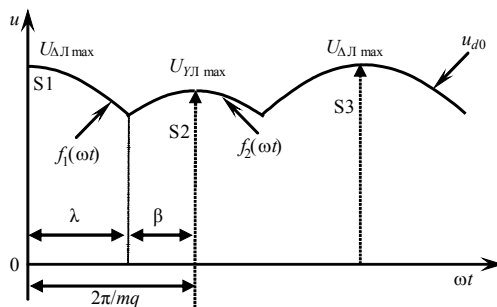


Рис. 2.4. Кривая выпрямленного напряжения при последовательной схеме выпрямления

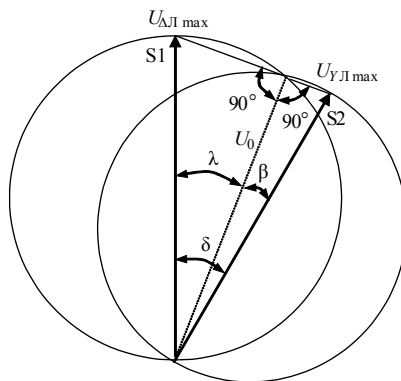


Рис. 2.5. Графическое определение амплитуд выпрямленного напряжения



и

$$\cos \lambda = K \cos(\delta - \lambda),$$

где  $K = \frac{U_Y}{U_\Delta} = 1 - \alpha_K$ ;

$\alpha_K$  – коэффициент конструктивной несимметрии;

$$\lambda = \arctg \frac{1 - K \cos \delta}{K \sin \delta},$$

и, поскольку

$$f_1(\omega t) = U_{\Delta \text{л max}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{\Delta \text{л max}} \cos \omega t$$

и

$$f_2(\omega t) = K U_{\Delta \text{л max}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \delta\right) = K U_{\Delta \text{л max}} \cos(\omega t - \delta),$$

среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d0} = \frac{U_{d \max} m q}{2\pi} \left[ \sin \lambda + K \sin\left(\frac{2\pi}{m q} - \lambda\right) \right],$$

где  $U_{d \max} m q = U_{\Delta \text{л max}}$ ;

$m = 6$  – количество выходных фаз трансформатора;

$q = 2$  – количество полупериодов выпрямления.

При отсутствии конструктивной несимметрии ( $\alpha_K = 0$ ) среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{d0} = 0,9886 U_{d \max}.$$

Такой же результат был получен по известной формуле

$$U_{d0} = U_{d \max} \frac{m q}{\pi} \sin \frac{\pi}{m q}.$$

В качестве примера рассмотрим возможность применения параметрического отображения функций для анализа процессов коммутации

в 12-пульсовом выпрямителе последовательного типа при произвольной величине конструктивной несимметрии вентильных обмоток (рис. 2.6).

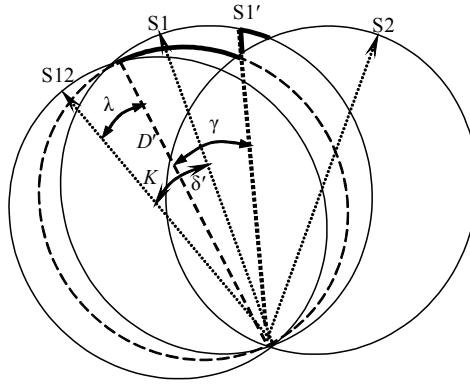


Рис. 2.6. Построения при произвольной величине конструктивной несимметрии вентильных обмоток

Положение диаметра  $D'_K$  относительно вектора S12 полярного графика на диаграмме соответствует углу начала коммутации, определенному по формуле (2.1) при  $K = 1$ , а его величина определяется аналогично  $U_0$  (рис. 2.5). Тогда амплитудное значение функции (величина диаметра  $D'_K$ )

$$U_K = U_S(K) \cos \left( \arctg \frac{1 - \cos \delta'}{\sin \delta'} \right),$$

где  $U_S(K)$  – амплитуда выпрямленного напряжения при идеальной коммутации в схемах с последовательным соединением мостов (рис. 2.2, б, в, г).

$$U_S(K) = U_{\Delta I \max} \sqrt{\frac{1 + K^2 + 2K \cos \delta}{2(1 + \cos \delta)}}; \quad (2.2)$$

и

$$\delta' = 2 \arcsin \frac{K \sin \delta}{\sqrt{1 + K^2 + 2K \cos \delta}}.$$

Длительность периода коммутации определяется по формуле



$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{\sqrt{2} \cdot X_B I_d}{K_{\text{сх}} \sqrt{3} U_{\Phi(Y, \Delta)}} \right),$$

где  $X_B$  – приведенное к вентильной обмотке индуктивное сопротивление элементов цепи переменного напряжения;

$I_d$  – ток нагрузки;

$K_{\text{сх}} = 3$  – коэффициент схемы;

$U_{\Phi}$  – величина фазного напряжения.

Утолщенной линией на рис. 2.6 показана форма пульсации, вызванная процессом коммутации. Максимальное мгновенное значение выпрямленного напряжения в пределах пульсации обозначено смещенным вектором  $SI'$ .

При реальных коэффициентах конструктивной несимметрии угол коммутации изменяется незначительно (пропорционально отношению диаметров  $D'_K$  и  $D''_K$ ), поэтому на рис. 2.7, где показаны две коммутации, учтено допущение равенства углов коммутации  $\gamma$  и в обоих случаях эти углы можно рассчитывать по формуле

$$\gamma_{mq} = \arccos \left( 1 - 2 u_k k_3 \sin \frac{\pi}{mq} \right), \quad (2.3)$$

где  $u_k$  – напряжение короткого замыкания;

$k_3$  – коэффициент загрузки (оба коэффициента – безразмерные величины).

На основе построений рис. 2.7 были получены четыре функциональные зависимости, описывающие кривую выпрямленного напряжения на интервале повторяемости (на рисунке выделено утолщенной линией), а по ним – зависимость среднего значения выпрямленного напряжения в функции конструктивной несимметрии:

$$[0 \div \gamma] \quad u_d(\omega t, K) = U_s(K) \cos \left( \arcsin \frac{K \sin \delta}{\sqrt{1 + K^2 + 2K \cos \delta}} \right) \cos \omega t; \quad (2.4)$$

$$[\gamma \div \delta] \quad u_d(\omega t, K) = U_s(K) \cos \left( \omega t - \arcsin \frac{K \sin \delta}{\sqrt{1 + K^2 + 2K \cos \delta}} \right); \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned}
 & [\delta \div \delta + \gamma] \quad u_d(\omega t, K) = \\
 & = U_s(K) \cos \left( \delta - \arcsin \frac{K \sin \delta}{\sqrt{1 + K^2 + 2K \cos \delta}} \right) \cos(\omega t - \delta); \quad (2.6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & [\delta + \gamma \div 2\delta] \quad u_d(\omega t, K) = \\
 & = U_s(K) \cos \left( \omega t - 2\delta + \arcsin \frac{K \sin \delta}{\sqrt{1 + K^2 + 2K \cos \delta}} \right), \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

где  $U_s(K)$  определяется по формуле (2.2), а угол  $\gamma$  – по формуле (2.3).

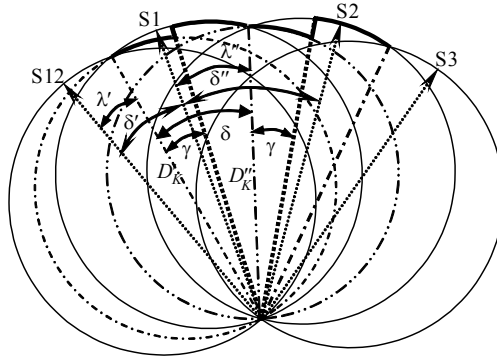


Рис. 2.7 Построения при реальных величинах конструктивной несимметрии вентильных обмоток

На основе полученных соотношений зависимость среднего уровня выпрямленного напряжения на выходе 12-пульсового выпрямителя последовательного типа и угла коммутации от конструктивной несимметрии имеет вид

$$\begin{aligned}
 U_{d \text{ сред}} &= \frac{2 \cos \frac{\delta}{2} \sqrt{\frac{1 + K^2 + 2K \cos \delta}{1 + \cos \delta}} U_{\text{л}}}{\delta} \times \\
 &\times \left[ \sin \gamma \cos \frac{\delta}{2} \cos \left( \frac{\delta}{2} - A \right) + 2 \sin \frac{\delta - \gamma}{2} \cos \left( A - \frac{\delta + \gamma}{2} \right) \right], \quad (2.8)
 \end{aligned}$$



где

$$A = \arcsin \frac{K}{2\sqrt{1 + K^2} + \sqrt{3} \cdot K}.$$

При отсутствии конструктивной несимметрии и при идеальной коммутации вычисления по формуле (2.8) дают такой же результат, как по известным классическим формулам.

Из формулы (2.8) видно, что наличие конструктивной несимметрии вентильных обмоток трансформаторов приводит при постоянстве потребляемой мощности к уменьшению среднего уровня выпрямленного напряжения, а значит, и к увеличению потребляемого тока, изменению формы его кривой и гармонического состава.

Учитывая реальность наличия других факторов, снижающих эффективность преобразования (амплитудно-фазовые искажения питающих напряжений и их несинусоидальность, параметрическая несимметрия токопроводящих цепей и т.п.), необходимо стремиться к минимизации конструктивной несимметрии обмоток трансформатора.

В качестве следующего примера проведем исследование влияния конструктивной несимметрии и коэффициента загрузки на величину и форму кривой выпрямленного напряжения.

На основе формул (2.4)–(2.7) составлена математическая модель в MathCAD, позволяющая:

– определять уровень выпрямленного напряжения при заданных величинах конструктивной несимметрии, напряжения короткого замыкания и коэффициента загрузки;

- автоматически строить внешнюю характеристику выпрямителя;
- определять угол коммутации при перечисленных аргументах;
- определять гармонический состав выпрямленного напряжения и фазовые сдвиги гармоник при любых сочетаниях начальных условий;
- определять степень искажения выпрямленного напряжения как при амплитудной, так и при фазовой несимметрии напряжений, формируемых вентильными обмотками; рассчитывать коэффициенты гармоник, искажения и пульсации выпрямленного напряжения.

На рис. 2.8 изображены кривые изменения относительного уровня выпрямленного напряжения в функции величины конструктивной несимметрии и коэффициента загрузки при напряжении короткого замыкания  $u_K = 0,08$  (8 %).

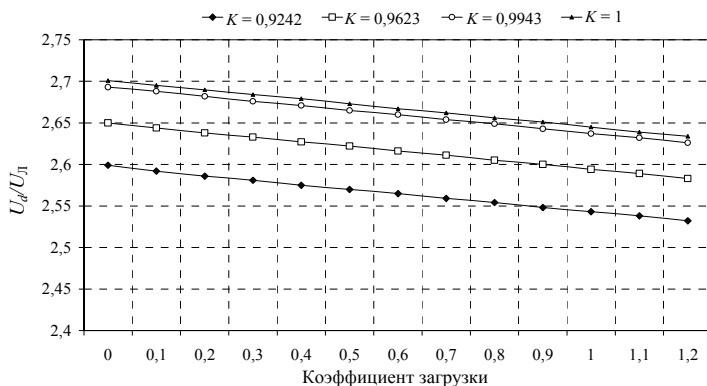


Рис. 2.8. Кривые изменения относительного уровня выпрямленного напряжения в функции величины конструктивной несимметрии и коэффициента загрузки

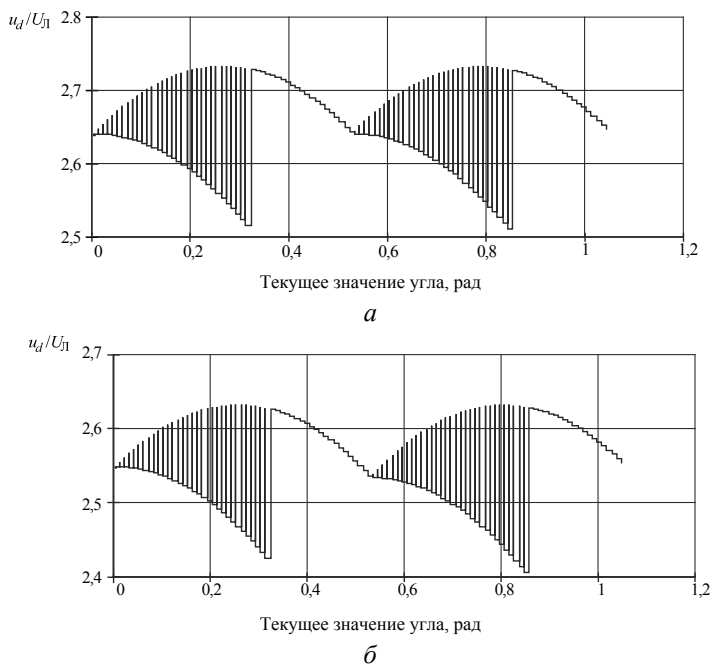


Рис. 2.9. Форма кривой выходного напряжения:  
а – при симметричных линейных напряжениях; б – при несимметрии 7,6 %

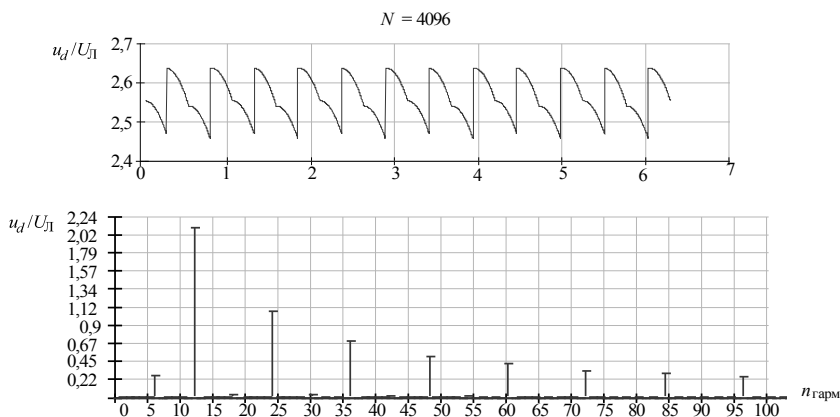


Очевидно, что при расчете выпрямленного напряжения необходимо учитывать поправку на несимметрию трехфазных линейных напряжений вентиляльных обмоток.

На рис. 2.9, *а* показана форма кривой выходного напряжения при симметричных линейных напряжениях, на рис. 2.9, *б* – при их несимметрии, равной 7,6 %. Процесс изменения формы кривой выпрямленного напряжения при увеличении коэффициента загрузки от 0 до 1,2 отражен заштрихованной областью рисунков.

При анализе изменений в спектре гармоник выпрямленного напряжения в зависимости от углов коммутации и величины конструктивной несимметрии было зафиксировано появление шестой и кратных ей гармоник.

Это подтверждается спектральным анализом, результаты которого для случая несимметрии  $K = 0,93$  и  $K_3 = 0,8$  показаны на рис. 2.10, *а*.



|   | 0  | 1             |
|---|----|---------------|
| 0 | 0  | 94,9034707657 |
| 1 | 6  | 0,2717155407  |
| 2 | 12 | 2,0970379549  |
| 3 | 18 | 0,0401457891  |
| 4 | 24 | 1,0643817228  |
| 5 | 30 | 0,0339265086  |
| 6 | 36 | 0,6946395696  |

|   | 0  | 1             |
|---|----|---------------|
| 0 | 0  | 98,3455655603 |
| 1 | 6  | 0             |
| 2 | 12 | 2,1730963263  |
| 3 | 18 | 0             |
| 4 | 24 | 1,1029862412  |
| 5 | 30 | 0             |
| 6 | 36 | 0,7198337509  |

*б*

Рис. 2.10. Результаты спектрального анализа для случаев несимметрии при  $K = 0,93$  и  $K_3 = 0,8$



На рис. 2.10, *б* и *в* приведены в табличной форме гармонические составы кривых при заданной несимметрии и при симметричном исполнении обмоток соответственно. Постоянная составляющая и амплитуды гармоник, до 36-й (рис. 2.10, *б*, *в*), приведены в процентном отношении к уровню выпрямленного напряжения на холостом ходу.

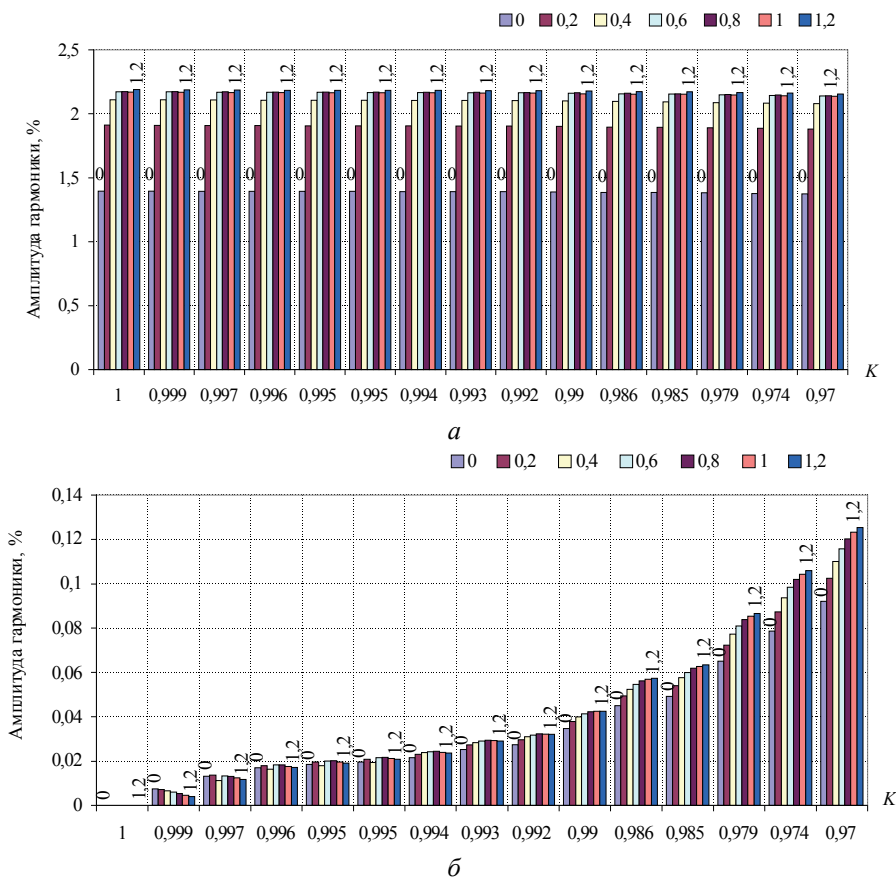


Рис. 2.11. Гистограммы зависимостей амплитуд двенадцатой канонической и шестой неканонической гармоник от величины конструктивной несимметрии и от коэффициента загрузки выпрямителя:

*а* – зависимость амплитуды гармоники 600 Гц от несимметрии обмоток при коэффициентах загрузки; *б* – зависимость амплитуды гармоники 300 Гц от несимметрии обмоток при коэффициентах загрузки



Как показано на рис. 2.11, при заданном коэффициенте загрузки и при увеличении несимметрии амплитуда канонической гармоники практически не изменяется, в то время как амплитуда шестой гармоники растет.

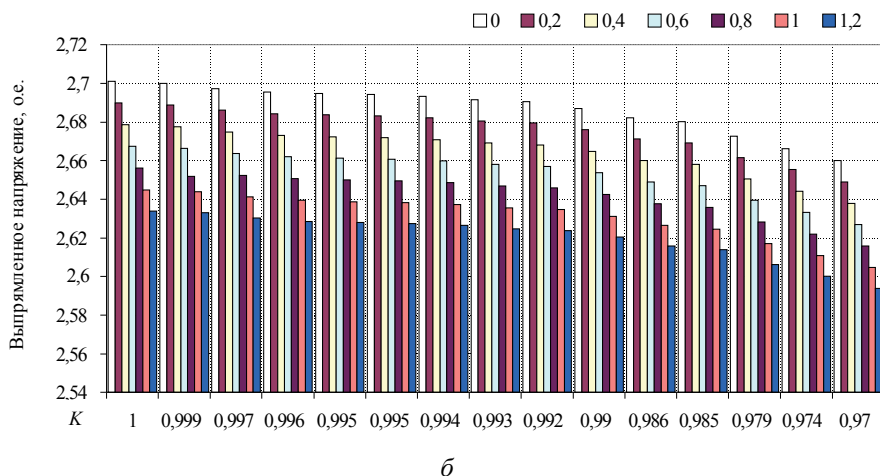
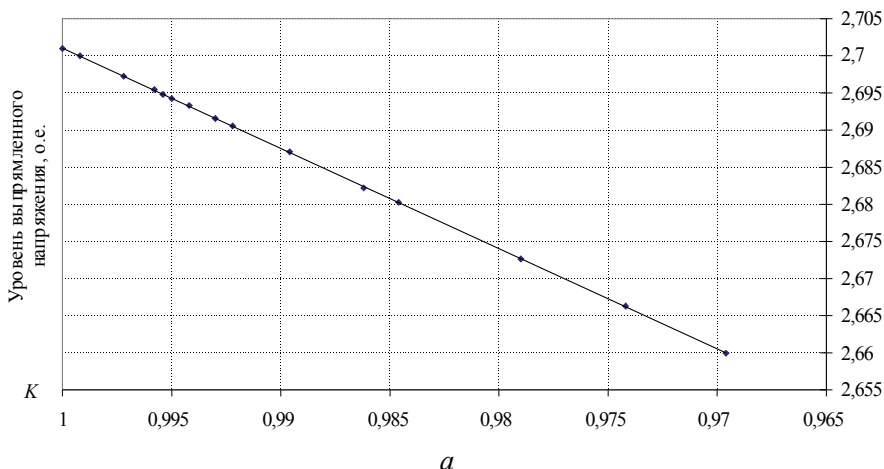


Рис. 2.12. Зависимость внешней характеристики выпрямителя в функции конструктивной несимметрии:

*a* – характер изменения уровня напряжения при увеличении несимметрии;  
*б* – внешние характеристики выпрямителя при различных значения



Гистограммы зависимости внешней характеристики выпрямителя в функции конструктивной несимметрии (рис. 2.12) показывают, что с увеличением несимметрии уровень выпрямленного напряжения снижается линейно.

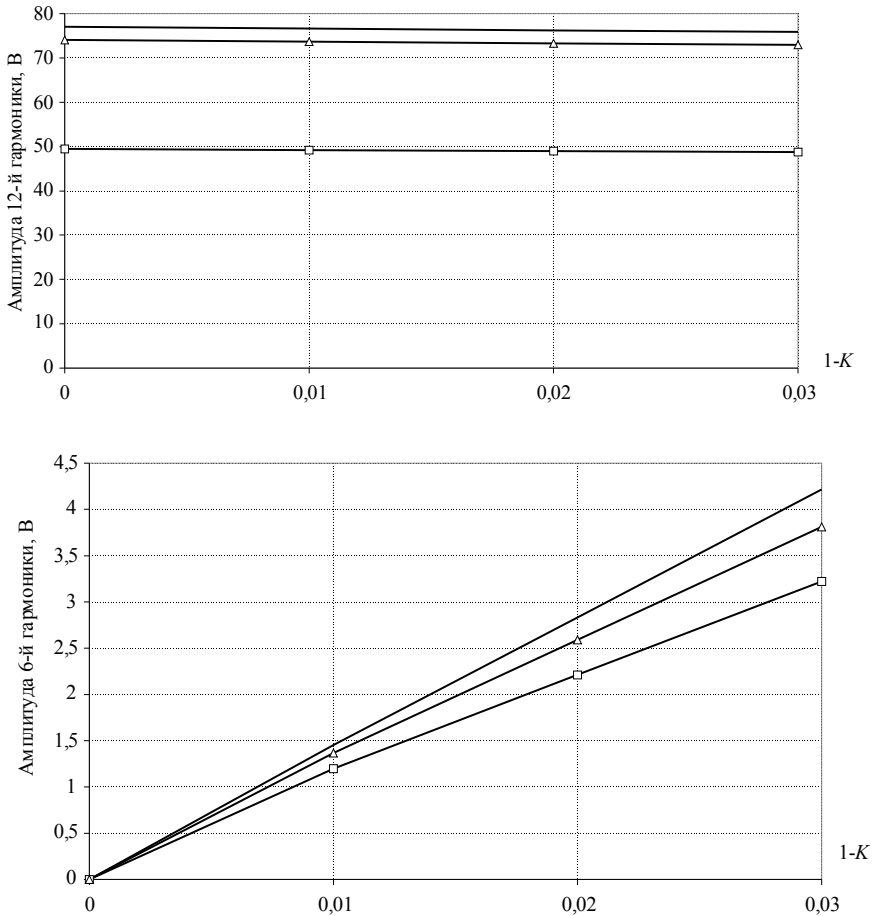


Рис. 2.13. Кривые зависимостей амплитуд двенадцатой и шестой гармоник выпрямленного напряжения 12-пульсового выпрямителя железнодорожной тяговой подстанции при  $U_{d0} = 3544$  В:

□ — угол коммутации 0 эл. град.; △ — угол коммутации 10 эл. град.; — — угол коммутации 15 эл. град.



Из графиков зависимостей амплитуд двенадцатой и шестой гармоник выпрямленного напряжения 12-пульсового выпрямителя железнодорожной тяговой подстанции при  $U_{a0} = 3544$  В (рис. 2.13) видно, что при увеличении конструктивной несимметрии происходит незначительное (приблизительно на 1 В) снижение амплитуды двенадцатой гармоники, пропорциональное снижению уровня выпрямленного напряжения.

Поэтому процентное содержание канонической гармоники относительно действующего уровня выпрямленного напряжения остается неизменным. Амплитуда же шестой гармоники возрастает при увеличении несимметрии линейно.

### 2.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ВЕНТИЛЕЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Изучение процессов в преобразователях переменного тока в постоянный ток, особенно в выпрямителях с естественной коммутацией, привело к формулированию некой абстрактной на первых шагах исследования гипотезе. Суть ее состоит в следующем: любые структурно связанные или несколько структурно несвязанных векторных систем переменных (двуполярных) напряжений преобразуемы в однополярную векторную структуру результирующих напряжений с помощью естественно сформированной системы однонаправленных электрических цепей коммутации (вентильной конструкции).

Обычно в литературе естественность коммутации рассматривается как аксиома. Например, в выражении «...коммутация, необходимая для обеспечения требуемого потока энергии в желаемом направлении, возникает в преобразователе с естественной коммутацией вследствие изменения междупазного напряжения...» предполагается, что желаемое направление обеспечивается выпрямителем с помощью особого для каждого из выпрямителей схемного решения и способа связи его с нагрузкой и источником переменного тока. Вместе с тем режимы работы выпрямителей тесно связаны с работой трансформаторного преобразователя числа фаз (ТПЧФ), что предполагает существование общих принципов разработки схемных решений полупроводниковых преобразователей.

Методы проектирования многопульсовых выпрямителей обычно сводятся к структурному и параметрическому синтезу [7]. Проектирова-



ние схем преобразователей с естественной коммутацией обычно связывают в первую очередь с выбором наиболее подходящей базовой схемы. Многопульсовые выпрямители строятся на основе базовых, известных схем, а новые схемные решения находятся практически интуитивно, на изобретательском уровне. Так, схема 6-пульсового мостового выпрямителя служит «кирпичиком» для построения схем с большим количеством пульсаций (с естественно сформированными вентильными конструкциями только в независимых секциях). Вместе с тем закономерное перемещение векторов результирующих напряжений можно связать с естественным формированием вентильной конструкции при любой структуре векторных построений питающих напряжений и любом количестве пульсаций выпрямленного напряжения.

В соответствии с этим любая сколь угодно сложная система напряжений может быть представлена на комплексной плоскости в виде дискретных, но естественно перемещающихся (при набеге фаз), векторных структур. При этом необходимо учитывать, что структуры систем должны соответствовать закону равенства длин векторов результирующих напряжений (между дискретно перемещаемыми и максимально отдаленными друг от друга точками комплексной плоскости), описывающих окружность планируемой для заданной пульсовости векторной диаграммы выпрямленного напряжения. Для фиксированных положений векторных структур независимо от способа формирования результирующих напряжений и количества систем напряжений, питающих вентильные обмотки, оказалось возможным выявить все однозначные связи между рабочими точками питающих систем и нагрузкой постоянного тока, а также связи между векторными структурами, если в преобразовательном процессе участвует более одной системы. Полученные однозначные связи определяют при этом схемное решение выпрямителя.

В качестве примера приведем способы построения известной схемы вентильной конструкции 6-пульсового мостового выпрямителя методом фиксации вращающихся векторов результирующих напряжений и схемы с построением вентильной конструкции 12-пульсового кольцевого выпрямителя последовательного типа – методом символов.

Известно несколько методов топологического анализа и синтеза схем выпрямления. Рассмотрим метод фиксации вращающихся результирующих векторов на простейшем примере построения выпрямителя с шестифазным ТПЧФ, схема которого с топологией вторичных обмоток напряжений показана на рис. 2.14, а.

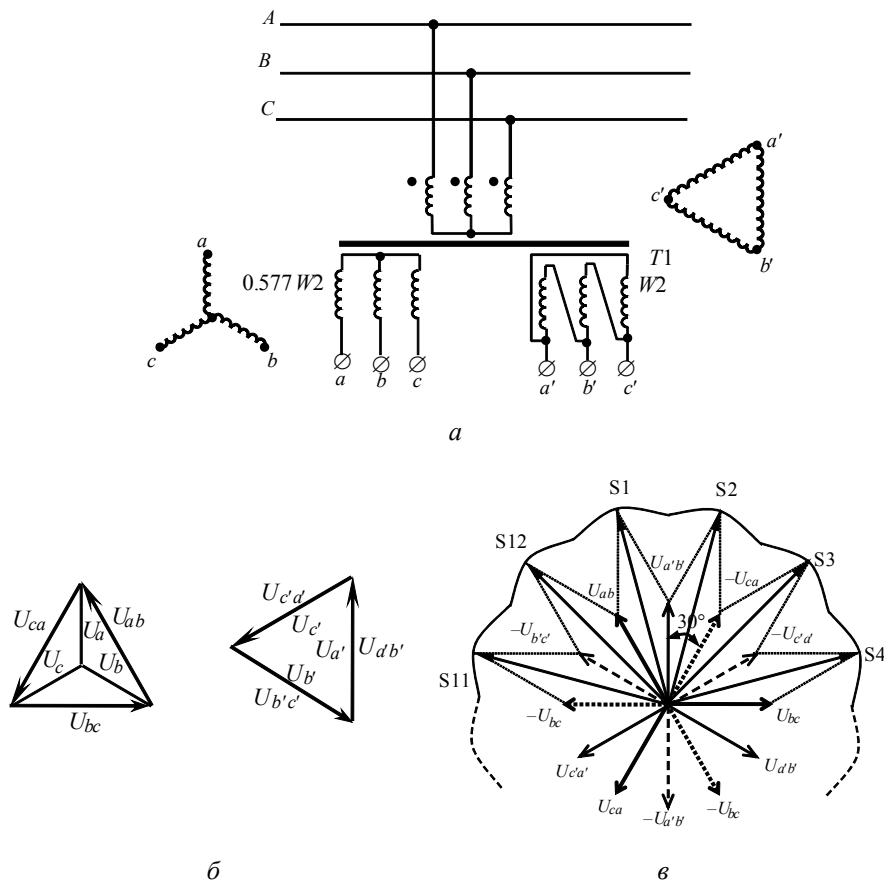


Рис. 2.14. Схема с шестифазным ТПЧФ

Для создания схемы выпрямления по рассматриваемому методу необходимо придерживаться правил построения векторных диаграмм фазных и линейных напряжений вторичных обмоток ТПЧФ (рис. 2.14, б) и векторной диаграммы выпрямленного напряжения, представленного огибающей векторов  $S_i$  результирующих напряжений вентильных обмоток (рис. 2.14, в). При параллельном включении двух симметричных трехфазных систем напряжений, формируемых вторичными обмотками, соединенными в «звезду» и «треугольник», в качестве результирующих напряжений (или диагональных ЭДС, которые назовем ДЭДС),

образующих пульсации выпрямленного напряжения, выступают линейные напряжения симметричных трехфазных систем напряжений. Каждая из этих систем обеспечивает 6-пульсовое выпрямление.

В качестве примера рассмотрим систему «звезда». На рис. 2.15 показано формирование шести ДЭДС на выходных выводах обмоток, соединенных в «звезду», причем векторное изображение сопоставлено с топологией построения обмоток, приведенной на рис. 2.14, а. Анализ волновых процессов показал, что векторы ДЭДС меняют друг друга, вращаясь по ходу часовой стрелки.

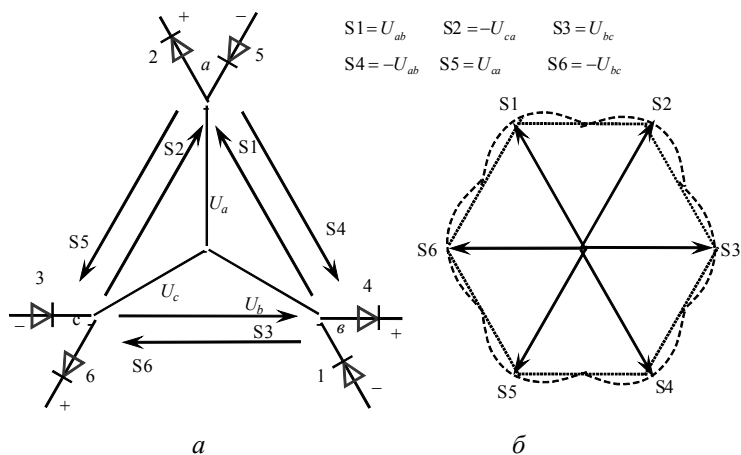


Рис. 2.15. Формирование ДЭДС в «звезде»

В каждом «фиксированном» положении результирующего вектора выходные выводы фаз вторичных обмоток соединяются с плюсовой и минусовой клеммой выпрямителя через вентили, включенные естественным образом. При полном повороте векторов ДЭДС можно сформировать вентильную конструкцию, которая, как это видно из рис. 2.15, а, соответствует известному трехфазному мосту. Цифры, проставленные на рис. 2.15, а рядом с диодами, соответствуют порядку вступления диодов в работу. При идеальной коммутации происходит мгновенное переключение двух обмоток, и поэтому в любой момент времени в работе задействовано два диода. При работе с реальными цепями количество коммутирующих цепей увеличивается. На рис. 2.15, б векторы ДЭДС соединены в векторной диаграмме выпрямленного напряжения, где пунктиром показана огибающая выпрямленного напряжения с шестью пульсациями за период. Работа второй 6-пульсо-



вой схемы, которую можно создать на базе обмоток ТПЧФ, соединенных в «треугольник», практически не отличается от работы рассмотренной схемы. Векторы линейных напряжений в этом случае смещены на 30 эл. град. по отношению к векторам линейных напряжений обмоток, соединенных «звездой». При параллельном соединении таких 6-пульсовых схем векторная диаграмма ДЭДС совпадает с внутренней структурой векторов, показанных на рис. 2.14, в. Таким образом обеспечивается 12-пульсовое выпрямление.

При последовательном соединении шестипульсовых выпрямителей ДЭДС формируются путем векторного сложения линейных напряжений «звезды» и «треугольника», что отражено на рис. 2.14, в, где также показана кривая выпрямленного напряжения. Синтез 12-пульсовой схемы методом фиксации вращающихся векторов результирующих напряжений связан с перемещением системы векторов «звезды» относительно системы векторов «треугольника» (или наоборот) по ходу часовой стрелки. Рассмотрим несколько иной способ синтеза.

Для более полной иллюстрации этого способа на рис. 2.16 показаны волновые диаграммы, соответствующие векторным диаграммам рис. 2.14, в, и приведен пример формирования ДЭДС S1 и S7 в 12-пульсовом выпрямителе последовательного типа.

Анализ векторных построений позволяет достаточно простым способом реализовать синтез схем выпрямления с разным количеством пульсаций в течение периода.

В табл. 2.1 приведена методика «преобразования» векторных построений в реальную схему выпрямительного устройства.

Соблюдая порядок наименований векторов и проведя транспозицию наименований, соответствующую логике выпрямительного процесса, по таблице, читаемой по столбцам слева направо, получим все однозначные по направлениям электрические связи выводов обмоток с нагрузкой и связи между обмотками, соединенными в «звезду» и «треугольник». Связующими звеньями являются диоды.

Процесс синтеза многопульсовой схемы выпрямления по заданным параметрам ТПЧФ с последовательным включением линейных ЭДС можно выполнить в несколько этапов:

- по заданной пульсовости выпрямителя определяется количество симметричных трехфазных систем напряжений. Минимальный сдвиг в фазовой плоскости между одноименными линейными векторами систем соответствует длительности пульсации;

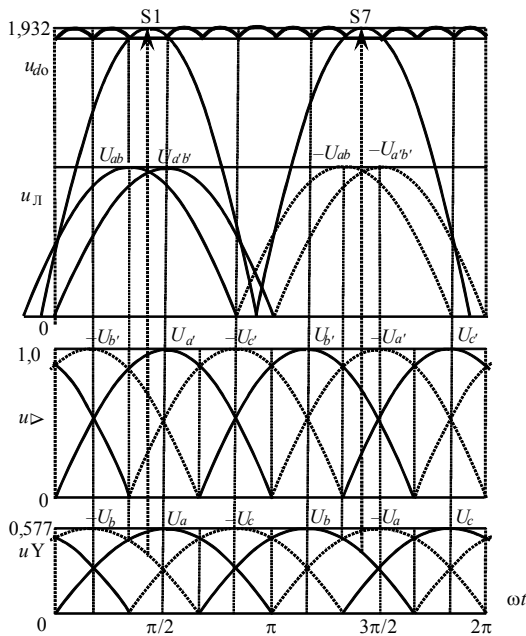


Рис. 2.16. Кривые выпрямленного напряжения в системе «звезда»/«звезда»–«треугольник»

Т а б л и ц а 2.1

| Но-<br>мер<br>ДЭДС | Связанные<br>системы<br>векторов | Транспозиция<br>связанных<br>векторов | Диодные связи выходных точек<br>обмоток с нагрузкой и между собой |                            |               |                              |               |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|                    |                                  |                                       | Анодная<br>группа<br>связей                                       | Кольцевая<br>группа связей |               | Катодная<br>группа<br>связей |               |
| S1                 | $U_{ab} \rightarrow U_{a'b'}$    | $-U_{ba} \rightarrow -U_{b'a'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ba$                       | $\rightarrow$ | $b' a'$                      | $\rightarrow$ |
| S2                 | $-U_{ca} \rightarrow U_{a'b'}$   | $-U_{ca} \rightarrow -U_{b'a'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ca$                       | $\rightarrow$ | $b' a'$                      | $\rightarrow$ |
| S3                 | $-U_{ca} \rightarrow -U_{c'a'}$  | $-U_{ca} \rightarrow -U_{c'a'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ca$                       | $\rightarrow$ | $c' a'$                      | $\rightarrow$ |
| S4                 | $U_{bc} \rightarrow -U_{c'a'}$   | $-U_{cb} \rightarrow U_{c'a'}$        | $\rightarrow$                                                     | $cb$                       | $\rightarrow$ | $c' a'$                      | $\rightarrow$ |
| S5                 | $U_{bc} \rightarrow U_{b'c'}$    | $-U_{cb} \rightarrow -U_{c'b'}$       | $\rightarrow$                                                     | $cb$                       | $\rightarrow$ | $c' b'$                      | $\rightarrow$ |
| S6                 | $-U_{ab} \rightarrow U_{b'c'}$   | $-U_{ab} \rightarrow -U_{c'b'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ab$                       | $\rightarrow$ | $c' b'$                      | $\rightarrow$ |
| S7                 | $-U_{ab} \rightarrow -U_{a'b'}$  | $-U_{ab} \rightarrow -U_{a'b'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ab$                       | $\rightarrow$ | $a' b'$                      | $\rightarrow$ |
| S8                 | $U_{ca} \rightarrow -U_{a'b'}$   | $-U_{ac} \rightarrow -U_{a'b'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ac$                       | $\rightarrow$ | $a' b'$                      | $\rightarrow$ |



Окончание табл. 2.1

| Но-<br>мер<br>ДЭДС | Связанные<br>системы<br>векторов | Транспозиция<br>связанных<br>векторов | Диодные связи выходных точек<br>обмоток с нагрузкой и между собой |                            |               |                              |               |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------|---------------|------------------------------|---------------|
|                    |                                  |                                       | Анодная<br>группа<br>связей                                       | Кольцевая<br>группа связей |               | Катодная<br>группа<br>связей |               |
| S9                 | $U_{ca} \rightarrow U_{c'a'}$    | $-U_{ac} \rightarrow -U_{a'c'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ac$                       | $\rightarrow$ | $a' c'$                      | $\rightarrow$ |
| S10                | $-U_{bc} \rightarrow U_{c'a'}$   | $-U_{bc} \rightarrow -U_{a'c'}$       | $\rightarrow$                                                     | $bc$                       | $\rightarrow$ | $a' c'$                      | $\rightarrow$ |
| S11                | $-U_{bc} \rightarrow -U_{b'c'}$  | $-U_{bc} \rightarrow -U_{b'c'}$       | $\rightarrow$                                                     | $bc$                       | $\rightarrow$ | $b' c'$                      | $\rightarrow$ |
| S12                | $U_{ab} \rightarrow -U_{b'c'}$   | $-U_{ba} \rightarrow -U_{b'c'}$       | $\rightarrow$                                                     | $ba$                       | $\rightarrow$ | $b' c'$                      | $\rightarrow$ |

• системы линейных векторов симметричных трехфазных систем напряжений совмещаются (связываются) в одну точку отсчета (рис. 2.14, в), и из нее достраиваются дополняющие векторы противоположного направления;

• в соответствии с принятыми правилами проводится индексация векторов;

• осуществляется векторное суммирование смежных векторов связанной системы. Полученные результирующие векторы (ДЭДС) определяют параметры кривой выпрямленного напряжения;

• выбирается первый вектор ДЭДС, затем последующие нумеруются с нарастанием порядкового номера при движении по часовой стрелке;

• составляется таблица, в столбце 2 которой в строке с наименованием конкретного вектора ДЭДС вписываются слева направо линейные напряжения, формирующие данный вектор. Порядок записи соответствует расположению векторов линейных напряжений, определенному направлением хода часовой стрелки;

• в столбце 3 вписываются те же линейные напряжения, но с транспозицией индексов для получения единого знака напряжений, причем при выборе отрицательного обозначения всех напряжений результат транспозиции в таблице соответствует электрической проводимости слева направо;

• по полученному расположению индексов однозначно определяются диодные связи выводов вентильных обмоток с нагрузкой и между собой (столбцы 4, 5, 6).

• с использованием полученных диодных связей составляется схема вентильной конструкции (рис. 2.17 и 2.18).



На рис. 2.17, *а* показана схема анодной группы, на рис. 2.17, *б* – кольцевой и на рис. 2.17, *в* – катодной группы диодов, связь между которыми представляется однозначной.

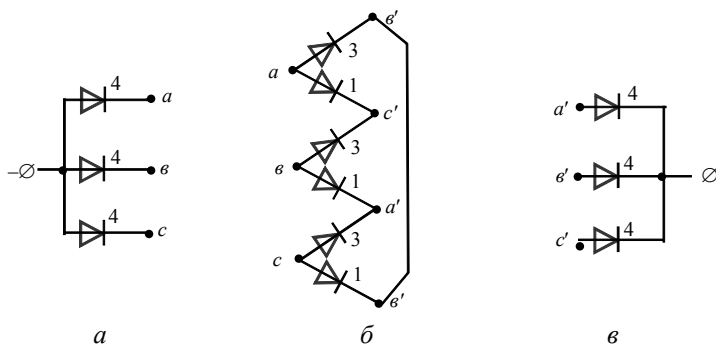


Рис. 2.17. Схемы соединения диодов анодной, кольцевой и катодной групп

На рис. 2.18 приведен результат схемотехнического синтеза в виде принципиальной электрической схемы кольцевого 12-пульсового выпрямителя на диодах. Цифрами на обоих рисунках обозначено количество периодов проводящего состояния длительностью по 30 эл. град. диодов за период питающего напряжения.

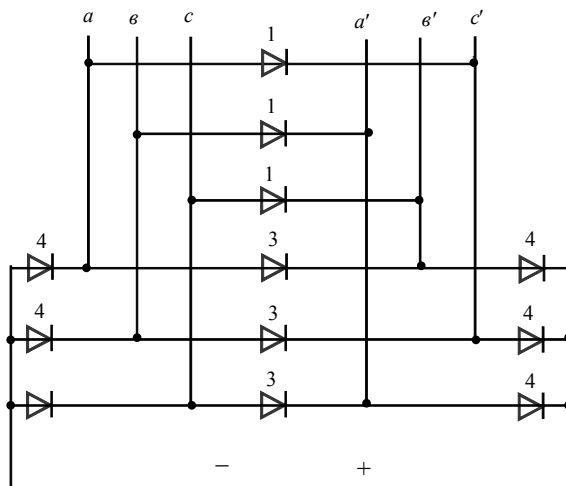


Рис. 2.18. Схема 12-пульсового кольцевого выпрямителя



Анализ кольцевых схем показал, что:

- работа трансформаторного оборудования в таких схемах ничем не отличается от работы трансформаторного оборудования с мостовыми выпрямителями;
- по сравнению со схемой трехфазного двухмостового выпрямления в кольцевых сокращается количество диодов в цепи протекания тока нагрузки, что способствует снижению потери энергии в полупроводниковых приборах.

Применяя рассмотренные методы нахождения схемных решений, можно разработать принципиальные электрические схемы многопульсовых выпрямителей, ограничившись только построением векторных систем напряжений вентильных обмоток, способствующих формированию наперед заданной величины результирующих напряжений. Все это делает предложенный метод универсальным и пригодным для проектирования любых схем выпрямления.

В перспективных системах электрической тяги на постоянном токе с напряжением до 24 кВ одним из звеньев преобразования электроэнергии будет автономный инвертор. При больших мощностях нагрузки и высоких уровнях питающего напряжения вследствие низкой частоты коммутации полностью управляемых тиристоров наблюдается заметное снижение качества выходного напряжения. Повысить качество напряжения можно применением в инверторах с широтно-импульсной модуляцией дополнительно и амплитудной. Такой подход осуществляется с помощью построения многоуровневых инверторов. Однако при этом возникают проблемы разряда питающих конденсаторов инверторов и балансировки уровней напряжения на входе инвертора. Решению указанных проблем способствует применение двойного преобразования по схеме «многоуровневый выпрямитель–многоуровневый инвертор». Известно, что в области высоковольтного преобразования наиболее приемлемо построение преобразователей по многокаскадным схемам.

Многопульсовые преобразователи, построенные по многокаскадным схемам, появились в первой половине прошлого века. Наиболее известны двухкаскадный выпрямитель по схеме В.П. Вологодина и 12-пульсовый мостовой выпрямитель последовательного типа (двухкаскадная схема Я.М. Червоненкиса), широко применяемый в настоящее время, в частности на тяговых подстанциях железнодорожного



транспорта. В 1970-е годы активную работу по генерации многокаскадных схем выпрямления провел А.М. Репин. В основе предложенных им выпрямителей лежат многокаскадные структуры преобразования, включающие, как правило, однофазные вентильные мосты. При этом формирование сдвигов по фазам между векторами напряжений на вторичных обмотках, необходимых для получения многопульсовости при выпрямлении, обеспечивается в первичных цепях двух трехфазных или шести однофазных трансформаторов, подключенных к трехфазной сети определенным образом. Не останавливаясь на достоинствах и недостатках данных выпрямителей, следует отметить, что существуют и другие схемные решения многокаскадных выпрямителей, например такие, в которых переменное напряжение на входе вентильных блоков формируется с помощью источников ортогональных напряжений.

Использованию в многокаскадных выпрямителях двухфазных ортогональных напряжений, сформированных трансформаторными преобразователями числа фаз (ТПЧФ) трехфазных систем напряжения в многофазные, посвящен целый ряд работ [6, 11, 12]. Особенность применения такого решения заключается в том, что  $p$ -пульсовый выпрямитель напряжения трехфазных систем содержит три  $p/3$ -пульсовых выпрямителя напряжения ортогональных систем, смещенных относительно друг друга на 120 эл. град. Это позволяет генерировать схемные решения трехуровневых 12-, 24-, 36-, 48-пульсовых выпрямителей, состоящих соответственно из трех выпрямителей ортогональных напряжений с 4-, 8-, 12-, 16-пульсовым выпрямленным напряжением.

Объектами применения мощных многоуровневых выпрямителей подобного рода могут быть высоковольтный асинхронный регулируемый электропривод на 6...10 кВ с многоуровневыми инверторами напряжения и многосистемный подвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями.

Рассмотрим особенности построения (топологию) и некоторые характеристики таких выпрямителей.

### **12-пульсовые трехуровневые выпрямители**

Один из вариантов принципиальной схемы электрических цепей трехуровневого 12-пульсового выпрямителя показан на рис. 2.19, а. Для получения кривой выпрямленного напряжения с пульсовостью, равной 12, используются три системы ортогональных напряжений – по одной на каждом уровне. Чтобы пояснить принцип формирования



ортогональных напряжений на каждом уровне, воспользуемся диаграммой рис. 2.19, б. В качестве примера рассмотрим способ получения ортогональности выходных напряжений обмоток фазы  $a$  первого и фазы  $b$  второго трансформатора. За опорную систему отсчета примем систему векторов фазных напряжений ( $U_A, U_B, U_C$ ) трансформатора Т1, первичные обмотки которого соединены в «звезду» (на диаграмме показаны сплошной линией). Поскольку первичные обмотки трансформатора Т2 соединены в «треугольник», векторы фазных напряжений его вторичных обмоток ( $U_{a'}, U_{b'}, U_{c'}$ ) опережают векторы соответствующих фаз опорной системы на 30 эл. град. (показаны на диаграмме пунктирной линией). Таким образом из двух симметричных трехфазных систем формируется шестифазная несимметричная (веерная) система напряжений вторичных обмоток трансформаторов Т1 и Т2 (рис. 2.19, б). При этом угол между векторами фазных напряжений  $U_a$  и  $U_{b'}$  составляет 90 эл. град. Присоединение выводов вторичных обмоток

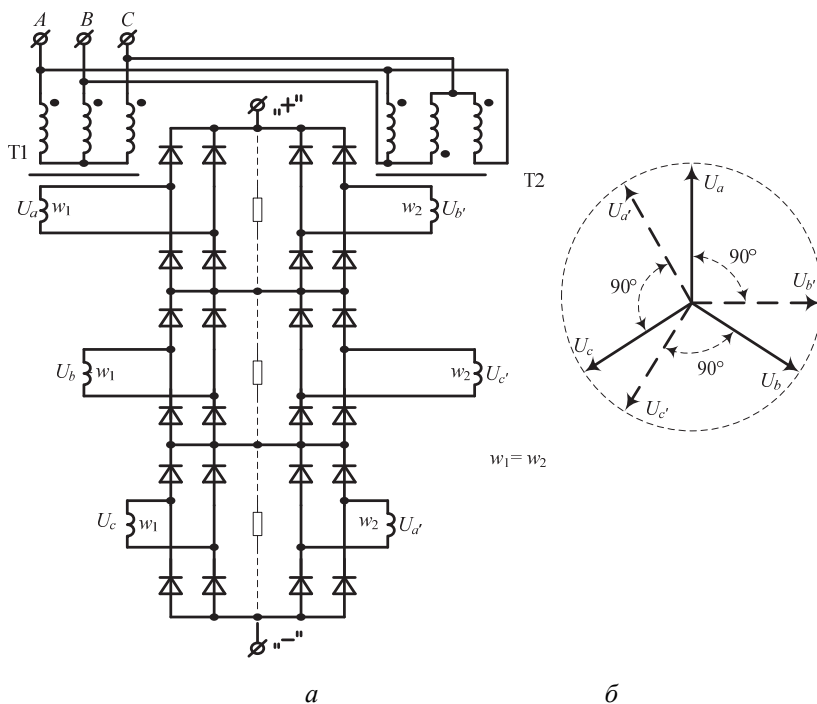


Рис. 2.19. Схема трехуровневого 12-пульсового выпрямителя



фазы  $a$  первого и фазы  $b$  второго трансформатора через мостовые выпрямители к общей нагрузке (на рис. 2.19,  $a$  показана пунктирной линией) приводит к появлению на ней выпрямленного 4-пульсового напряжения.

Наличие сдвига в 120 эл. град. между соответствующими парами фазных ЭДС каждого из трансформаторов обеспечивает в итоге двенадцатикратную частоту пульсации суммарного выпрямленного напряжения трех 4-пульсовых выпрямителей, соединенных последовательно. Входной ток выпрямителя при этом имеет двенадцатиступенчатую форму, близкую к синусоидальной, что достаточно эффективно решает проблему обеспечения электромагнитной совместимости полупроводникового преобразователя с питающей сетью и нагрузкой.

Применение в качестве источников ортогональных напряжений преобразователей трехфазного напряжения в двухфазное по схеме Кюблера (рис. 2.20) или по схеме AEG (рис. 2.21) способствует получению трехуровневой 12-пульсовой схемы выпрямления с использованием одного трансформатора.

На рис. 2.20 показаны также векторные диаграммы, с помощью которых поясняется принцип формирования ортогональных напряжений в каждом из трех каскадов. Поясним принцип формирования на примере первого каскада, включающего обмотки  $w_{a1}$ ,  $w_{b1}$ ,  $w_{b2}$ ,  $w_{c1}$ . За опорную систему отсчета примем систему векторов фазных напряжений ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ) трансформатора Т, первичные обмотки которого соединены в «звезду» (на диаграмме показаны тонкой сплошной линией). По каждой из осей опорной системы откладываются соответствующие векторы фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора: по оси  $U_a - U_{a1}$ , по оси  $U_b - U_{b1}$  и равный ему  $U_{b2}$ , по оси  $U_c - U_{c1}$ . Вектор напряжения на выходе последовательно соединенных вторичных обмоток  $w_{a1}$  и  $w_{b1}$  есть не что иное, как вектор линейного напряжения  $U_{a1b1}$ . Вектор напряжения на выходе последовательно соединенных вторичных обмоток  $w_{b2}$  и  $w_{c1}$  есть не что иное, как вектор линейного напряжения  $U_{b2c1}$ . Соответствующее соотношение между числами витков  $w_{a1} = w_{c1}$  и  $w_{b1} = w_{b2}$  обеспечивает угол 90 эл. град. между векторами напряжений  $U_{a1b1}$  и  $U_{b2c1}$ .

На рис. 2.21 приведены векторные диаграммы, с помощью которых поясняется принцип формирования ортогональных напряжений в каждом из трех каскадов. Поясним принцип формирования на примере

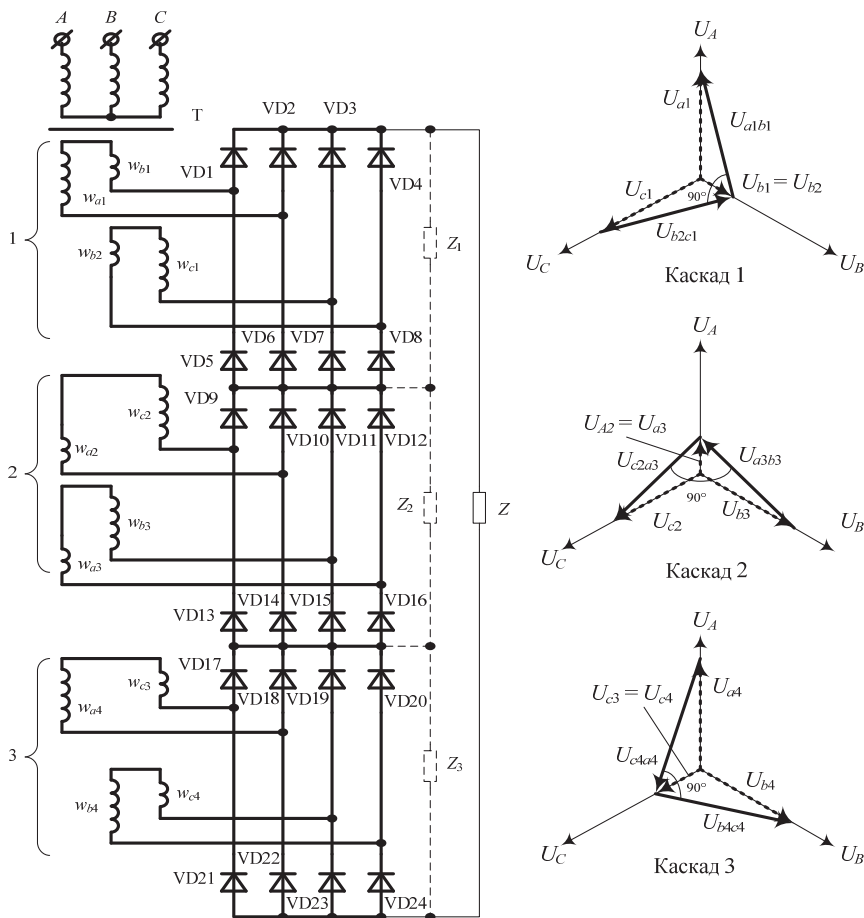


Рис. 2.20. Схема выпрямления Кюблера

первого каскада, образованного обмотками  $w_{a1}, w_{b1}, w_{c1}$ . За опорную систему отсчета примем, как и на рис. 2.20, систему векторов фазных напряжений ( $U_A, U_B, U_C$ ) трансформатора Т, первичные обмотки которого соединены в «звезду» (на диаграмме показаны тонкой сплошной линией). Откладывая по соответствующим осям векторы напряжений  $U_{a1}, U_{b1}$  и  $U_{c1}$  и определяя положение вектора напряжения  $U_{a1c1}$ , убеждаемся, что пересечение последнего с продолжением вектора напряжения  $U_{b1}$  происходит под углом 90 эл. град. (при условии  $w_{a1} = w_{c1}$ ).

Расчеты показали, что типовые мощности трансформаторов данных выпрямителей относительно велики. В результате топологических исследований получено схемное решение построения групп обмоток, применение которых приводит к уменьшению типовой мощности трансформатора.

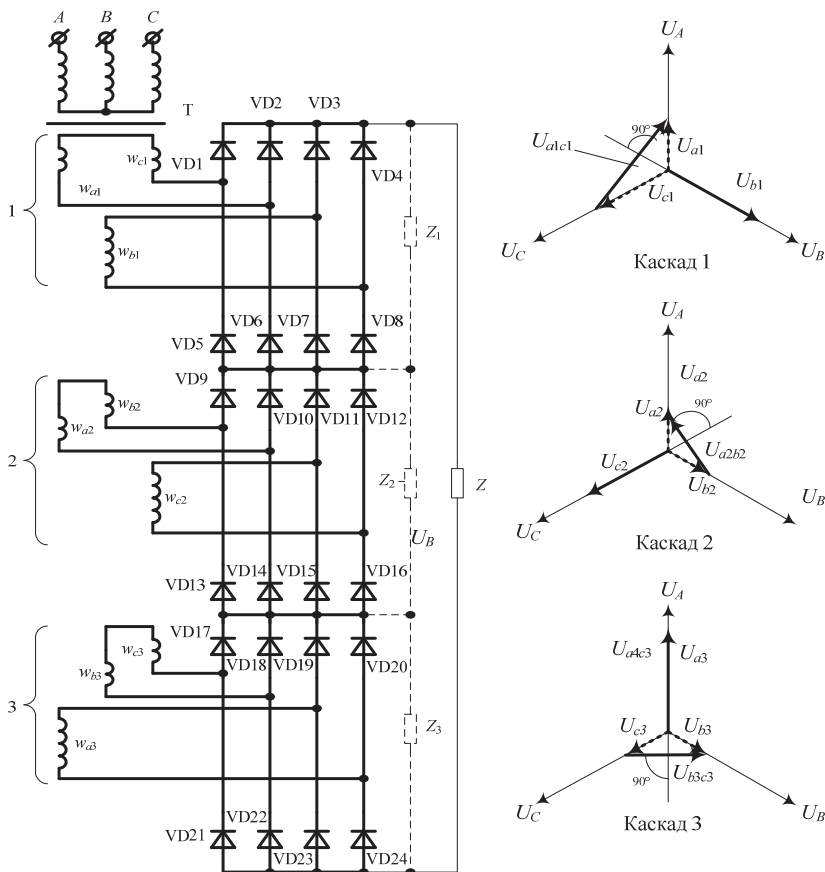


Рис. 2.21. Схема выпрямления АЕГ

На рис. 2.22 приведены принципиальная электрическая схема преобразователя числа фаз, условно названная X-схемой, а также векторные диаграммы фазных и линейных напряжений вторичных обмоток трансформатора.

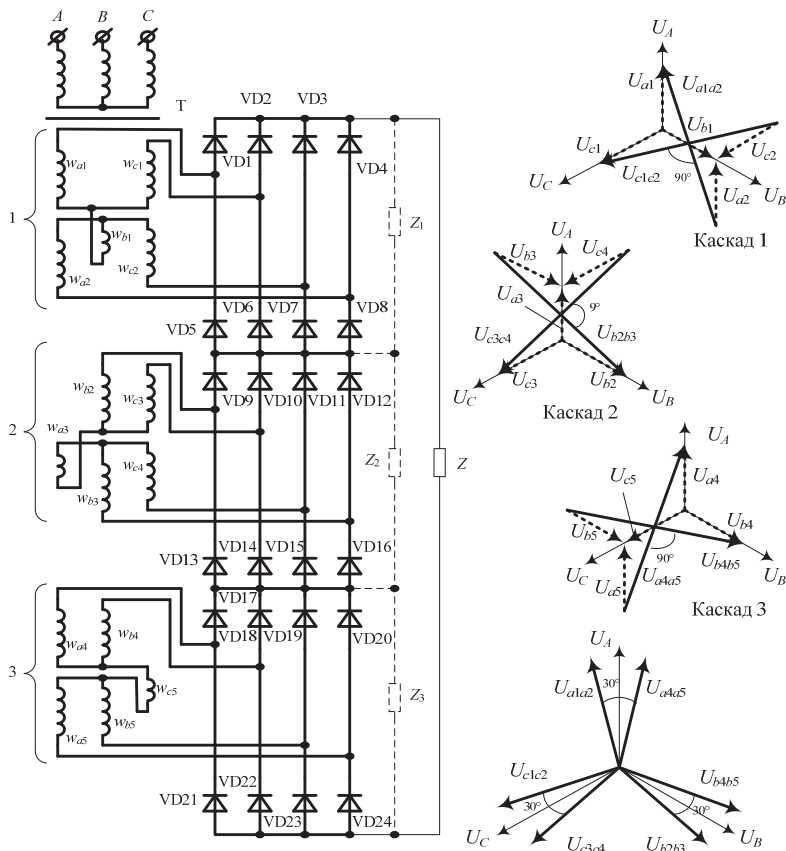


Рис. 2.22. Схема ТПЧФ (X-схема)

Особенность построения вторичных обмоток предлагаемого преобразователя в том, что каждая из трех групп обмоток выполнена в соответствии с решением задачи нахождения кратчайшего остова графа при измененных начальных условиях, согласно которым наикратчайший остов находится только после введения дополнительных вершин, называемых точками Штейнера. Из теории графов известно, что каждая точка Штейнера имеет степень 3 и векторы в ней сходятся под углом  $120^\circ$ , что в приложении к топологии вторичных обмоток трехфазных трансформаторов позволяет создать четырехфазную систему напряжений, ортогональность линейных напряжений в которой обес-

печивается при минимально возможных топологических размерах векторов (обмоток с меньшим количеством витков). В результате полная мощность вторичных обмоток заметно уменьшается. Сравнительная диаграмма амплитудно-фазовых портретов групп вторичных обмоток, составляющих схемы Кюблера, АЕГ и  $X$ -схему, при равенстве максимальных линейных напряжений, показана на рис. 2.23.

Применительно к схеме 12-пульсового выпрямителя (рис. 2.22) на рис. 2.24 показаны элементы вращающихся векторных диаграмм напряжений групп обмоток, необходимые для схмотехнического анализа и структурного синтеза по методу развернутых векторных диаграмм или методу временных диаграмм; их значения представлены векторами результирующих напряжений, обозначенных  $S_i$ .

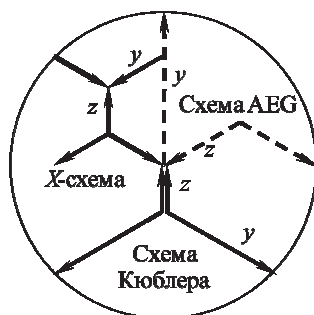


Рис. 2.23. Сравнительная диаграмма

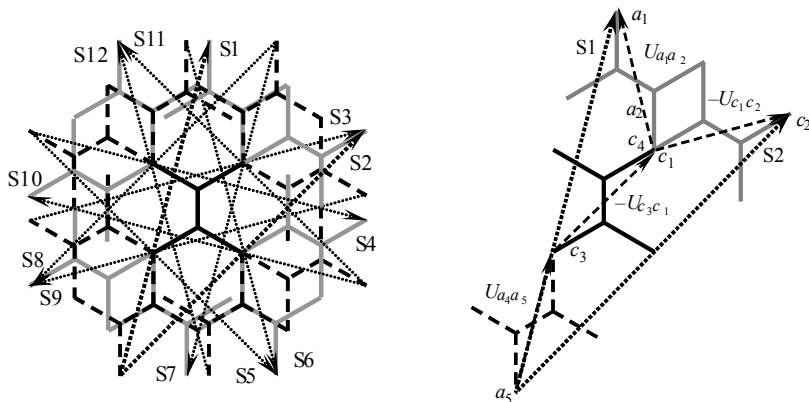


Рис. 2.24. Амплитудные значения выпрямленного напряжения в  $X$ -схеме

Результаты схмотехнического анализа приведены в табл. 2.2. В таблице обозначено:  $p$  – пульсовость выпрямителя;  $k_n$  – коэффициент пульсаций;  $k_{\text{и}}$  – коэффициент искажения;  $W_{BC}$  – суммарное количество витков вторичных обмоток одной преобразовательной секции, взятое относительно витков условной обмотки (принятых за одну относи-



тельную единицу), амплитуда ЭДС которой равна максимальному значению выпрямленного напряжения в секции;  $W_{BB}$  – суммарное количество витков всех вторичных обмоток, взятое относительно витков условной обмотки (принятых за одну относительную единицу), амплитуда ЭДС которой равна максимальному значению суммарного выпрямленного напряжения выпрямителя;  $S_1^*$ ,  $S_2^*$ ,  $S_T^*$  – коэффициенты полных мощностей первичных и вторичных обмоток и типовой мощности трансформатора(ов) соответственно.

Таблица 2.2

| №<br>п/п | $p$ | Схема     | $k_n$  | $k_n$  | $W_{BC}$ | $W_{BB}$ | $S_1^*$ | $S_2^*$ | $S_T^*$ |
|----------|-----|-----------|--------|--------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 1        | 12  | Рис. 2.19 | 0,0134 | 0,9886 | 2,0      | 2,196    | 1,047   | 1,571   | 1,308   |
| 2        | 12  | Рис. 2.20 | 0,0134 | 0,9886 | 2,231    | 2,449    | 1,012   | 1,239   | 1,125   |
| 3        | 12  | Рис. 2.21 | 0,0134 | 0,9886 | 2,155    | 2,366    | 1,012   | 1,196   | 1,104   |
| 4        | 12  | Рис. 2.22 | 0,0134 | 0,9886 | 1,932    | 2,121    | 1,012   | 1,142   | 1,076   |

Полученные результаты показывают, что наилучшими показателями для рассматриваемых 12-пульсовых схем выпрямления обладает преобразователь, собранный по X-схеме. Вместе с тем для формирования выходных результирующих напряжений трансформатора по такой схеме требуется большее количество вторичных обмоток.

Несмотря на увеличение количества вторичных обмоток, новое соотношение чисел витков в них 1 : 0,732 (против 1 : 0,366 в схеме Кюблера и 1 : 0,577 в схеме АЕГ) дополняет диапазон выбора схемных решений при изготовлении вторичных обмоток с целым количеством витков. Это существенно при построении мощных преобразователей, а также при относительно невысоком уровне выпрямленного напряжения, когда трудно обеспечить требуемую величину конструктивной несимметрии напряжений вторичных обмоток. Рассмотренные преобразователи могут быть выполнены также по схеме с параллельным соединением четырехфазных мостов.

Кроме того, в соответствии с рассмотренной выше методикой для предложенного преобразователя разработана схема электрических цепей выпрямителя кольцевого типа (рис. 2.25). Точки подключения ( $a_1...$ ,  $b_1...$ ,  $c_4$ ) вторичных обмоток трансформатора соответствуют их порядковым номерам, а выходное напряжение снимается с точек, обозначенных на схеме символами «+» и «-».

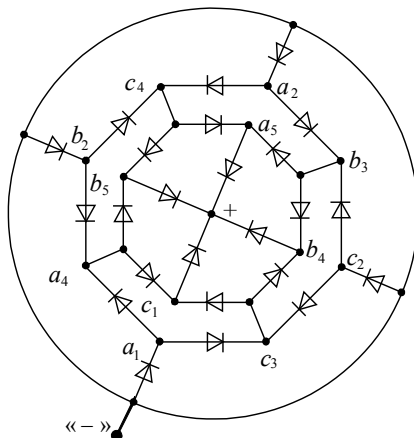


Рис. 2.25. Схема электрических цепей выпрямителя кольцевого типа

Необходимо отметить, что мощность потерь в полупроводниковых приборах такой схемы можно снизить на одну треть по отношению к мощности потерь в схеме трех последовательно соединенных четырехфазных мостов. Это обусловлено тем, что током нагрузки одновременно обтекаются четыре, а не шесть вентильных плеч. Однако при таком исполнении выпрямителя отсутствует каскадность по выходу, что исключает использование выпрямителя, как многоуровневого. Режимы работы обмоток трансформатора при изменении схемы соединения диодов остаются прежними, т. е. типовая мощность трансформатора не изменяется.

При выборе схемы соединения вторичных обмоток необходимо учитывать ряд требований. Одно из них – это обеспечение минимизации расхода электротехнических материалов, что связано в первую очередь с величиной типовой мощности. При сравнении однострансформаторных 12-пульсовых выпрямителей (см. рис. 2.20, 2.21 и 2.22) видно, что наиболее полно этому требованию отвечает выпрямитель с  $X$ -схемой.

Оценку расхода меди на изготовление обмоток трансформаторов при одинаковой плотности тока в них и одинаковом количестве витков на 1 В, с учетом показателей  $W$  (см. табл. 2.2), достаточно провести только по вторичным обмоткам, оценивая расход арифметической суммой всех ампер-витков  $W_i^* I_i^*$  в относительных единицах (о.е.):



$$G^* = \sum_i W_i^* I_i^* . \quad (2.9)$$

В соответствии с размерами элементов фигур на рис. 2.23 (приняв наибольший топологический размер за 1,0 о.е.) получим следующие соотношения количества витков: схема Кюблера – 0,816 : 0,299; схема АЕГ – 1,0 : 0,577;  $X$ -схема – 0,408 : 0,299. Взяв относительные числа в качестве расчетных, а также учитывая количество однотипных элементов в группах обмоток и то, что все обмотки проводят ток половину периода (кроме центральной обмотки  $X$ -схемы, проводящей ток весь период), в соответствии с формулой (2.9) получим результаты, приведенные в табл. 2.3.

Таблица 2.3

| Схема     | $G^*$ , о.е. | Экономия $G^*$ ,<br>% к схеме рис. 2.20 | Экономия $G^*$ ,<br>% к схеме рис. 2.21 |
|-----------|--------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Рис. 2.20 | 1,577        | –                                       | –                                       |
| Рис. 2.21 | 1,523        | 3,42                                    | –                                       |
| Рис. 2.22 | 1,453        | 7,84                                    | 4,6                                     |

Результаты исследования показывают, что 12-пульсовый выпрямитель, вторичные обмотки трансформатора которого соединены по  $X$ -схеме, дает существенную экономию меди по сравнению с другими выпрямителями рассматриваемого класса схем. Как и выпрямитель с группой обмоток, собранных по схеме Кюблера, он имеет хорошую параметрическую симметрию цепей тока нагрузки при формировании всех результирующих напряжений. Кроме того, поскольку количество витков большей обмотки отличается от количества витков меньшей только на 27 %, обеспечиваются более рациональное размещение обмоток в окне магнитопровода и лучшие электромагнитные условия по сравнению с размещением групп обмоток по схемам Кюблера и АЕГ.

Определенный интерес вызывает влияние конструктивной несимметрии на искажение ортогональности формируемых систем напряжений для различных групп соединения вторичных обмоток (схем Кюблера, АЕГ и  $X$ -схемы). Обозначим буквой  $\psi$  угол между ортогональными векторами. При идеальной форме кривой питающего напряжения сети и при конструктивной симметрии угол  $\psi = 90$  эл. град. Обозначим топологическую величину больших обмоток  $y$ , а меньших  $z$  (см. рис. 2.23). Тогда по фазовым портретам для группы обмоток Кюблера



$$\psi(y, z) = 2 \arcsin \left( 0,5y \sqrt{\frac{3}{z^2 + 4y^2 + 2z \cdot y}} \right) \frac{180}{\pi} \quad (2.10)$$

и выражение для практических расчетов при определении амплитуд линейных ортогональных напряжений  $U_{\max \text{ OH}}$  в относительных единицах принимает вид

$$U_{\max \text{ OH}} = \frac{\sqrt{3} \cdot y}{2 \sin \left( \frac{\psi}{2} \right)}.$$

Применение в качестве источников ортогональных напряжений преобразователей трехфазного напряжения в двухфазное по схеме Кюблера (см. рис. 2.20) или по схеме AEG (см. рис. 2.21) способствует получению трехуровневой 12-пульсовой схемы выпрямления с использованием одного трансформатора.

Для группы обмоток по X-схеме:

$$\psi(y, z) = \pi - 2 \arcsin \left( y \sqrt{\frac{3}{z^2 + 4y^2 + 2z \cdot y}} \right) \frac{180}{\pi}, \quad (2.11)$$

$$U_{\max \text{ OH}} = \frac{\sqrt{3} \cdot y}{\sin \left( \frac{\psi}{2} \right)}.$$

Результаты обработки формул (2.10) и (2.11) в программе MathCAD при  $y = 1,0$  показаны графически на рис. 2.26: для X-схемы – сплошной линией, для схемы Кюблера – пунктирной. В результате анализа схем с различными реальными вариантами отношений количества витков в исследуемых группах обмоток было выявлено, что при достаточно большом отклонении в симметрии выполнения обмоток угол  $\psi$  изменяется на доли градуса (не более 1 эл. град. при конструктивной несимметрии до 4 %). При этом направление изменения угла  $\psi$  в схемах Кюблера и X-схеме различно (рис. 2.26), но величина изменения одинакова. Характерным для групп обмоток по схеме Кюблера и X-схеме является и то, что величина линейных ортогональных напряжений изменяется одинаково. В схеме AEG в соответствии с ее топо-



логией (см. рис. 2.23) угол  $\psi$  остается равным 90 эл. град. при любой величине конструктивной несимметрии, но изменяется соотношение величин линейных напряжений.

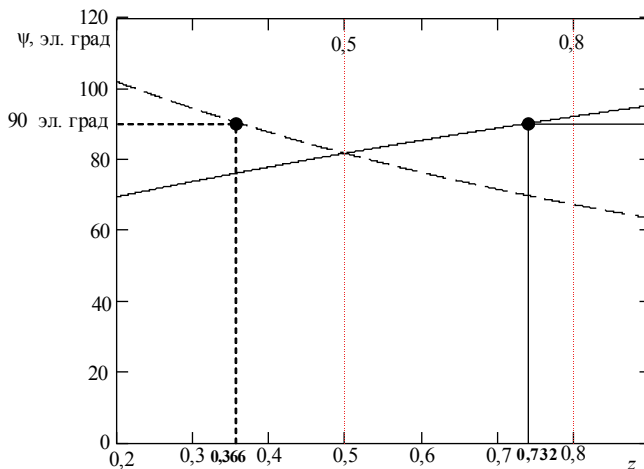


Рис. 2.26. Зависимость  $\psi(z)$

Исследования показали, что подбор пар обмоток с целым количеством витков для X-схемы при заданной величине конструктивной несимметрии достаточно широк, что позволяет создавать выпрямители различной мощности. Для схемы Кюблера этот выбор несколько больше. Необходимо также отметить, что в стержнях магнитопроводов трансформаторов выпрямителей рассматриваемого класса отсутствуют однонаправленные потоки вынужденного намагничивания, но имеются переменные составляющие утроенной частоты с характерными для каждого из выпрямителей величинами, и это требует корректировки результатов расчетов типовых мощностей (см. табл. 2.2). Соединение первичных обмоток по схеме «треугольник» и качественное исполнение трансформаторов позволяют избавиться от потоков вынужденного намагничивания утроенной частоты.

### 24-пульсовый трехуровневый выпрямитель

Для построения трехуровневого выпрямителя с 24-пульсовым выпрямленным напряжением используются три последовательно включенных выпрямителя, построенных по схеме 8-пульсового выпрямления ортогональных напряжений.

На рис. 2.27, а приведена одна из схем, обеспечивающих получение симметричной кривой выпрямленного напряжения за счет одинаковых на всех уровнях амплитуд пульсаций 8-пульсовых выпрямленных напряжений и сдвига по фазе между ними на 120 эл. град. кривой выпрямленного напряжения на каждом последующем уровне по отношению к предыдущему. На рис. 2.27, б показаны схема 8-пульсового базового выпрямителя и временные диаграммы напряжений вторичных обмоток.

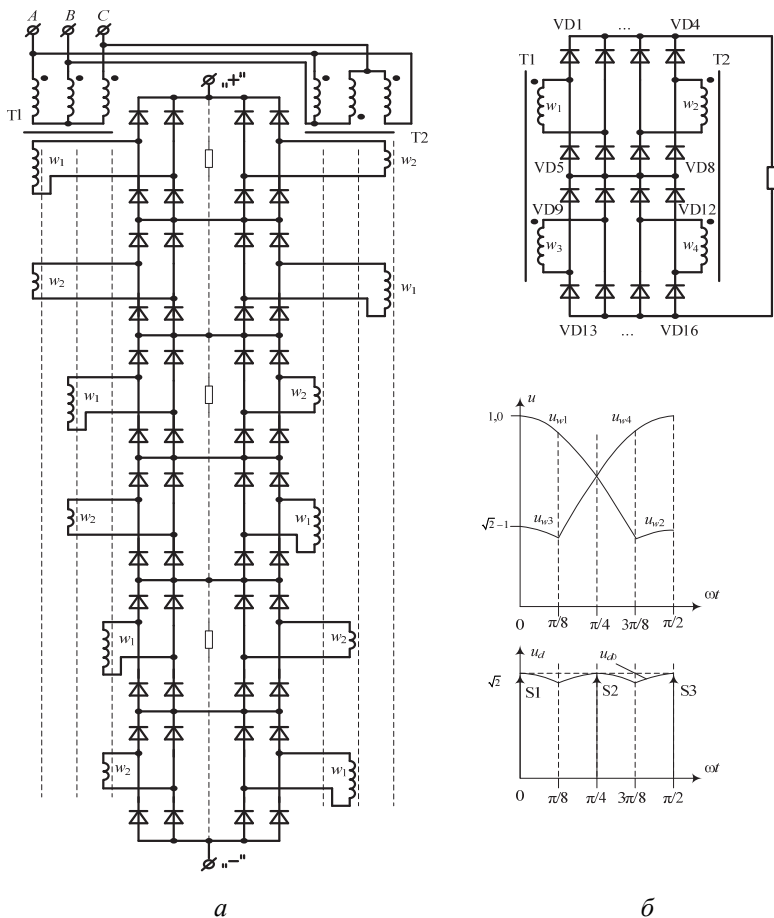


Рис. 2.27. Схема электрических цепей трехуровневого 24-пульсового выпрямителя



Таким образом, применение для питания выпрямителей источников ортогональных напряжений, сформированных на основе трехфазных систем напряжений, позволяет:

- получить схемные решения многоуровневых преобразователей, обладающих новыми свойствами (три уровня выходных напряжений в 12- и 24-пульсовых выпрямителях);
- при равенстве типовых мощностей трансформаторов добиться меньшего расхода меди для изготовления вторичных обмоток.

Предложенная методика определения параметров вторичных обмоток позволяет добиться заметного снижения типовой мощности преобразовательных трансформаторов по сравнению с существующими.

Областью применения выпрямителей с предложенными схемными решениями помимо использования их в системах тягового электропривода являются: системы электроснабжения на постоянном токе с напряжением в контактной сети 3 кВ (с питающей линией постоянного тока 24...36 кВ); вставки постоянного тока; системы передачи электроэнергии на постоянном токе.

При разработке новых преобразовательных агрегатов тяговых подстанций помимо определения схемных решений выпрямительных агрегатов необходимо обеспечить и надежное функционирование полупроводниковых приборов, которое достигается, как известно:

- применением более совершенных по своим параметрам силовых полупроводниковых приборов (СПП);
- выполнением комплекса технических мероприятий по обеспечению эффективной защиты полупроводниковых приборов от перегрузки по току и возможных перенапряжений.

Технические мероприятия по защите СПП от перенапряжений, например в 12-пульсовом выпрямителе последовательного типа, известны и достаточно глубоко проработаны. При переходе на новые схемные решения преобразовательных агрегатов, в частности с кольцевой схемой выпрямления, требуется разработка защиты подобного рода.

Снижение амплитуды перенапряжений в анодных цепях преобразователей, построенных по такой схеме, может осуществляться посредством  $RC$ -цепей, подключаемых, как правило, между выводами вторичных обмоток преобразовательного трансформатора, а также параллельно СПП. Волны перенапряжений, обладающие значительной энергией, снижаются до безопасных уровней разрядниками, установлен-



ными как на ступенях трансформации, так и на шинах постоянного тока. Экспериментальные исследования, проведенные на тяговых подстанциях магистральных дорог, показали, что опасные перенапряжения зачастую обусловлены спецификой работы защиты в различных режимах. Так, в исследованиях ОмИИТ (ОмГУПС) отмечено, что при попадании волны перенапряжения на первичную обмотку преобразовательного трансформатора ТРДП-12500 разрядник РВП-10, установленный на шинах 10 кВ, срабатывал, но амплитуда перенапряжения, наведенного во вторичных обмотках, достигала 8 кВ из-за высокого уровня остающегося напряжения разрядника. Для защиты вентилях плеч (суммарное напряжение лавинообразования  $U_{\text{л}} = 4,95$  кВ) применялись разрядники РВКУ-1,65 с напряжением уставки  $U_{\text{уст}} = 2,9$  кВ. Отмечено, что такие разрядники нечувствительны к коротким импульсам перенапряжения, которые могут привести к пробоем СПП.

Достаточно эффективно снижают амплитуду таких импульсов быстродействующие ограничители перенапряжений (ОП) различного типа: кремниевые и селеновые стабилитроны, диодные лавинные столбы и другие несимметричные ОП, обладающие стабилитронным эффектом, например сами лавинные вентили, образующие схему выпрямления. Широко применяются симметричные ограничители напряжения, например, кремниевые ограничители или металлооксидные варисторы. Для выпрямительных агрегатов тяговых подстанций применяют ограничители атмосферных и коммутационных напряжений ОПН-1,5 УХЛ1 со встроенным варистором.

Не рассматривая общеизвестных схем индивидуальной защиты СПП (вентильных плеч), приведем некоторые из схем защиты групп вентилях в мостовых выпрямителях (рис. 2.28). Схемы включения, например лавинных ОП (рис. 2.28, *а*, *б*, *д*), известны практически с первых шагов применения полупроводниковых приборов в преобразовательной технике. Включение «звезды» из ОП по схеме на рис. 2.28, *б* ограничивает межфазные перенапряжения на вторичных обмотках, а при включении ОП (разрядников) по схеме на рис. 2.28, *в* (выпрямитель ПВЭ-5АУ1) обеспечивается индивидуальная защита для вентильных плеч. В выпрямителе ТПДЕ-Ж-3, 15к-3, 3к-УХЛ4 (рис. 2.28, *г*) симметричные ОП (ОПН-1,5 УХЛ1) включены в цепи переменного тока по схеме «треугольника». Здесь ОПН – ограничитель перенапряжения нелинейный.

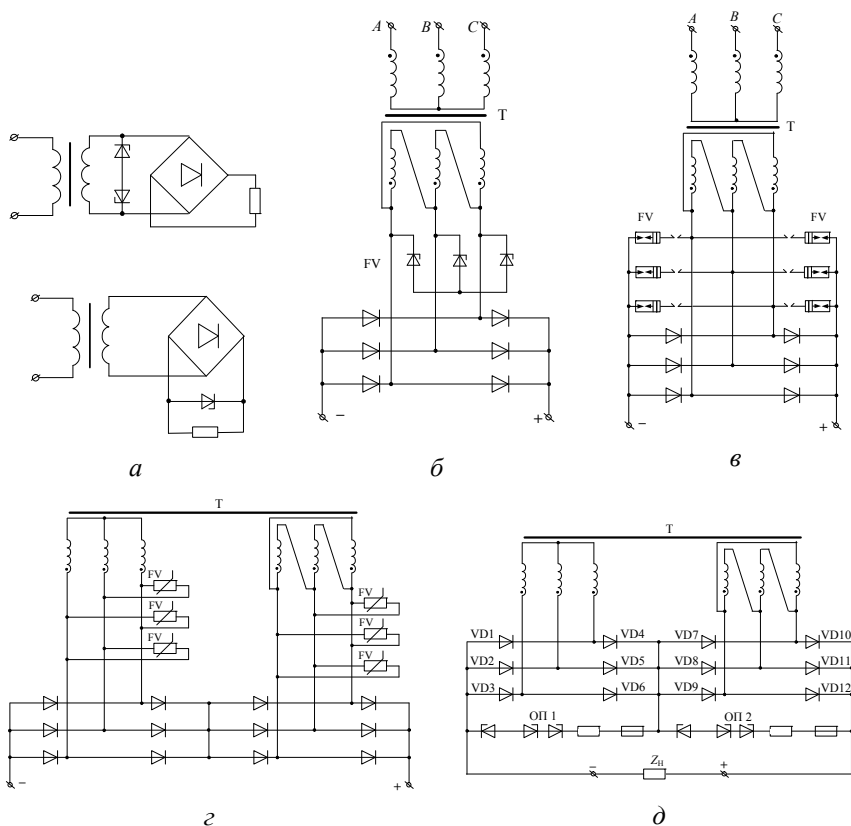


Рис. 2.28. Схемы включения защитных приборов

Схема с подключением лавинных диодов (ВЛ-200) параллельно выходам преобразовательных секций (рис. 2.28, д) используется для защиты выпрямителя тяговой подстанции «Заельцовская» Новосибирского метрополитена. Появление импульса перенапряжения на вторичных обмотках понижающего трансформатора приводит к срабатыванию ОП (переходу в проводящее состояние) и кратковременному (на период длительности перенапряжения) шунтированию цепи нагрузки. Нерегулярность возникновения перенапряжений, небольшая их длительность и относительно малая мощность не требуют дополнительного усиления защиты вентилей по току. Это подтверждается и



экспериментальными исследованиями выпрямителя ТПЕД-3150, цепи которого шестикратно подвергались опытам искусственного короткого замыкания, когда значение ударного тока достигало 30 кА. Характеристики диодов при этом не претерпели изменений. Преимуществом ОП на лавинных диодах перед серийными вентильными разрядниками, как было отмечено омскими исследователями, является высокое быстродействие, определяемое временем процесса лавинообразования, а также же значительно меньшая величина остающегося перенапряжения.

Недостаток преобразователей с кольцевой схемой выпрямления – определенная сложность выполнения групповой защиты вентилях от перенапряжений. Путь к решению этой задачи покажем на примере преобразователя  $m$ -фазного напряжения в постоянное, в котором при  $m = 3$  и  $p$ -кратной частоте пульсации выпрямленного напряжения содержится  $p/6$  трехфазных источников питания, одноименные (фазные) напряжения которых сдвинуты относительно друг друга на угол  $\Delta \frac{2\pi}{p}$  эл. град., а выпрямление обеспечивают  $n = \left( \frac{p}{6} + 1 \right)$  последова-

тельно соединенных вентильных групп. Каждая вентильная группа (в том числе анодная и катодная) включает  $m^2 = 9$  вентилях, соединенных в  $2m = 6$  «звезд» с циклическим соединением лучей (рис. 2.29).

Преобразователь, выполненный по такой схеме, обладает одним замечательным свойством – он не критичен к порядку подключения фазных выводов питающих обмоток к точкам соединения смежных групп вентилях. Это обеспечивается избыточностью вентилях в группах, связывающих смежные системы питания. Нетрудно убедиться, что каждая группа имеет  $k = 3! = 6$  контуров из шести вентилях, образующих шестивентильные кольца (на рис. 2.29, а в качестве примера показаны два контура). Некритичность выпрямителя к варианту схемы подключения питающих обмоток обеспечена многоконтурностью построения вентильных групп. Вместе с тем три вентилях из девяти при любом варианте подключения в работе преобразователя не участвуют, так как их  $p$ - $n$ -переходы имеют отрицательное смещение в течение всего периода времени приложения сетевого напряжения (на рис. 2.30 показаны векторы напряжения для одного из таких вентилях, а сам он заменен на ОП1). Практически только параллельное соединение вентилях в первой и последней группе в трехлучевую (трехплечевую) вентильную «звезду» обеспечивает увеличение коэффициента запаса по току и тем

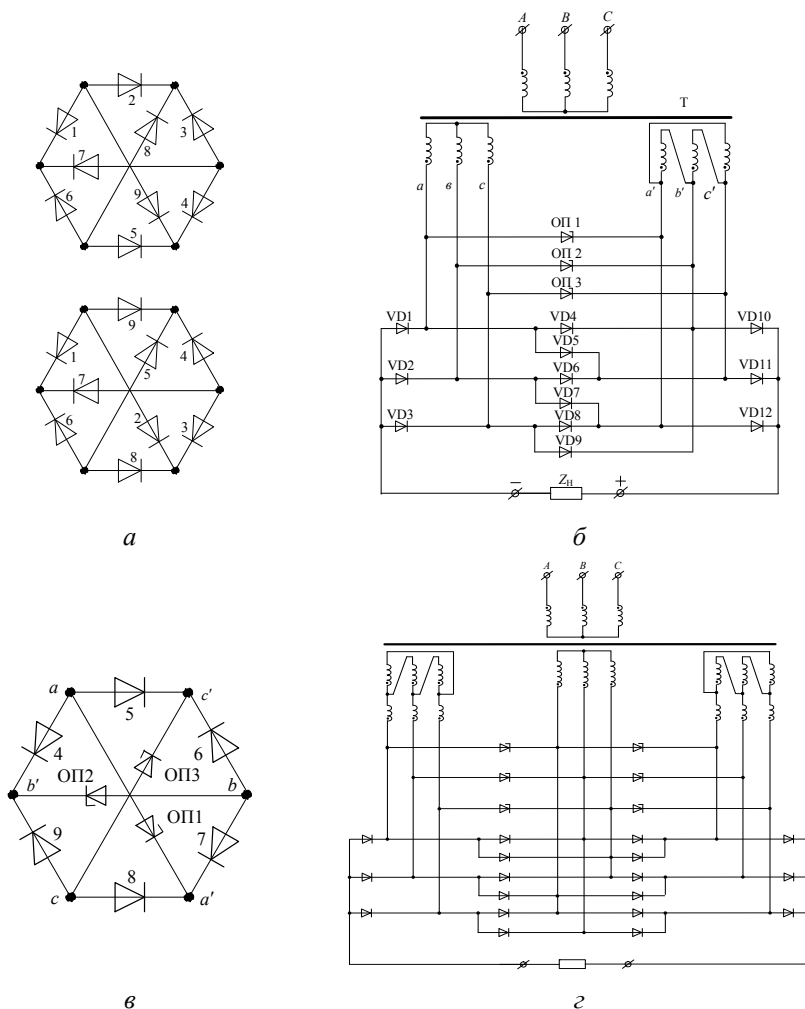


Рис. 2.29. Схемы выпрямления с ограничителем перенапряжения

самым – повышение надежности. Вместе с тем при построении любых симметричных трехфазных систем питания и любом порядке чередования фаз обмоток трансформатора подключение их к узловым точкам вентильных групп приводит к образованию рабочих шестивентильных колец с автоматическим удалением из каждой девятивентильной груп-



пы трех вентилях. Так, например, при формировании системы с нарастающим (убывающим) углом сдвига по фазе между одноименными фазными обмотками различных источников необходимо пользоваться следующим правилом присоединения: каждая фаза любого трехфазного источника напряжений должна подключаться к общей точке одноименных электродов двух вентилях кольца (колец), вторые электроды которых соединяются с двумя фазами смежного источника, имеющими

сдвиг по фазе  $\Delta\varphi = \pm \left[ \left( \frac{p-2}{p} \right) \pi \pm \frac{\pi}{3} \right]$  эл. град. относительно фазы пер-

вого источника. При этом оказывается возможным включение в каждую свободную большую диагональ шестивентильных колец устройства защиты от перенапряжений (рис. 2.29, в).

На рис. 2.29, б в качестве примера показана принципиальная электрическая схема цепей преобразователя с 12-кратной частотой пульсации выпрямленного напряжения, оснащенная устройствами защиты. Преобразователь содержит трехфазный трансформатор с вторичными обмотками, соединенными по схемам «звезды» и «треугольника», двенадцать вентилях и три устройства защиты (УЗ), представленных на схеме в виде стабилитронов. Диоды VD4–VD9 образуют шестивентильное кольцо с тремя входами, к которым подключены диоды VD1–VD3 анодной «звезды», и тремя выходами, к которым подключены диоды VD10–VD12 катодной «звезды».

Общие точки вентильных «звезд» образуют выходные выводы преобразователя, к которым подключена нагрузка. Устройства защиты ОП1–ОП3 включены в диагонали вентильного кольца, и каждое из них соединяет одноименные фазные выводы вторичных обмоток.

Принцип работы устройства иллюстрируется векторными диаграммами напряжений, представленными в виде амплитудно-фазовых портретов напряжений вторичных фазных обмоток, образующих две симметричные трехфазные системы напряжений, сдвинутые в фазовой плоскости на 30 эл. град. (рис. 2.30).

Представленные на рис. 2.30, а–е диаграммы исчерпывают все возможные комбинации соединения вторичных обмоток трансформатора в процессе одного цикла преобразования, состоящего из шести фаз. Из диаграмм видно, каким образом формируется вектор кривой напряжения, действующего в одной из диагоналей вентильного кольца

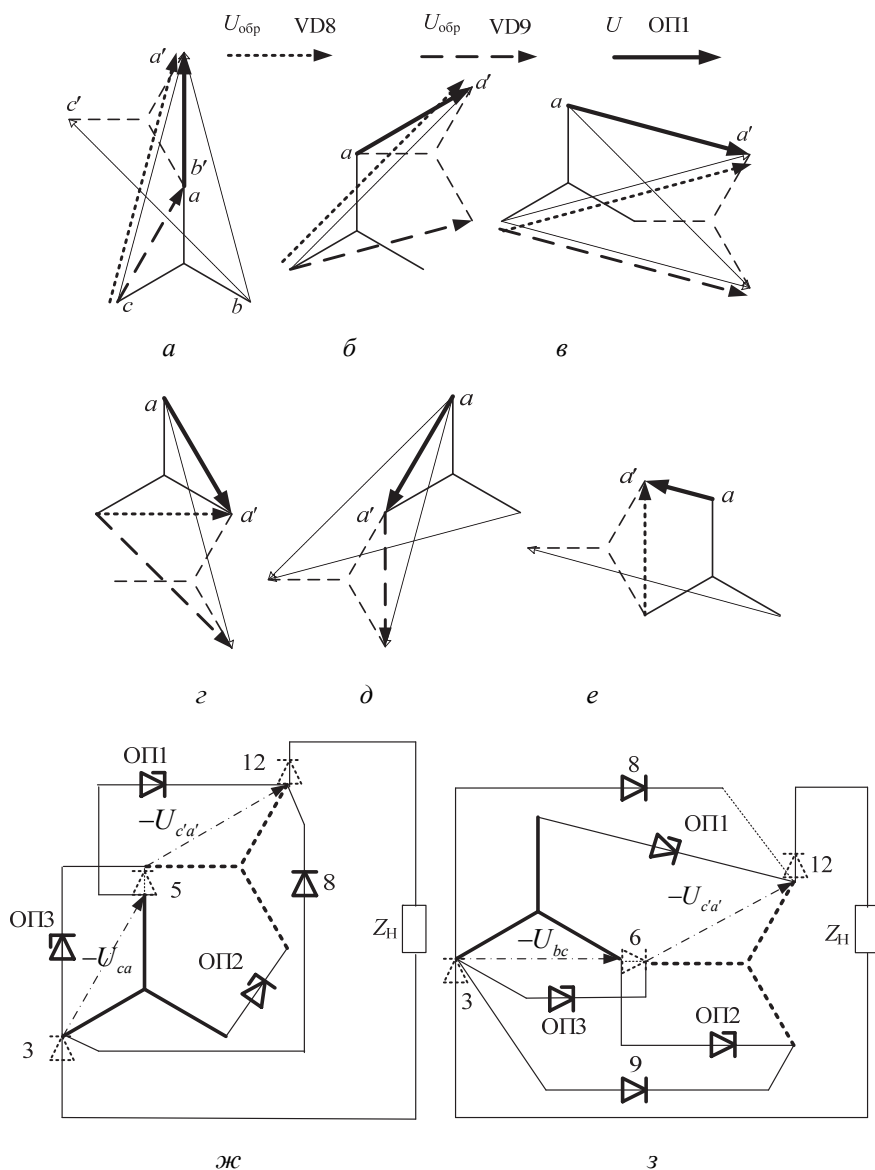


Рис. 2.30. Векторные диаграммы напряжений вторичных фазных обмоток



(в частности между точками  $a-a'$ ). Из диаграмм также видно, что в диагоналях моста формируются однополярные переменные напряжения ( $U_{оп}$ ), имеющие то же направление, что и векторы обратных напряжений на диодах VD8 и VD9. Максимальное мгновенное значение рабочего напряжения в диагонали меньше максимального значения рабочего обратного напряжения на вентилях кольца и больше максимального мгновенного значения рабочего обратного напряжения вентилях анодной и катодной групп. Соотношения между уровнями обратных напряжений для идеального преобразователя продемонстрированы на рис. 2.31, *а* временными диаграммами обратных напряжений на вентилях различных групп и диаграммой напряжения в одной из диагоналей кольца.

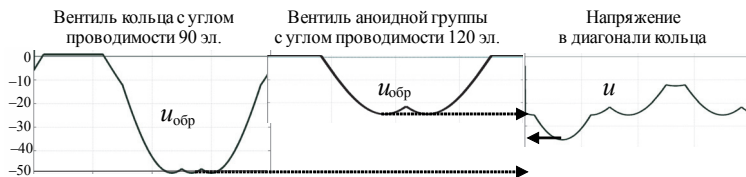
По результатам исследований ОмИИТом отмечено, что трансформация перенапряжения с сетевой на вентильные обмотки пропорциональна коэффициенту трансформации. Поэтому при перенапряжениях соотношения между рассматриваемыми напряжениями практически сохраняются. Это позволяет для гашения энергии перенапряжения включать ОП в диагональ кольца с уставкой срабатывания, равной максимальному мгновенному значению рабочего напряжения в диагонали или несколько большей его, ограничивая тем самым перенапряжения как на вентиле кольца, так и на вентилях анодной и катодной групп.

На рис. 2.30, *ж* и *з* показаны две из шести возможных схем соединения вторичных обмоток трансформатора с цепями, содержащими ограничители перенапряжения, соответствующие двум смежным фазам преобразования.

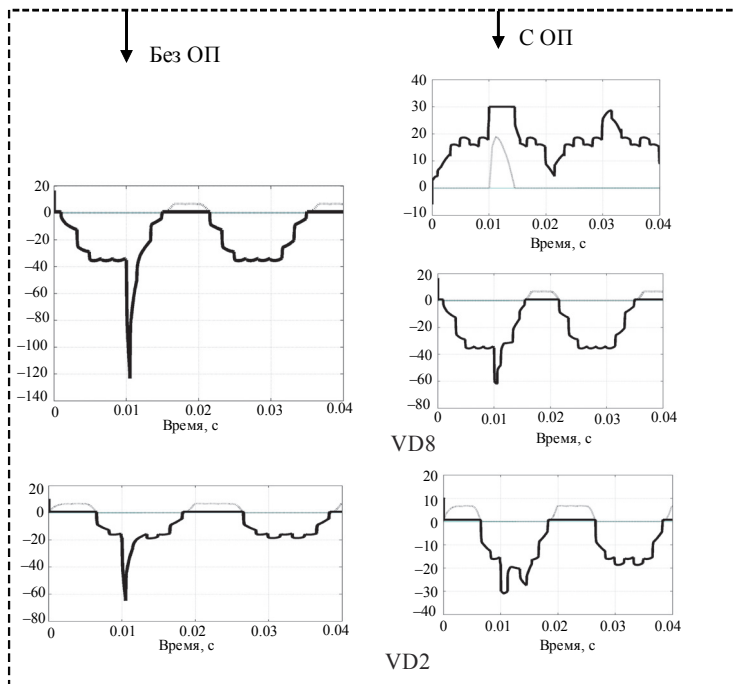
Кроме ограничителей, на приведенных схемах изображены только диоды, проводящие ток, и те, к которым на данных фазах преобразования прикладываются максимальные обратные напряжения.

Наличие электромагнитной связи обмоток способствует ограничению перенапряжений на всем преобразователе в целом. Работа ОП облегчается еще и тем, что его рабочее напряжение меньше напряжений на вентилях кольца (нежелательный подогрев, например, лавинных вентилях происходит именно в рабочем режиме за счет обратных токов).

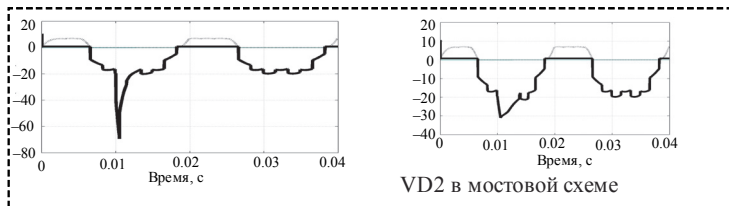
Схемные решения УЗ достаточно разнообразны, и выбор того или иного варианта обусловлен энергетическими характеристиками питающей сети и преобразователя, ожидаемым уровнем перенапряжений и их энергией. Для примера на рис. 2.31, *а* приведены результаты схемотехнического моделирования работы преобразователя небольшой мощности с УЗ в сети 220 В.



а



б



в

Рис. 2.31. Диаграммы перенапряжений на вентильях



Перенапряжения в первичных обмотках таких преобразователей могут достигать четырех-, пятикратного уровня амплитуды рабочего напряжения, что учтено при моделировании. Диаграммы токов и обратных напряжений на диодах приведены для случаев воздействия перенапряжения на преобразователь без ОП и с ОП. Сам ОП выполнен на базе лавинного диода.

Для сравнения при тех же параметрах сети и преобразователя и при том же уровне перенапряжения выполнено моделирование работы ОП в составе мостовой схемы выпрямления последовательного типа (см. рис. 2.28, *з*). При анализе диаграмм рис. 2.31, *б* и 2.31, *в* выяснилось, что эффективность ограничения перенапряжений в предлагаемом преобразователе с УЗ не уступает эффективности ограничения перенапряжений в известной схеме.

В мощных преобразователях, работающих в сетях высокого напряжения, перенапряжения обычно не превышают трехкратного уровня. Результаты моделирования работы такого преобразователя, в УЗ которого применены модели металлооксидных варисторов, показаны на диаграммах рис. 2.32.

Схема преобразователя с УЗ, имеющего 18-кратную частоту пульсации выпрямленного напряжения, показанная на рис. 2.29, *з*, и схемы преобразователей с большей фазностью преобразования, существенных отличий в принципе действия устройств защиты от перенапряжений не имеют. Однако изменяются соотношения между максимальными значениями рабочих обратных напряжений вентилей анодной (катодной) группы и вентилей колец. Поэтому уставка параметров защиты производится с учетом общих для  $p$ -фазных преобразователей соотношений, справедливых для идеализированного преобразователя.

Для диодов анодных и катодных групп, как и в мостовых выпрямителях, максимальное значение рабочего обратного напряжения равно  $U_{\text{обр max}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{Л}}$ . Для диодов колец оно определяется выражением

$$U_{\text{обр max}}(p) = 2\sqrt{2} \cdot U_{\text{Л}} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{p}\right),$$

где  $U_{\text{Л}}$  — действующее значение линейного напряжения симметричной трехфазной системы напряжений вторичных обмоток трансформатора.

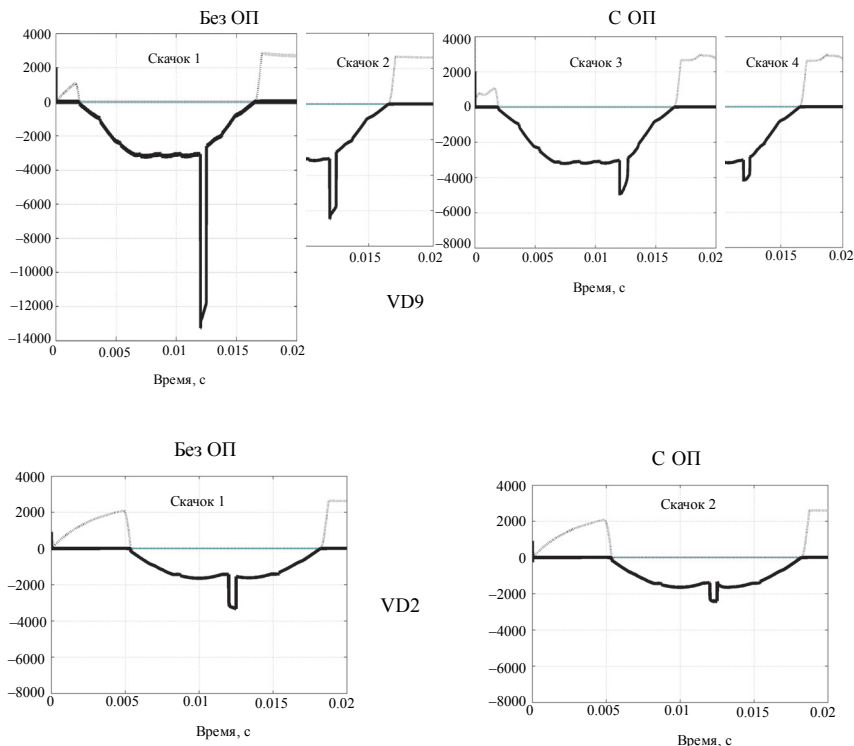


Рис. 2.32. Диаграммы перенапряжений в схеме модели с металлооксидными варисторами

Таким образом, вентили анодной и катодной групп находятся под воздействием линейных напряжений питающих систем, а к вентилям кольцевых групп приложены более высокие напряжения, абсолютная и относительная (по отношению к другим группам) величина которых снижается при увеличении фазности преобразователя. Уставка ОП должна выбираться равной величине (или несколько большей ее) максимального мгновенного значения рабочего напряжения в диагонали кольца, которое определяется по формуле

$$U_{\text{ОП}}(p) \geq 2\sqrt{2} \cdot U_{\text{Л}} \cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{p}\right).$$



При использовании в УЗ преобразователя кремниевых стабилизаторов, столбов на лавинных диодах или других несимметричных ОП, обладающих стабилитронным эффектом, например лавинных диодов, электроды последних соединены (связаны) с одноименными электродами диодов кольца. Включение симметричных ограничителей напряжения, например кремниевых симметричных ограничителей или металлооксидных варисторов, не требует соблюдения полярности подключения ограничительного прибора.

### 2.3. ВЫБОР СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

В настоящее время имеется несколько вариантов схемных решений для подключения тяговой сети к источнику питания, в качестве которого используются тяговые подстанции постоянного тока. Первичные обмотки трансформаторов этих подстанций получают питание от трехфазной сети переменного тока напряжением 6, 10 кВ. Применяются схемы одностороннего, двустороннего и узлового питания [1].

Для повышения надежности электроснабжения подвижного состава тяговая сеть, как известно, разбивается на изолированные друг от друга участки, питание каждого из которых осуществляется по одной из перечисленных выше схем. Не останавливаясь на достоинствах и недостатках каждого из вариантов подключения, отметим только, что в пределах одного из схемных решений существует оптимальный вариант секционирования (разбиения на участки) тяговой сети, при котором потери энергии на отрезке тяговая подстанция–токоприемник минимальны. В качестве примера приведем такой факт: проведенные в ряде городов сибирского региона обследования тяговых сетей показывают, что длина секционированного участка без учета узловых пунктов составляет для трамвайных линий 1300...2000 м, для троллейбусных – 1000...1700 м, но ни одна величина участка не обоснована аналитическими расчетами.



### 2.3.1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Обеспечение бесперебойного питания наземного городского электрического транспорта (ГЭТ), несмотря на огромный накопленный в этом вопросе опыт, представляет собой одну из наиболее сложных и актуальнейших проблем системы электроснабжения (СЭС) подвижного состава, решение которой далеко от завершения [13–18]. Немаловажное значение в этой проблеме отводится повышению надежности питания точек пересечения контактных сетей различных видов транспорта (трамвая и троллейбуса). Как известно, питание обеих сетей осуществляется от одних и тех же тяговых подстанций, но по различным питающим линиям, объединение которых недопустимо. Узел пересечения в этом случае представляет собой совокупность четырех секций (С1–С4), разделенных между собой секционными разделами (СР), каждая из которых подключена к своей питающей линии через соответствующий фидер (Ф1–Ф4); питающие линии отрицательного потенциала присоединены к рельсовой сети и минусовому контактному проводу посредством фидеров 01–04 (рис. 2.33).

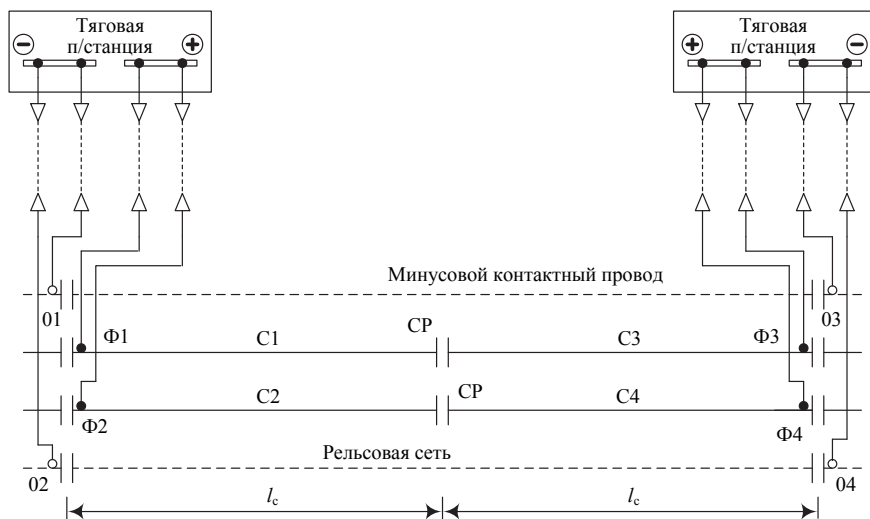


Рис. 2.33. Узел пересечения контактных сетей трамвая и троллейбуса



Исчезновение питающего напряжения на любом из фидеров приводит к остановке подвижного состава на обесточенной секции при исправной контактной сети. Однако этого можно избежать несложным схемным решением – применением автоматических постов секционирования (АПС), выполненных на силовых полупроводниковых приборах. Кроме того, как будет показано ниже, применение АПС способствует реализации оптимальной в плане минимизации потерь энергии схемы электроснабжения. Использование АПС как бездугового коммутатора для переключений в СЭС узла позволяет реализовывать несколько вариантов схем, показанных на рис. 2.34.

Каждый из вариантов обладает достоинствами и недостатками, но сопоставление их, на наш взгляд, целесообразно проводить с учетом получения минимума потерь энергии в узле при транспортировке ее до потребителя.

Отличительной особенностью электроснабжения подвижного состава, как известно, являются непостоянство величины сопротивления питающих транспортное средство контактных и кабельных линий СЭС вследствие изменения его координаты и нелинейность зависимости потребляемого тока в функции скорости. Если при этом учесть, что момент начала потребления поездом тока из секции также не зависит от его местоположения (носит вероятностный характер), то становится понятной сложность определения потерь в любой из схем и установления приоритетности их применения.

Для снятия неопределенности при расчете потерь энергии предлагается **метод эквивалентирования** величины сопротивления участка секционирования в функции его длины [19, 20]. Суть метода заключается в замещении меняющегося сопротивления секции на эквивалентное постоянное, потери в котором определяются величиной протекающего в секции приведенного к ее длине действующего тока. Полагая при этом, что длины секций во всех вариантах схем и потребляемые поездами токи одинаковы, получаем относительно простой способ сравнения.

Рассмотрим последовательность определения величины эквивалентного сопротивления секции для варианта *a* схемы рис. 2.34. Расчетная и принципиальная электрическая схемы варианта показаны на рис. 2.35.

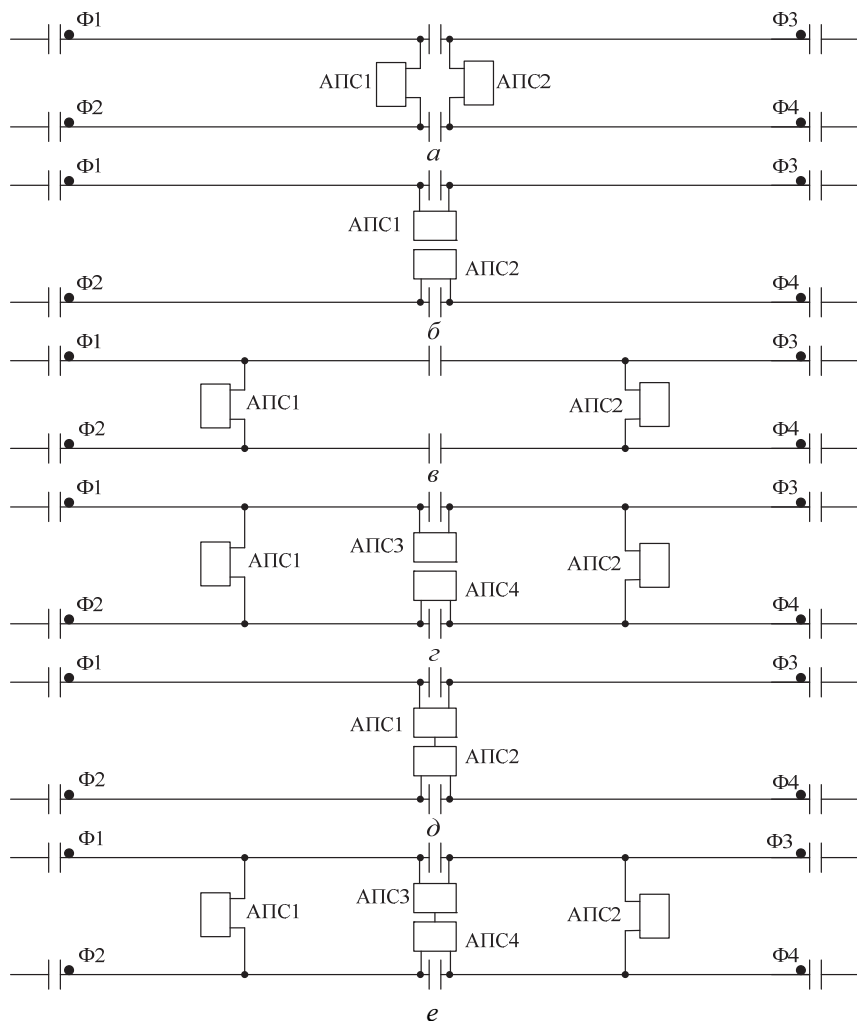


Рис. 2.34. Варианты схем электроснабжения с автоматическими постами секционирования

Подключение секций осуществляется по схеме двустороннего питания от одной тяговой подстанции. Текущее значение величины сопротивления секции в функции ее длины для подвижного состава трамвая определяется выражением



$$R_{\Sigma_x} = \left[ r_{\text{КС}} \left( 1 - \frac{x}{2l} \right) + r_p \right] x,$$

где  $r_{\text{КС}}$  – удельное сопротивление контактной сети;

$r_p$  – удельное сопротивление рельсовой сети;

$x$  – текущая координата поезда (расстояние от фидера до поезда);

$l$  – длина секции.

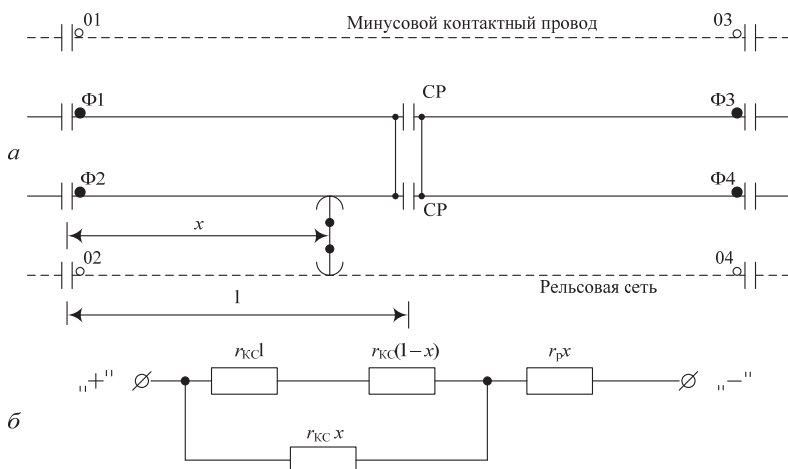


Рис. 2.35. Расчетная и принципиальная электрические схемы

Величина эквивалентного сопротивления секции

$$R_{\Sigma_0} = \frac{1}{l} \int_0^l R_{\Sigma_x} dx = \frac{1}{l} \int_0^l \left[ r_{\text{КС}} \left( 1 - \frac{x}{2l} \right) + r_p \right] x dx = l \left( \frac{r_{\text{КС}}}{3} + \frac{r_p}{2} \right).$$

Поскольку в реальных СЭС величина  $r_{\text{КС}} \gg r_p$ , для трамвая можно принять  $r_p = 0$  и тогда  $R_{\Sigma_0} = \frac{1}{3} r_{\text{КС}} l$ . Для троллейбуса, в СЭС которого  $r_{\text{КС}} = r_p$ , величина эквивалентного сопротивления секции  $R_{\Sigma_0} = \frac{5}{6} r_{\text{КС}} l$ .

При использовании традиционной (односторонней) схемы питания для трамвая и троллейбуса эквивалентные сопротивления соответ-



ственно  $R_{\Sigma} = \frac{1}{2}r_{\text{КС}}l$  и  $R_{\Sigma} = r_{\text{КС}}l$ . Если при этом учесть, что переход на схему двустороннего питания повышает вероятность его бесперебойности для обеих секций при исчезновении напряжения на одном из фидеров, то становится понятным, что такая схема предпочтительнее существующих.

Проведенные исследования по остальным схемам (б–е) рис. 2.34 дали следующие результаты.

- Схема б (аналогична схеме а с той лишь разницей, что двустороннее питание осуществляется не от одной, а от двух тяговых подстанций):

- для подвижного состава трамвая  $R_{\Sigma} = \frac{1}{3}r_{\text{КС}}l$ ;

- для подвижного состава троллейбуса  $R_{\Sigma} = \frac{2}{3}r_{\text{КС}}l$ .

- Схема в (АПС соединяют середины секций контактных сетей трамвая и троллейбуса, питающихся от одной тяговой подстанции):

- для подвижного состава трамвая  $R_{\Sigma} = \frac{1}{3}r_{\text{КС}}l$ ;

- для подвижного состава троллейбуса  $R_{\Sigma} = \frac{5}{6}r_{\text{КС}}l$ .

- Схема г (АПС соединяют середины секций контактных сетей трамвая и троллейбуса, питающихся от одной тяговой подстанции, и шунтируют секционные разделы):

- для подвижного состава трамвая  $R_{\Sigma} = \frac{11}{48}r_{\text{КС}}l$ ;

- для подвижного состава троллейбуса  $R_{\Sigma} = \frac{27}{48}r_{\text{КС}}l$ .

- Схема д (АПС шунтируют секционные разделы и посредством перемычки объединяют все секции):

- для подвижного состава трамвая  $R_{\Sigma} = \frac{1}{4}r_{\text{КС}}l$ ;

- для подвижного состава троллейбуса  $R_{\Sigma} = \frac{7}{12}r_{\text{КС}}l$ .



• Схема *е* (АПС соединяют середины секций контактных сетей трамвая и троллейбуса, питающихся от одной тяговой подстанции, шунтируют секционные разделы и посредством перемычки объединяют все секции):

– для подвижного состава трамвая  $R_{\text{з0}} = \frac{5}{24} r_{\text{КС}} l$ ;

– для подвижного состава троллейбуса  $R_{\text{з0}} = \frac{13}{24} r_{\text{КС}} l$ .

Установка АПС1 и АПС2 по серединам секций в схемах *в*, *г* и *е* обусловлена стремлением достигнуть минимального значения приведенного эквивалентного сопротивления контактного провода.

Результаты расчетов, приведенные в абсолютных и относительных единицах с указанием процента экономии электроэнергии по отношению к существующей схеме одностороннего питания ( $R_{\text{с}} = r_{\text{КС}} l$ ) и ( $R_{\text{з}}^* = r_{\text{КС}} l / 2$ , либо  $r_{\text{КС}} l$ ), сведены в табл. 2.4.

Т а б л и ц а 2.4

| Тип соединения секций                         | Вид питания    | Величина $R_{\text{з}} / R_{\text{с}}$ |            | $\frac{R_{\text{з}}^* - R_{\text{з}}}{R_{\text{з}}^*} 100 \%$ |            |
|-----------------------------------------------|----------------|----------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------|------------|
|                                               |                | трамвай                                | троллейбус | трамвай                                                       | троллейбус |
| Раздельное питание секций (от своих ТП)       | одностороннее  | 1/2                                    | 1          | 0                                                             | 0          |
|                                               | двустороннее   | 1/3                                    | 2/3        | 33,4                                                          | 33,4       |
|                                               | схема <i>а</i> | 1/3                                    | 5/6        | 33,4                                                          | 16,7       |
|                                               | схема <i>в</i> | 1/3                                    | 5/6        | 33,4                                                          | 16,7       |
| Общее питание секций (параллельная работа ТП) | схема <i>б</i> | 1/3                                    | 2/3        | 33,4                                                          | 33,4       |
|                                               | схема <i>д</i> | 1/4                                    | 7/12       | 50                                                            | 41,7       |
|                                               | схема <i>г</i> | 11/48                                  | 27/48      | 54,2                                                          | 43,7       |
|                                               | схема <i>е</i> | 5/24                                   | 13/24      | 58,3                                                          | 45,8       |

При анализе результатов расчетов, приведенных в табл. 2.4, выясняется, что наихудшей как по критерию обеспечения минимума технологических потерь энергии, так и по бесперебойности питания является схема одностороннего питания. Схема *б* экономичнее схем *а* и *в* и при равных со схемой двустороннего питания энергетических показателях не требует в отличие от последней прокладки кабеля второй



питающей линии, длина которой равна длине секции. Кроме того, схема *б* предпочтительнее, так как обеспечивает работоспособность всех секций при выходе из строя одной из подстанций.

Сравнение характеристик схем *е* и *д*, в которых АПС соединены уравнильной шиной, показывает, что практически удвоение комплекта оборудования (в схеме *е*) приводит к незначительному (на 4 %) уменьшению потерь энергии и поэтому вряд ли целесообразно.

Предложенный метод эквивалентных сопротивлений позволяет дать оценку любой тяговой сети по критерию минимума потерь энергии, а при реализации питания параллельно идущих тяговых сетей трамвая и троллейбуса с помощью этого метода можно убедиться в целесообразности использования схемы шунтирования секционных разделов АПС, соединенных уравнильной шиной.

Поиски путей снижения потерь энергии в системе электроснабжения как одной из составных частей электрического транспорта были и остаются на сегодняшний день главной задачей повышения эффективности и рентабельности его работы.

Понижение уровня питающего напряжения на токоприемнике подвижного состава из-за потерь в системе электроснабжения помимо явно выраженного нерационального использования электрической энергии имеет еще и скрытый, но не менее значимый фактор, снижающий конкурентоспособность электрического транспорта, который проявляется в ухудшении динамических показателей транспортных средств. Действительно, так как скорость вращения вала якоря тягового двигателя имеет прямо пропорциональную зависимость от величины питающего мотор напряжения, а величина крутящего момента на ободе колеса имеет квадратичную зависимость от него, то

$$v = \frac{U_{\text{КС}} - I_{\text{дв}} r_{\text{дв}}}{c_e \Phi}$$

и

$$M = c_m \Phi I_{\text{дв}} = c_m k I_{\text{дв}}^2 = \frac{c_m k}{r_{\text{дв}}} (U_{\text{КС}}^2 - c_e \Phi v),$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности между потоком и током мотора.



Ухудшение динамических показателей подвижного состава влечет за собой увеличение затрат времени на поездку пассажиров и снижение пропускной способности транспортных магистралей. Проведенные тягово-энергетические расчеты влияния снижения уровня питающего напряжения на расход энергии выявили следующее: движение однокузовного подвижного состава трамвая на стандартном перегоне при напряжении на контактном проводе  $U_{\text{КС}} = 550$  В позволяет развить ходовую скорость  $v_{\text{max}} = 33,5$  км/ч с удельным расходом электроэнергии на движение  $A_{\text{уд}} = 86,5$  Вт · ч/т · км. При минимальном напряжении в сети ходовая скорость снижается до  $v_{\text{min}} = 32,5$  км/ч, удельный же расход энергии на движение возрастает до 94 Вт · ч/т · км. Аналогичные расчеты, проведенные для пятивагонного поезда метрополитена на стандартном перегоне, показали, что поддерживать одинаковую ходовую скорость как при номинальном, так и при минимальном напряжении на контактном рельсе невозможно: при номинальном напряжении удастся развить скорость  $v_{\text{max}} = 52,5$  км/ч, а при минимальном – лишь  $v_{\text{min}} = 46,5$  км/ч. Увеличивается и удельный расход энергии: с 83,5 Вт · ч/т · км (при  $U_{\text{КС}} = 550$  В и  $v = 52,5$  км/ч) он возрастает до 85,6 Вт · ч/т · км. Для сравнения укажем, что при напряжении 750 В и ходовой скорости 46,5 км/ч удельный расход энергии такого же поезда составляет лишь 69,5 Вт · ч/т · км. Для троллейбуса, в контактной сети которого просадка питающего напряжения меньше, чем в сети трамвая, удельный расход энергии и ходовая скорость изменяются незначительно, однако более длительное потребление тока из сети приводит к изменению режима работы электрооборудования. Кривые, поясняющие сказанное, приведены на рис. 2.36.

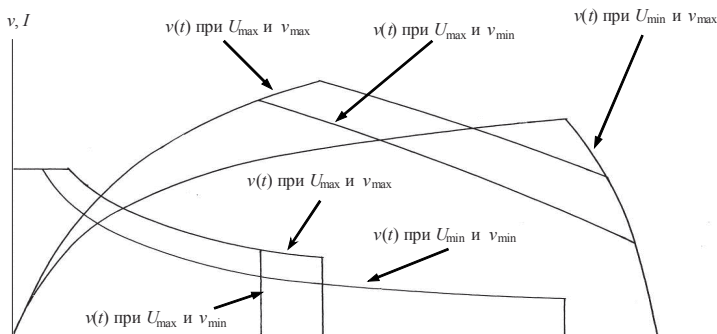


Рис. 2.36. Кривые движения и потребляемого тока



Из приведенных кривых видно, что достижение максимально возможной ходовой скорости на перегоне при пониженном напряжении питания с целью соблюдения графика движения существенно изменяет сам характер движения: из кривой исчезает выбег, назначение которого – предоставить поезду время на нагон при возникновении задержек по непредвиденным обстоятельствам.

Если при этом учесть, что дополнительное потребление энергии поездом сопровождается и дополнительными потерями ее в системе электроснабжения, то становится понятной причина низкого уровня КПД электрической тяги в целом при достаточно высоком КПД (примерно 86...92 %) преобразования электрической энергии в механическую в тяговом электрическом двигателе.

Длина секционированного участка (далее секции) зависит от целого ряда факторов, таких как трассировка маршрутов транспортной сети, архитектурно-градостроительные особенности города, рельеф местности и др. Вместе с тем для районов города, не имеющих перечисленных выше особенностей, можно определить оптимальные с позиций минимума потерь энергии в системе электроснабжения схемы подключения питающих линий [14, 20].

Рассмотрим, каким образом решается поставленная задача на примере наземного городского электрического транспорта – трамвая и троллейбуса. Принципиальная схема электрических цепей СЭС, содержащая две тяговые подстанции, соединенные с секциями контактной сети (с секционным разделом СР) посредством питающих линий ПЛ«+» положительного потенциала через фидеры  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  и с рельсовой сетью посредством питающих линий ПЛ«-» отрицательного потенциала через фидеры 01 и 02, с подключением по схеме одностороннего питания, показана на рис. 2.37. Расстояние  $l$  (межподстанционная зона) между фидерами  $\Phi 1$  и  $\Phi 2$  поделено секционным разделом СР на два участка  $l_1$  и  $l_2$ , запитанных соответственно от своих фидеров.

В целях повышения информативности схемы за счет исключения из нее второстепенных по значимости элементов ее можно изображать в соответствии с принятой в специальной литературе символикой в виде, представленном на рис. 2.38.

Потери энергии в секции в случае представления движения поездов как простейшего потока событий могут быть определены в соответствии с [21] через мощность потерь



$$\Delta P = \frac{I_0^1 n_0^1 r l^3}{12} \left( 1 + \frac{z_{cx} k_3^2}{n_0^1 l} \right), \quad (2.12)$$

где  $I_0$  – средний ток поезда;

$n_0^1$  – средняя плотность поездов на участке;

$r$  – активное сопротивление секции;

$l$  – расстояние между фидерами;

$k_3$  – коэффициент среднеквадратичного тока поезда;

$z_{cx}$  – коэффициент, зависящий от схемы питания секции ( $z_{cx} = 3$  при одностороннем и  $z_{cx} = 2$  – при двустороннем питании секции).

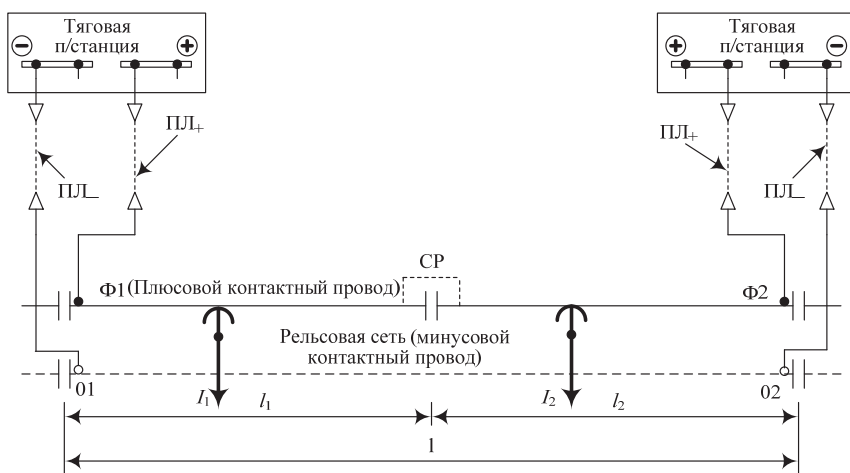


Рис. 2.37. Схема одностороннего питания

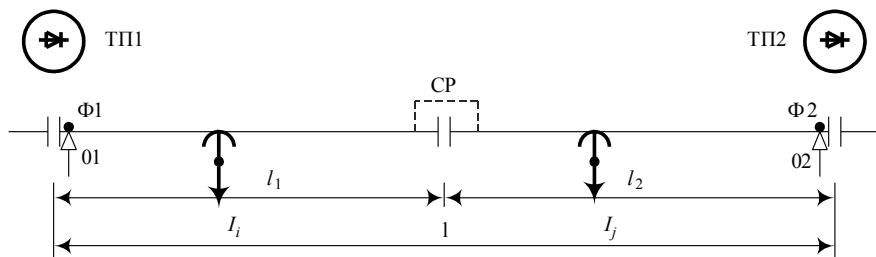


Рис. 2.38. Упрощенная схема одностороннего питания



Из формулы (2.12) следует, что на потери энергии в секции существенно влияют: длина секции  $l$ , параметр  $r$  и схема подключения. Согласно статистическим данным потери энергии в рационально спроектированной тяговой сети не превышают 5...7 % от расходуемой на нужды тяги. В реальных схемах потери энергии достигают 10...12 % и более, что говорит о необходимости разрабатывать методику оптимизации системы электроснабжения по критерию минимума потерь в ней. Для решения этой проблемы воспользуемся рассмотренным выше методом эквивалентных сопротивлений, благодаря которому удастся представить сопротивление тяговой сети в виде функции, зависящей от координаты поезда на линии, а уравнение баланса энергии на участке преобразуется к уравнению баланса напряжений в дифференциальной форме.

Варианты схемных решений подключения секций межподстанционной зоны при одно-, двустороннем и комбинированном питании их от подстанций приведены на рис. 2.39, а эквивалентные схемы замещения – на рис. 2.40. При рассмотрении элементов схем были приняты следующие положения: секции тяговой сети имеют одинаковую длину, равную половине межподстанционной зоны  $l$ ; пост секционирования в схемах двустороннего и комбинированного питания зашунтирован перемычкой (рис. 2.39, б и в); в схеме комбинированного питания фидеры Ф1 и Ф2 расположены симметрично относительно поста секционирования СР. В этих условиях величина сопротивления контактного провода от точки присоединения питающего фидера до поезда, находящегося на расстоянии  $x$  от начала секции (с левого края на рисунке), в соответствии со схемами замещения выражается следующими зависимостями:

- схема одностороннего питания (рис. 2.39, а)

$$R'_{3_x} = rx ; \quad (2.13)$$

- схема двустороннего питания (рис. 2.39, б)

$$R''_{3_x} = rx \left( 1 - \frac{x}{l} \right) ; \quad (2.14)$$

- схема комбинированного питания (рис. 2.39, в):



- для первого участка  $R_{1\text{эx}}''' = r(l_1 - x)$ ;
- для второго участка  $R_{2\text{эx}}''' = \frac{r}{l_2} [x(2l_1 + l_2) - x^2 - l_1(l_1 + l_2)]$ ;
- для третьего участка  $R_{3\text{эx}}''' = r(x - l_1 - l_2)$ .

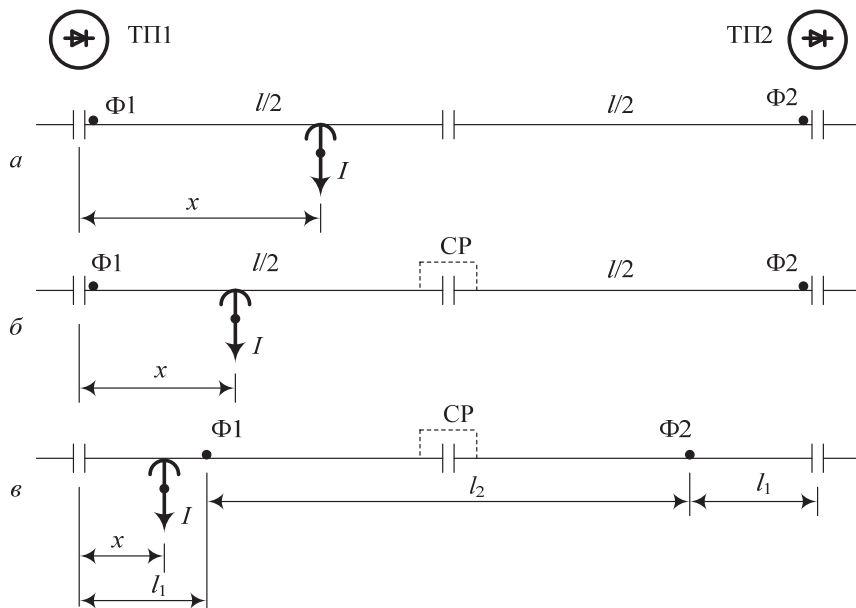


Рис. 2.39. Подключения секций межподстанционной зоны при одно-, двустороннем и комбинированном питании

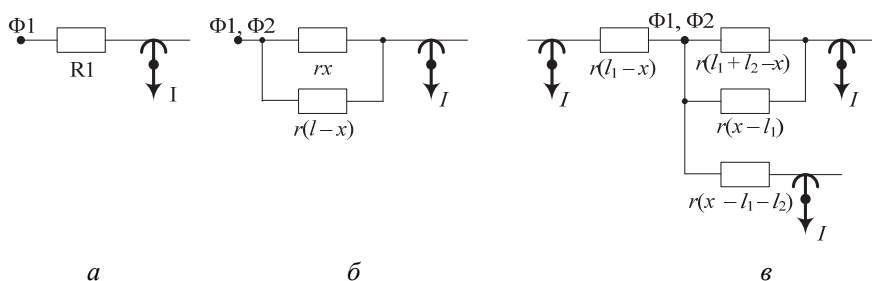


Рис. 2.40. Схемы замещения при одно-, двустороннем и комбинированном питании

На основе соотношений (2.13)–(2.15) были получены кривые зависимостей относительных эквивалентных сопротивлений питающих участков контактного провода в функции приведенной координаты положения поезда в межподстанционной зоне (рис. 2.41).

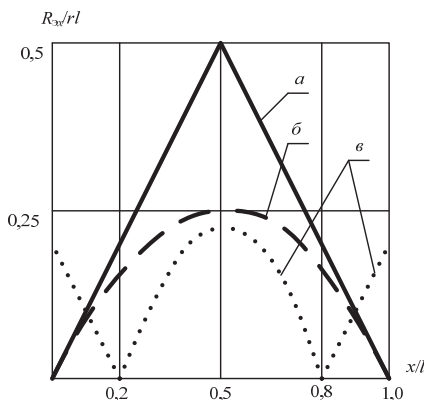


Рис. 2.41. Кривые зависимостей относительных эквивалентных сопротивлений питающих участков контактного провода в функции приведенной координаты положения поезда

Поскольку потери энергии при прочих равных условиях пропорциональны среднему эквивалентному сопротивлению, для всех приведенных выше схем питания были определены величины этих сопротивлений:

- для одностороннего питания (рис. 2.39, а)

$$R'_{э_0} = \frac{2}{l} \int_0^{\frac{l}{2}} r x dx = \frac{rl}{4}; \quad (2.16)$$

- для двустороннего питания (рис. 2.39, б)

$$R''_{э_0} = \frac{1}{l} \int_0^l r x \left(1 - \frac{x}{l}\right) dx = \frac{rl}{6}; \quad (2.17)$$

- для комбинированного питания (рис. 2.39, в)

$$R'''_{э_0} = \frac{1}{l} \int_0^l R'''_{ix} dx = r \left[ \frac{l_1}{3} \left( \frac{5l_1}{l} - 2 \right) + \frac{l}{6} \right]. \quad (2.18)$$

При подключении фидеров Ф1 и Ф2 к контактному проводу на расстоянии  $l_1 = 0,2l$  от начала левого и конца правого участков секционирования



рования соответственно эквивалентное сопротивление для схемы комбинированного питания снижается до своего минимального значения, равного

$$R_{\text{эо}}''' = \frac{rl}{10}.$$

Анализ зависимостей (2.16)–(2.18) показывает, что минимальные потери энергии в контактном проводе соответствуют комбинированной схеме. Вместе с тем этой схеме подключения соответствуют и более длинные питающие линии, что, безусловно, надо учитывать при расчете общих потерь энергии в системе электроснабжения.

Для оценки влияния этого фактора необходимо воспользоваться статистическими данными, которые показывают, что средняя длина межподстанционной зоны эксплуатируемых систем электроснабжения составляет  $l = 2,6$  км, а длина питающих линий  $L_{\text{л}} = 0,43$  км. Секции, представляющие собой, как правило, объединенные перемычками в одну цепь два контактных провода (прямого и обратного направления), выполненных на базе медного провода марки МФ-85, соединены с подстанцией питающими линиями (положительными и отрицательными), выполненными кабелями марки АСБ-625 или АСБ-800. При полном электрическом соединении контактных подвесок параллельных путей активное удельное сопротивление питающей подвижной состав сети  $r = 0,1$  мОм/м для трамвая и  $r = 0,2$  мОм/м – для троллейбуса. Эквивалентная длина питающих линий определяется из выражения

$$l_{\text{эл}} = \frac{\rho_{\text{ал}}}{S_{\text{л}} r} L_{\text{л}},$$

где  $\rho_{\text{ал}}$  – удельное сопротивление материала питающей линии (алюминий);

$S_{\text{л}}$  – площадь поперечного сечения жилы кабеля питающей линии;

$L_{\text{л}} = l_{+} + l_{-}$  – суммарная длина положительной и отрицательной питающих линий.

Для реальных схем одностороннего питания (рис. 2.39, а)  $L'_{\text{л}} = 0,43 \times 2 = 0,86$  км, двустороннего (рис. 2.39, б) –  $L''_{\text{л}} = 0,43 \times 4 = 1,72$  км, в схеме комбинированного питания (рис. 2.39, в) расчетную



длину каждой из питающих линий необходимо увеличить на  $l_1 = 0,2l = 0,52$  км, что приведет к увеличению суммарной длины кабелей до  $L_{\text{л}}'' = 3,8$  км.

Расчетные длины секций в этих условиях в зависимости от схемы подключения составят:

- для одно- и двустороннего питания  $l_p = l + L_{\text{л}} = 3,46$  км;
- для комбинированного питания  $l_p = 1,4l + L_{\text{л}} = 4,5$  км.

Расчетные величины средних эквивалентных сопротивлений для этих схем подключения составят:

- для одностороннего питания

$$R_{\text{с}}^1 = 2 \left( R_{\text{с}0}^1 + \frac{rL_{\text{л}}^1}{2} \right) = 2,16r \text{ Ом}; \quad (2.19)$$

- для двустороннего питания

$$R_{\text{с}}'' = 2 \left( R_{\text{с}0}'' + \frac{rL_{\text{л}}''}{8} \right) = 0,648r \text{ Ом}; \quad (2.20)$$

- для комбинированного питания

$$R_{\text{с}}''' = 2 \left( R_{\text{с}0}''' + \frac{rL_{\text{л}}'''}{8} \right) = 0,735r \text{ Ом}. \quad (2.21)$$

При сопоставлении величин средних эквивалентных сопротивлений, найденных из выражений (2.19)–(2.21), становится ясно, что минимальные потери энергии в системе электроснабжения подвижного состава характерны для схемы двустороннего питания. Вместе с тем необходимо отметить, что применение этой схемы становится целесообразным при использовании автоматических постов секционирования (АПС), способствующих повышению надежности электроснабжения транспорта в целом.

Принципиальная электрическая схема одного из вариантов исполнения АПС на тиристорах SCR показана на рис. 2.42. АПС представляет собой гибридный коммутационный аппарат, состоящий из механического контактного коммутатора К и тиристорного блока с общим



узлом емкостной коммутации, выполненного на главных тиристорах VS1 и VS2, и гасящих – VS3 и VS4, а также коммутирующего LC-контура. Для поддержания АПС в состоянии постоянной готовности коммутирующий конденсатор  $C$  подзаряжается от сети переменного тока через выпрямительный мост (на диодах VD1–VD4) и резистор  $R$ .

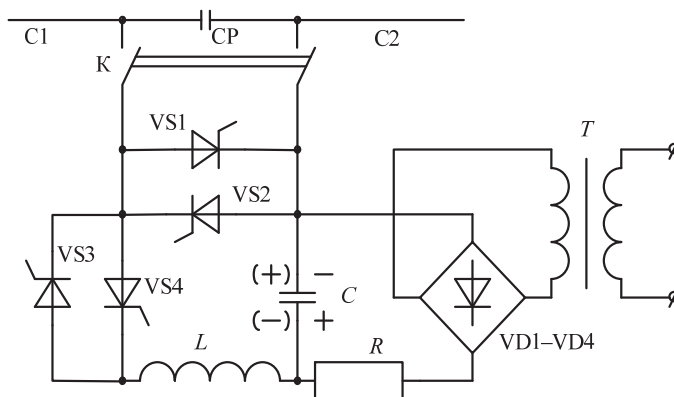


Рис. 2.42. Принципиальная электрическая схема одного из вариантов исполнения АПС на SCR-тиристорах

Принцип работы АПС заключается в следующем. Пусть исходное состояние схемы было таково, что конденсатор  $C$  имел полярность, указанную на рисунке без скобок, и на любой секции, например C2, напряжение стало ниже, чем на C1. Для выравнивания потенциалов в секциях отпирается тиристор VS1, объединяя C1, C2 и VS3, создающий контур перезаряда конденсатора по цепи  $C - L - VS3 - VS1 - C$ . После перезаряда коммутирующего конденсатора до полярности, указанной в скобках, тиристор VS3 запирается, а конденсатор подготовлен к запирающему тиристора VS1. В случае снижения потенциала в секции C1 до уровня, меньшего чем в секции C2, тиристор VS1 запирается. Если же при открытом тиристоре VS1 в секции C2 или питающей ее линии происходит короткое замыкание или протекающий через VS1 ток превышает максимально допустимую величину, то отпирается гасящий тиристор VS4, напряжение конденсатора  $C$  обратной полярностью прикладывается к тиристору VS1 и последний запирается, разъединяя секции. Для обеспечения гальванической развязки секций отключается и коммутатор K. Секция C1 остается под напряжением, и движение транспорта на ней продолжается.



При пониженном напряжении в секции C1 включается тиристор VS2, объединяя C1 и C2. В случае снижения потенциала в секции C2 до уровня, меньшего чем в секции C1, тиристор VS2 запирается. Если при открытом тиристоре VS2 в секции C1 или питающей ее линии происходит короткое замыкание или протекающий через VS2 ток превышает максимально допустимую величину, то отпирается гасящий тиристор VS3, напряжение конденсатора  $C$  обратной полярностью прикладывается к тиристору VS2 и последний запирается, разъединяя секции. Далее срабатывает коммутатор  $K$ , разъединяет секции и обеспечивает их гальваническую развязку.

Появление в последнее время силовых высоковольтных GTO- и IGCT-тириستоров, приходящих на смену SCR-тиристорам, и IGBT-транзисторов позволяет по-новому подойти к вопросу схемотехнического проектирования ключей, существенно упростить электрические цепи АПС, значительно снизив их массогабаритные показатели, и повысить эксплуатационную надежность.

Одним из вариантов системы электроснабжения, который может использоваться для питания наземного городского электротранспорта, является трехпроводная система питания подвижного состава на линии.

Переход от существующей двухпроводной системы питания на постоянном токе к трехпроводной, когда четыре провода контактной сети (в прямом и обратном направлении) соединяются таким образом, что два внешних получают плюсовой и минусовой потенциалы, а два внутренних запаараллеливаются и соединяются с нулевым выводом источника питания, позволяет уменьшить сечение внутренних проводов и снизить потери в системе.

Точки подключения фидеров ( $\Phi$ ) положительного и отрицательного потенциала целесообразно определять согласно представленным выше рекомендациям.

Поскольку питание секционированной тяговой сети осуществляется от нескольких тяговых подстанций, присоединение двух соседних секций контактной сети к источникам возможно по одной из двух схем: от одной подстанции (рис. 2.43, *а*) либо от двух подстанций (рис. 2.43, *б*).

Схемотехническое решение источника питания (тяговой подстанции), позволяющего реализовать предлагаемую трехпроводную схему с 12-пульсовым выпрямлением, показано на рис. 2.44, *а*. Применение

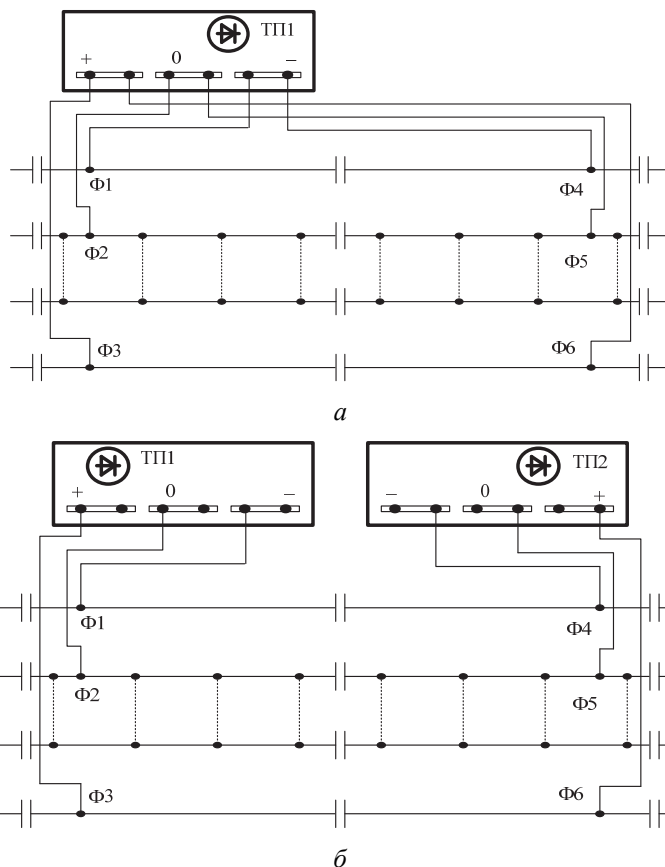


Рис. 2.43. Схемы присоединения двух соседних секций контактной сети к источникам

такой схемы способствует снижению потерь в системе, но требует модернизации цепей источника питания путем перехода от схемы соединения обмоток тягового трансформатора «звезда–две обратные звезды с уравнительным реактором» к схеме «звезда–звезда, треугольник» с последовательным соединением трехфазных выпрямительных мостов. Вместе с тем нельзя не отметить тот факт, что использование такого схемного решения не будет оптимальным, так как вследствие конструктивной несимметрии практически не удастся получить одинаковые линейные напряжения на вторичных обмотках трансформатора.



Это приводит к возникновению пульсации амплитуды выпрямленного напряжения  $u_{d0}$  (рис. 2.44, б) и появлению гармоник, кратных шестой.

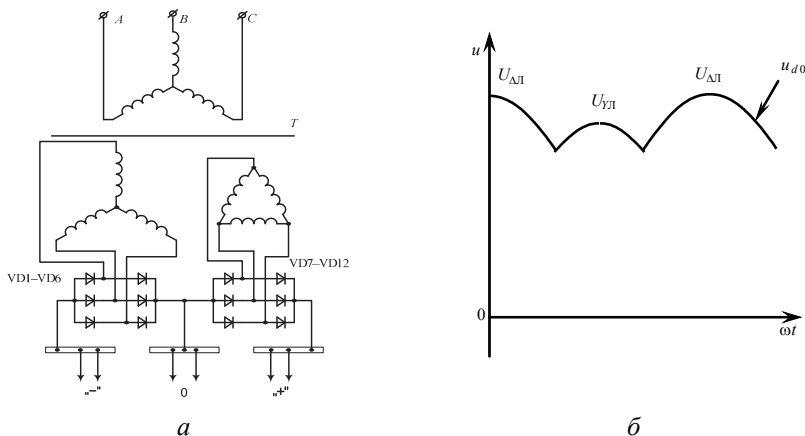


Рис. 2.44. Схема и диаграмма выпрямленного напряжения

Стабилизация амплитуды выпрямленного напряжения при сохранении пульсовости может быть достигнута при использовании схемного решения цепей источника питания, показанного на рис. 2.45. Для повышения надежности электроснабжения секционные разделы (СР) необходимо оборудовать полупроводниковыми коммутационными устройствами, позволяющими модифицировать схему питания контактной сети.

Для проведения исследований предлагаемой системы электроснабжения с целью определения потерь энергии необходимо воспользоваться методом эквивалентирования величины сопротивления секционированного участка контактной сети в функции его длины. Суть этого метода, как указывалось выше, заключается в замене меняющегося сопротивления секции на эквивалентное постоянное, потери электроэнергии в котором определяются величиной протекающего в секции тока, а действующее значение приведено к единице длины секции. Потери энергии в секции в случае представления движения поездов как простейшего потока событий могут быть определены через мощность потерь по формуле (2.12).

Проанализируем, какое влияние на потери энергии в секции при трехпроводной системе электроснабжения оказывают длина секции  $l$ , параметр  $r$  и схема подключения.

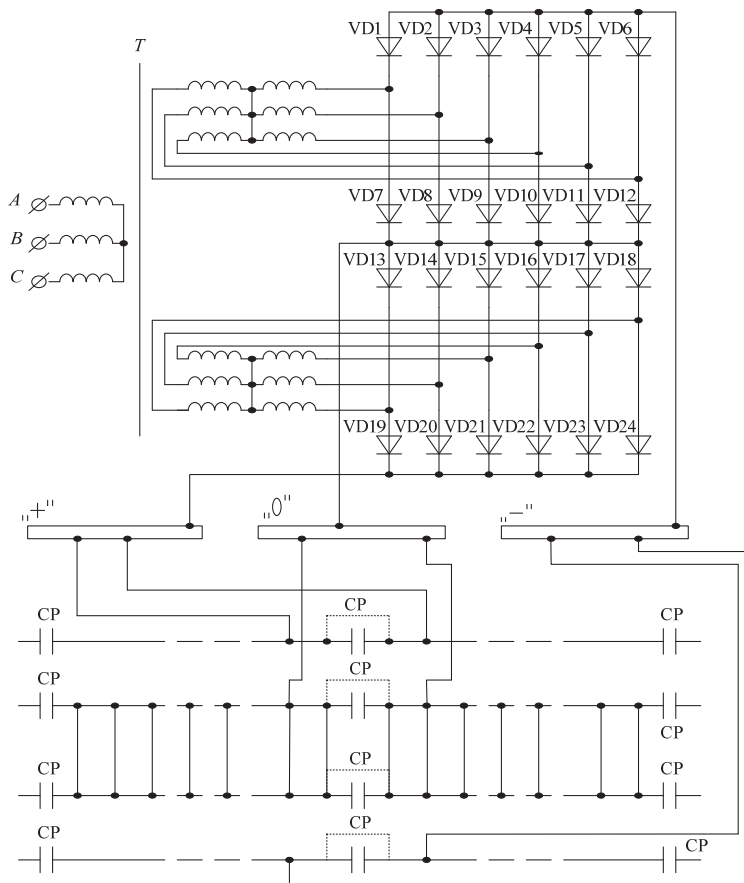
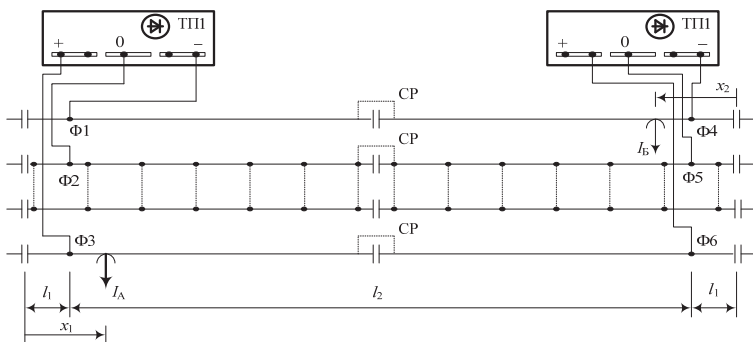
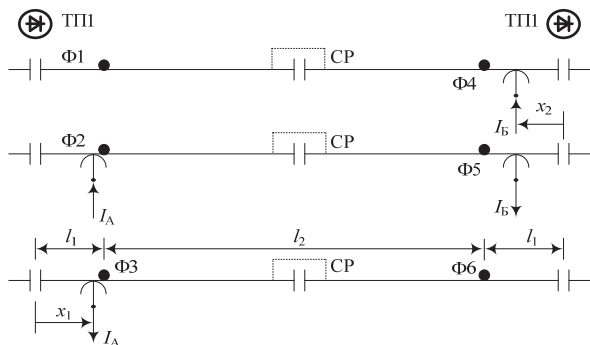


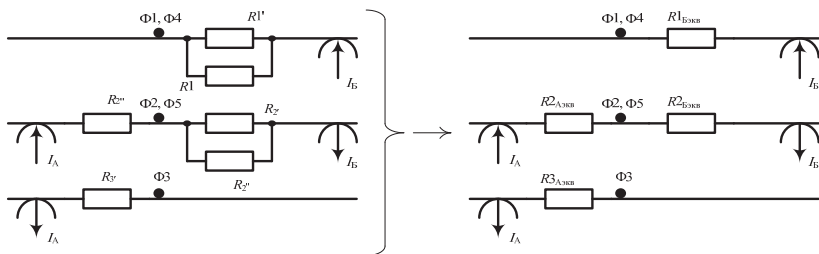
Рис. 2.45. Схемное решение цепей источника питания для стабилизации амплитуды выпрямленного напряжения

На рис. 2.46, а приведен фрагмент принципиальной электрической схемы двустороннего питания тяговой сети троллейбуса, содержащей тяговую подстанцию ТП1, соединенную с двумя соседними секциями контактной сети посредством питающих линий положительного потенциала через фидеры Ф3 и Ф6, питающих линий отрицательного потенциала через фидеры Ф1 и Ф4 и питающих линий нулевого потенциала через фидеры Ф2 и Ф5 с подключением по схеме одностороннего питания. Питающие фидеры подключены к своим секциям симметрично

на расстоянии  $l_1$  от секционных разделов. Направления движения троллейбусов, условно обозначенные ответвлениями токов  $I_A$  и  $I_B$ , указаны на схеме стрелками  $x_1$  и  $x_2$  соответственно.

 $a$ 

6



6

2

Рис. 2.46. Фрагмент принципиальной электрической схемы двустороннего питания тяговой сети троллейбуса



Чтобы повысить информативность схемы за счет исключения из нее второстепенных по значимости элементов, ее можно изобразить в соответствии с принятой в специальной литературе символикой в виде, представленном на рис. 2.46, б. На схеме показано и произвольное расположение двух троллейбусов, первый из которых потребляет ток  $I_A$  из контактного провода с положительным потенциалом и возвращает в контактный провод с нулевым потенциалом, а второй – ток  $I_B$  из контактного провода с нулевым потенциалом и возвращает в контактный провод с минусовым потенциалом. В реальных условиях движения диспозиция троллейбусов исчерпывается девятью вариантами:

- 1) троллейбус А расположен между секционным разделом и фидером Ф3, троллейбус Б – между фидером Ф4 и секционным разделом;
- 2) троллейбус А расположен между секционным разделом и фидером Ф3, троллейбус Б – между фидерами Ф1 и Ф4;
- 3) троллейбус А расположен между секционным разделом и фидером Ф3, троллейбус Б – между фидером Ф1 и секционным разделом;
- 4) троллейбус А расположен между фидерами Ф3 и Ф6, троллейбус Б – между фидером Ф4 и секционным разделом;
- 5) троллейбусы А и Б расположены между фидерами Ф3 и Ф6;
- 6) троллейбус А расположен между фидерами Ф3 и Ф6, троллейбус Б – между фидером Ф1 и секционным разделом;
- 7) троллейбус А расположен между секционным разделом и фидером Ф6, троллейбус Б – между фидером Ф4 и секционным разделом;
- 8) троллейбус А расположен между секционным разделом и фидером Ф6, троллейбус Б – между фидерами Ф1 и Ф4;
- 9) троллейбус А расположен между секционным разделом и фидером Ф6, троллейбус Б – между фидером Ф1 и секционным разделом.

Анализ вариантов показывает, что схемы 1 и 9 вариантов идентичны с той лишь разницей, что положение троллейбусов в них симметрично относительно центральных секционных разделов. Аналогичная ситуация с вариантами 2 и 8, 3 и 7, 4 и 6. Кроме того, если учесть, что токи троллейбусов равны, то варианты 2 и 4, 6 и 8 также идентичны. Таким образом, общее количество вариантов уменьшается до четырех.

Каждому из вариантов соответствует своя схема замещения, составление которой необходимо для расчета эквивалентного электрического сопротивления контактной сети. В качестве примера рассмотрим методику определения эквивалентного сопротивления контактной сети



для варианта 2. На рис. 2.46, в представлена исходная схема замещения, на которой объединены эквипотенциальные точки (фидеры Ф1 и Ф4, Ф2 и Ф5), а величины электрического сопротивления частей контактного провода от фидера до токоприемника обозначены соответствующими резисторами:

- от фидера Ф1 до токоприемника троллейбуса Б –  $R_{1'}$ ;
- от фидера Ф4 до токоприемника троллейбуса Б –  $R_{1''}$ ;
- от фидера Ф2 до токоприемника троллейбуса Б –  $R_{2'}$ ;
- от фидера Ф5 до токоприемника троллейбуса Б –  $R_{2''}$ ;
- от фидера Ф2 до токоприемника троллейбуса А –  $R_{2''}$ ;
- от фидера Ф3 до токоприемника троллейбуса А –  $R_{3'}$ .

Текущее значение величины электрического сопротивления секции  $R_i$  в функции ее длины определяется выражением

$$R_i = r_{\text{КС}} x ,$$

где  $r_{\text{КС}}$  – удельное электрическое сопротивление контактной сети;  
 $x$  – текущая координата поезда (расстояние от фидера до поезда).

Величина эквивалентного сопротивления секции длиной  $l$

$$R_3 = \frac{1}{l} \int_0^l R_i dl .$$

В этих условиях расчетные формулы для определения величины текущего значения сопротивлений  $R_{1'}$ – $R_{3'}$  на рис. 2.46, в имеют вид:

$$R_{1'} = r_x (l_1 + l_2 - x_2) ; \quad R_{1''} = r_x (x_2 - l_1) ; \quad R_{2'} = \frac{r_x}{2} (l_1 + l_2 - x_2) ;$$

$$R_{2''} = \frac{r_x}{2} (x_2 - l_1) ; \quad R_{2''} = r_x x_1 ; \quad R_{3'} = r_x x_1 .$$

После проведения преобразований (рис. 2.46, з) получаем расчетные формулы для вычисления эквивалентных сопротивлений:

$$R_{1\text{БЭКВ}} = \frac{r_x (l_2^2 - 6l_1^2)}{6l_2} ; \quad R_{2\text{БЭКВ}} = \frac{r_x (l_2^2 - 6l_1^2)}{12l_2} ; \quad R_{2\text{АЭКВ}} = \frac{r_x l_1}{2} ; \quad R_{3\text{АЭКВ}} = \frac{r_x l_1}{4} .$$

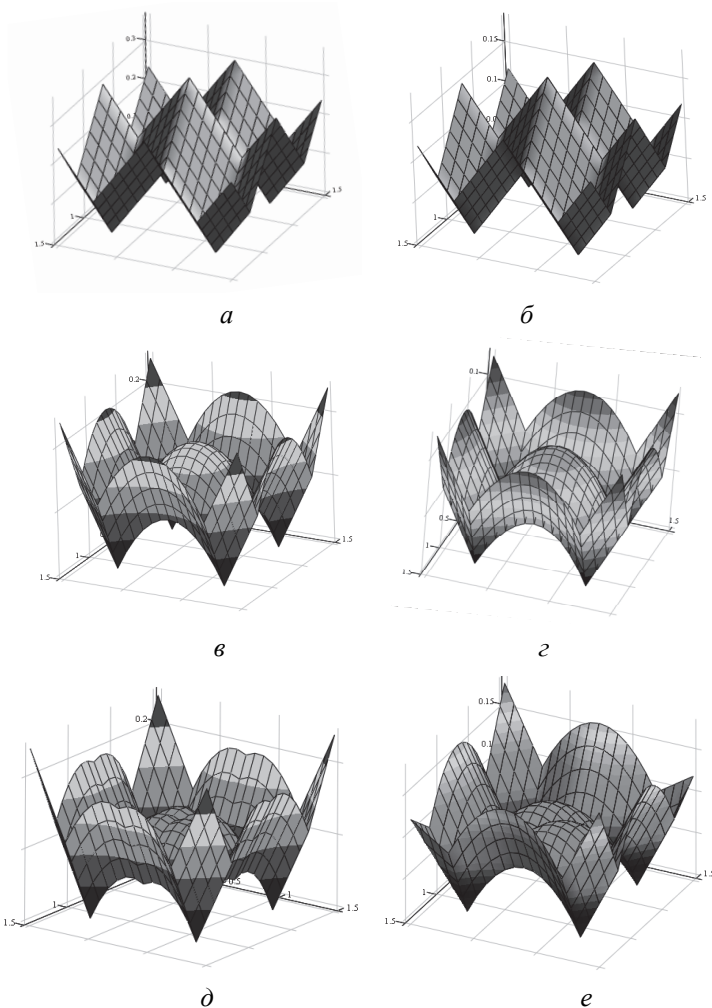


Рис. 2.47. Графические результаты расчетов

Результирующее эквивалентное сопротивление в цепи питания троллейбусов определяется по формулам:

$$R_{\text{Аэкв}} = R_{2\text{Аэкв}} + R_{3\text{Аэкв}} = \frac{3r_x l_1}{4}; \quad R_{\text{Бэкв}} = \frac{r_x (l_2^2 - 6l_1^2)}{4l_2}.$$



Для исходной схемы питания эквивалентные сопротивления в цепях питания троллейбусов составят соответственно:

$$R_{\text{Аэкв}} = r_x l_1; \quad R_{\text{Бэкв}} = r_x (l_1 + l_2).$$

На основе полученных соотношений в MathCAD были составлены математические модели различных вариантов схемных решений системы электроснабжения троллейбуса с целью определения величины эквивалентного сопротивления контактной сети в функции длины межподстанционной зоны. Поскольку выражения носят трансцендентный характер, расчеты проводились в трехмерных координатах, где по горизонтальным осям откладывались текущие координаты  $x_1$  и  $x_2$  в километрах, а по вертикальной – величина эквивалентного сопротивления сети, Ом.

На рис. 2.47 представлены графические результаты расчетов для схем:

- одностороннего раздельного питания секций (рис. 2.47, а);
- одностороннего питания секций с полным запаараллеливанием (рис. 2.47, б);
- с двусторонним питанием секций (рис. 2.47, в);
- с двусторонним питанием секций с запаараллеливанием (рис. 2.47, г);
- с узловым питанием (рис. 2.47, д);
- с питанием по трехпроводной линии (рис. 2.47, е).

Предпоследний вариант схемного решения системы электроснабжения применяется в основном на железнодорожном транспорте и поэтому исключен из дальнейшего анализа. Из кривых видно, что минимальной величиной эквивалентного сопротивления, а следовательно, и минимальными потерями при передаче электроэнергии потребителю обладает схема двустороннего питания с запаараллеливанием. Однако надежность электроснабжения по такой схеме ниже, поскольку наличие короткого замыкания на питающем фидере приведет к обесточиванию контактной сети в обоих направлениях. Поэтому предпочтительнее схема трехпроводного питания. Кроме того, при такой схеме появляется возможность увеличить длину межподстанционных зон по сравнению со схемой одностороннего питания.



### 2.3.2. АНАЛИЗ СХЕМ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Системы тягового электроснабжения, будучи составной частью сложного электротехнического комплекса, называемого электрический транспорт, классифицируются:

- по расположению подстанций;
- уровню напряжения;
- роду тока;
- типу тяговых сетей.

Сравнение различных вариантов исполнения систем производится по всем перечисленным критериям. Не определяя характеристик систем по трем первым признакам (они известны), следует дать оценку их свойств при различных типах тяговых сетей.

Как указывалось выше, существуют двухпроводные и трехпроводные системы с одним уровнем напряжения. Двухпроводные тяговые сети (рис. 2.48, *а*) являются основными для систем на постоянном и однофазном переменном токе (напряжением 27,5 кВ), хотя питание последних и осуществляется от трехфазной сети. Но кроме них эксплуатируются также трехпроводные тяговые сети с различным уровнем питающего напряжения. Выше были рассмотрены трехпроводные (двуполярные) тяговые сети постоянного тока, в которых энергия к электроподвижному составу (ЭПС) подводится от плюсового и нулевого проводов по одной стороне улицы, а от нулевого и минусового – по другой (рис. 2.48, *б*). Двухпроводные тяговые сети (ТС) с дополнительным проводом повышенного напряжения (рис. 2.48, *в*) образуют систему, включающую в себя трехполюсный источник питания, трехпроводную линию электроснабжения, напряжение между двумя из которых равно номинальному для ЭПС и подается на его токоприемники, а на третьем – повышенное и подается на преобразовательный пункт (ПП), где происходит его понижение до уровня номинального для ЭПС с подключением к контактной сети. Подобная система на переменном токе ( $2 \cdot 25$  кВ) используется на железнодорожном транспорте. Далее будут рассматриваться только системы на постоянном токе, применяемые для питания подвижного состава трамвая, троллейбуса, метрополитена и железнодорожного транспорта.

Источником питания ТС служит выпрямительный агрегат (ВА), состоящий, как известно, из тягового трансформатора и выпрямителя,



реализующий 12-пульсовую схему выпрямления. В двухпроводных линиях, как указывалось выше, двенадцатикратная пульсация выпрямленного напряжения достигается применением в ВА последовательного или параллельного соединения выпрямительных мостов Ларионова; в трехпроводных – последовательным соединением мостов; в системах с дополнительным питающим проводом – с параллельным их соединением.

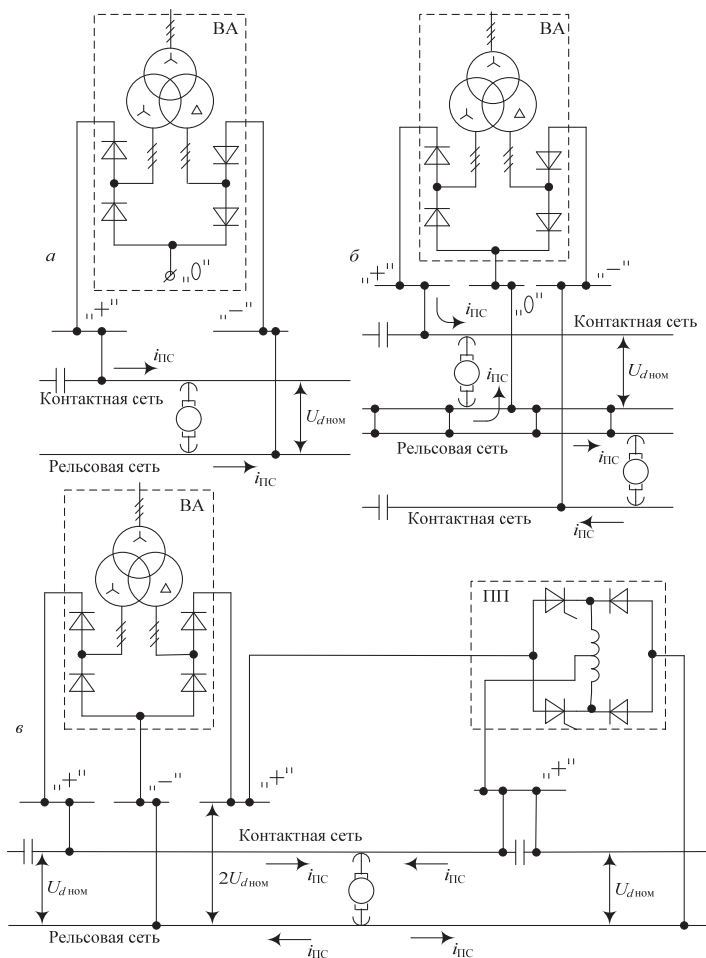


Рис. 2.48. Двухпроводные и трехпроводные системы с одним уровнем напряжения



В качестве базового ВА для тяговых подстанций железных дорог может использоваться серийно выпускаемый промышленностью выпрямитель типа В-ТПЕД-3,15/3,3-УХЛ4. Для тяговых подстанций трамвая, троллейбуса и метрополитена подобного рода ВА необходимо спроектировать.

Преобразовательный пункт в тяговых сетях с дополнительным проводом представляет собой автономный инвертор с автотрансформаторным звеном и выпрямителем, отрицательный вывод которого соединяется с рельсовой сетью, а средняя точка автотрансформатора – с контактной подвеской. Опытные образцы преобразовательных пунктов постоянного тока (ППТ) с ВА на базе экситронов применялись на железных дорогах, на базе тиристоров – для питания ТС трамвая г. Ташкента.

Наибольший интерес для анализа систем представляют тяговые сети с двухпутными транспортными линиями, а сам анализ целесообразно проводить для межподстанционных зон (МПЗ). В МПЗ могут применяться следующие типы секций:

- с отдельным одно- или двусторонним питанием (далее отдельная схема, рис. 2.49, а);
- с параллельным электрическим соединением контактных подвесок с одно- или двусторонним питанием (далее параллельная схема, рис. 2.49, б);
- с узловым схемой питания с пунктами параллельного соединения (ППС) и постами секционирования (ПС) (далее узловое схемой, рис. 2.49, в).

Трехпроводные тяговые сети можно отнести к схемам отдельного одностороннего питания с общим для обоих направлений движения нейтральным (нулевым) проводом. В системах с преобразовательными пунктами последние совмещаются с постом секционирования.

За оценочные критерии систем с различными схемами ТС можно принять:

- надежность обеспечения питанием ЭПС (в частности вероятность безотказной работы системы);
- предельно допустимую (максимальную) длину межподстанционной зоны, для которой при заданных размерах движения в нормальном режиме выдерживаются нормируемые электрические величины;
- степень влияния гальванических процессов на подземные сооружения (для рельсового транспорта);

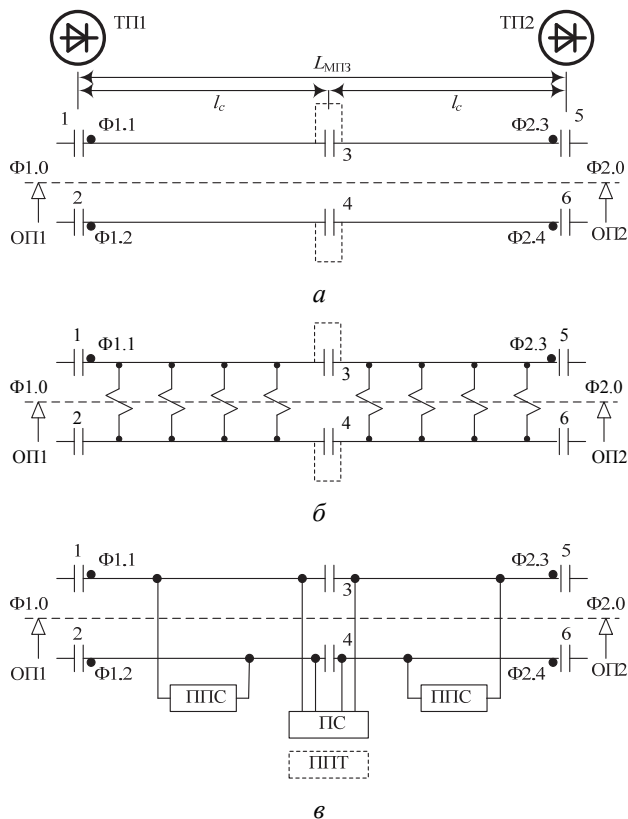


Рис. 2.49. Схемы тяговых сетей с двухпутными транспортными линиями

- показатели экономичности системы (в частности технологические потери энергии).

Математические описания электрических величин в системе определяются формулами аналитического метода в условиях представления движения поездов простейшим потоком:

- действующее значение тока фидера

$$I_{\text{лг}} = \frac{n' I_0 l_c}{k_{\text{сх}}} \sqrt{1 + \frac{z_{\text{сх}} k_3^2}{n' l_c}}; \quad (2.22)$$



- падение напряжения в секции до токоприемника за время движения поезда под током

$$\Delta U_T = \frac{n'I_0 r l_c^2}{3k_{cx}^2} \left( 1 + \frac{z'_{cx} \alpha - 1}{n'l_c} \right), \quad (2.23)$$

где  $\alpha$  – коэффициент прерывистости тока поезда;

- мощность потерь в секции, описываемая формулой (2.12).

Численные значения входящих в формулы переменных могут быть определены из следующих выражений:

$$n' = \frac{1}{Jv_3}, \quad I_0 = \frac{A_{уд} G_{п} v_3}{U_c}, \quad r = r_{KC} + r_p, \quad k_3 = 1,05\sqrt{\alpha},$$

где  $J$  – интервал между поездами;

$v_3$  – эксплуатационная скорость;

$G_{п}$  – вес поезда;

$U_c$  – среднее напряжение в сети;

$R_{KC}$  – удельное сопротивление контактной сети;

$r_p$  – удельное сопротивление рельсовой сети (либо контактной сети для троллейбуса).

Соотношения между длинами секций ( $l_c$ ) и параметрами движения ( $n'$ ,  $J$ ) определяются из условий:

- допустимой величины тока секции по нагреву  $I_{dc} \leq I_{ЛЭ}$ ;
- допустимой величины падения напряжения  $\Delta U_{TH} \leq \Delta U_T$ .

После замены переменных формулы (2.22) и (2.23) преобразуются к виду

$$I_{dc} = \frac{n'I_0 l_c}{k_{cx}} \sqrt{1 + \frac{z'_{cx} k_3^2}{n'l_c}} \quad \text{и} \quad \Delta U_{TH} = \frac{n'I_0 r l_c^2}{3k_{cx}^2} \left( 1 + \frac{z'_{cx} \alpha - 1}{n'l_c} \right). \quad (2.24)$$

После введения обозначений констант

$$\frac{I_{dc} k_{cx}}{I_0} = N, \quad z'_{cx} k_3^2 = A, \quad \frac{3k_{cx}^2 \Delta U_T}{I_0 r} = H \quad \text{и} \quad z'_{cx} \alpha - 1 = B$$

и проведения преобразований система уравнений (2.24) примет вид

$$N^2 = n'^2 l_c^2 + A n' l_c \quad \text{и} \quad H = n' l_c^2 + B l_c. \quad (2.25)$$



Разрешение системы уравнений (2.25) относительно  $n'$  дает иско-  
мые зависимости для определения допустимой плотности поездов на  
участке в функции длины секции:

$$n' = \frac{1}{2l_c} \left( \sqrt{A^2 + 4N^2} - A \right); \quad n' = \frac{H - Bl_c}{l_c^2}. \quad (2.26)$$

Для определения допустимой длины секции при заданной плотно-  
сти (интервале движения) поездов система уравнений (2.26) преобра-  
зуется к виду

$$l_c = \frac{1}{2n'} \left( \sqrt{A^2 + 4N^2} - A \right); \quad l_c = \frac{1}{2n'} \left( \sqrt{B^2 + 4n'H} - B \right). \quad (2.27)$$

Формулы (2.26) и (2.27) позволяют определять пропускную спо-  
собность транспортных линий по ограничениям, налагаемым устрой-  
ствами тяговой сети, в частности определять длины МПЗ при различ-  
ных схемах тяговых сетей.

В качестве примера рассмотрим расчет МПЗ тяговых сетей трол-  
лейбуса и скоростного трамвая.

Исходные данные по параметрам элементов тяговых сетей и по-  
движного состава приведены в табл. 2.5, а по характеристикам движе-  
ния – в табл. 2.6.

Таблица 2.5

| Вид транспорта | $G_{п}, \text{Т}$ | $v_3, \text{км/ч}$ | $I_0, \text{А}$ | $\alpha$ | $k_s^2$ | Состав контактной подвески | $r_k, \text{Ом/км}$ | $I_{дс}, \text{А}$ |
|----------------|-------------------|--------------------|-----------------|----------|---------|----------------------------|---------------------|--------------------|
| Троллейбус     | 17                | 17                 | 110             | 2,0      | 2,2     | БрФ-100                    | 0,215               | 700                |
| Трамвай        | 60                | 25                 | 220             | 2,5      | 2,75    | ПБСА-50/70 + БрФ-100       | 0,155               | 840                |

Таблица 2.6

| Интервал движения, с | Плотность поездов на линии, п/км |         |
|----------------------|----------------------------------|---------|
|                      | Троллейбус                       | Трамвай |
| 70                   | 3,02                             | 2,06    |
| 90                   | 2,35                             | 1,6     |
| 180                  | 1,17                             | 0,8     |
| 300                  | 0,71                             | 0,48    |



Результаты расчета длины секции контактной сети и межподстанционной зоны для интервала движения в 90 с сведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

| Вид транспорта | Расчет плотности, п/км | Длины секций/МПЗ при схемах, км |              |                           |              |                      |              |                             |              |
|----------------|------------------------|---------------------------------|--------------|---------------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
|                |                        | Раздельная по току              |              | Раздельная по направлению |              | Параллельная по току |              | Параллельная по направлению |              |
|                |                        | односторонняя                   | двусторонняя | односторонняя             | двусторонняя | односторонняя        | двусторонняя | односторонняя               | двусторонняя |
| Троллейбус     | 2,35                   | $\frac{0,96}{1,92}$             | 2,17         | $\frac{1,05}{2,1}$        | 2,38         | $\frac{2,4}{4,8}$    | 5,1          | $\frac{1,27}{2,54}$         | 2,72         |
| Трамвай        | 1,6                    | $\frac{1,68}{3,35}$             | 3,76         | $\frac{1,3}{2,6}$         | 3,06         | $\frac{2,0}{4,0}$    | 4,23         | $\frac{1,67}{3,34}$         | 3,64         |

На основе анализа результатов расчета можно сделать вывод о том, что лимитирующим фактором при достаточно высокой степени интенсивности движения поездов на линии является падение напряжения в сети. Кроме того, как показывают расчеты, уменьшение интенсивности движения вдвое (интервал движения поездов составляет 180 с) не приводит к значительному увеличению МПЗ.

Определенный интерес представляет оценка ТС по удельной мощности потерь электроэнергии в сети (кВт/км) при предельных по интенсивности движения режимах и расчетных значениях МПЗ. Результаты расчетов мощности потерь в сетях различной конфигурации, отнесенные к одному километру одиночной линии, полученные по формуле (2.12), приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

| Вид транспорта | Раздельная    |              | Параллельная  |              | Трехпроводная |
|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|                | односторонняя | двусторонняя | односторонняя | двусторонняя | односторонняя |
| Троллейбус     | 24,60         | 24,13        | 24,01         | 23,81        | 18,43         |
| Трамвай        | 33,74         | 33,2         | 34,30         | 33,77        |               |

На основе анализа результатов можно сделать вывод, что ни одна из схем ТС не имеет преимуществ перед другими. Здесь следует заме-



тить, что схема узлового питания занимает промежуточное положение между схемами раздельного и параллельного питания и поэтому также не имеет преимуществ.

Сопоставим различные схемы ТС по критерию мощности потерь в обобщенном виде, используя выражение (2.12), для подвижного состава троллейбуса. Аналогичные сопоставления для ТС трамвая будут различаться лишь тем, что величина сопротивления минусового провода (рельсового пути) на порядок меньше, чем контактного. В целях упрощения вывода зависимостей решение будет находиться для обобщенной межподстанционной зоны с плотностью поездов  $n'$  для одного направления движения с параметром ТС, выраженным через сопротивление контактной подвески  $r_k$  одного пути. Длина секции  $l_c$  выражается через длину МПЗ  $l_3$ ; секции равны между собой; источники питания (тяговые подстанции) размещены симметрично. Для отличия одних и тех же символов в различных схемах вводятся следующие индексы: 1 – для одностороннего питания; 2 – для двустороннего; трехпроводной схемы питания – 3; раздельного питания – (\*); параллельного – (\*\*); с преобразовательным пунктом – индексом П.

Обобщенная схема питания тяговой сети показана на рис. 2.50.

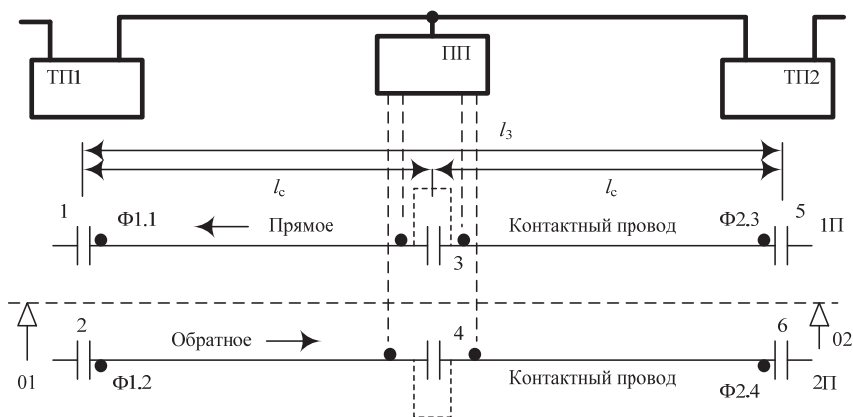


Рис. 2.50. Обобщенная схема питания тяговой сети

Расчетная формула для определения величины мощности потерь в ТС с односторонним питанием имеет вид:

- при раздельном питании



$$\Delta P'_1 = \frac{(n'_1)^2 I_0^2 2r_k (l_3 / 2)^3}{3} \left( 1 + \frac{1,5k_3^2 - 1}{n'_1 l_3 / 2} \right), \text{ для МПЗ } \Delta P'_{3(1)} = 4\Delta P'_1,$$

где  $\Delta P'_{3(1)}$  – мощность потерь в МПЗ;

- при параллельном питании

$$\Delta P''_1 = \frac{(2n'_1)^2 I_0^2 r_k (l_3 / 2)^3}{3} \left( 1 + \frac{1,5k_3^2 - 1}{n'_1 l_3} \right), \text{ для МПЗ } \Delta P''_{3(1)} = 2\Delta P''_1.$$

$$\text{Отношение мощностей потерь } \frac{\Delta P''_{3(1)}}{\Delta P'_{3(1)}} = \frac{n'_1 l_3 + 1,5k_3^2 - 1}{n'_1 l_3 + 2(1,5k_3^2 - 1)} = \gamma_1^{**/*}.$$

Обозначив  $n'_1 l_3 = n$  количество поездов в межподстанционной зоне;  $1,5k_3^2 - 1 = A$  и приняв  $k_3 \approx 2,2$ , получим зависимость соотношения мощностей потерь для рассматриваемого случая:

$$\gamma_1^{**/*} = \frac{n + A}{n + 2A} = \frac{n + 3,3}{n + 6,6},$$

графическое изображение которого имеет вид, представленный на рис. 2.51.

Для схем двустороннего параллельного и раздельного питания при таком же значении  $k_3$  соотношение мощностей потерь имеет вид

$$\gamma_2^{**/*} = \frac{2n + 2k_3^2 - 1}{2(n + 2k_3^2 - 1)} = \frac{2n + A}{2(n + A)} = \frac{2n + 3,4}{2(n + 3,4)},$$

графическое изображение которого также представлено на рис. 2.51.

Анализ зависимостей показывает, что с увеличением количества поездов на линии эффективность параллельной схемы при обоих способах подключения питающих фидеров снижается.

Для трехпроводной схемы питания, которая относится к схемам с односторонним питанием, мощность потерь определяется выражением

$$\Delta P'_{1(3)} = \frac{(n'_1)^2 I_0^2 2r_k (l_3 / 2)^3}{2} \left( 2 + \frac{3(1,5k_3^2 - 1)}{n'_1 l_3 / 2} \right), \quad \Delta P'_{3(3)} = 2\Delta P'_{1(3)}.$$

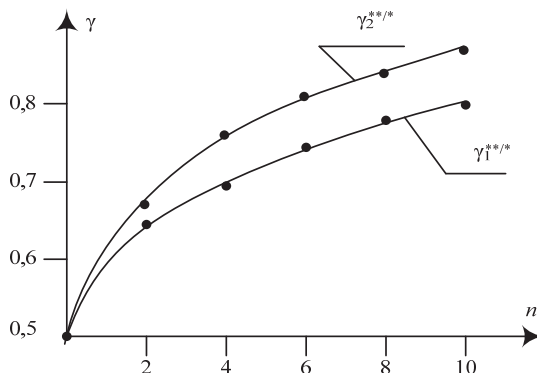


Рис. 2.51. Кривые относительных потерь при раздельном и параллельном питании

Соотношение мощностей потерь в трех- и двухпроводных схемах с односторонним питанием при таком же значении  $k_3$  имеет вид

$$\gamma_{3/1}^* = \frac{\Delta P'_{3(3)}}{\Delta P'_{3(1)}} = \frac{3[2n + 3(1,5k_3^2 - 1)]}{8[n + 2(1,5k_3^2 - 1)]} = \frac{6n + 20,7}{8n + 18,4},$$

а графическое изображение представлено на рис. 2.52.

Анализ зависимости показывает, что при двух и более троллейбу-сах на линии эффективность трехпроводной схемы выше.

Соотношение мощностей потерь в контактом проводе трехпро-водной и двухпроводной параллельной схем с односторонним питани-ем при таком же значении  $k_3$  имеет вид

$$\gamma_{3/1}^{**} = \frac{\Delta P'_{3(3)}}{\Delta P''_{3(1)}} = \frac{3[n + 3(1,5k_3^2 - 1)]}{4[2n + 1,5k_3^2 - 1]} = \frac{6n + 20,7}{8n + 9,2},$$

а графическое изображение ее показано на рис. 2.52.

Из графика видно, что при количестве поездов на линии более ше-сти мощность потерь в трехпроводной схеме питания ниже.

Схемы ТС с преобразовательными пунктами являются разновидно-стью схем с двусторонним питанием. Их эффективность можно оце-нить в сравнении со схемами двустороннего раздельного и параллель-



ного питания. По аналогии с предыдущими аналитическими выкладками с учетом того, что ПП делит МПЗ на две части, нетрудно получить соотношения мощностей потерь

$$\gamma_{\Pi/2}^* = \frac{\Delta P'_{\Pi}}{\Delta P'_2} = \frac{n + 6,8}{4(n + 3,4)}.$$

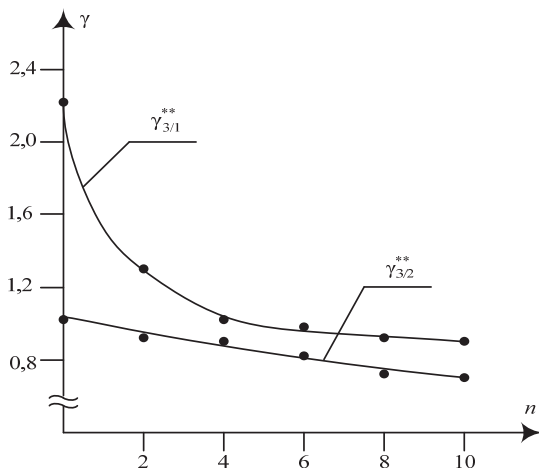


Рис. 2.52. Соотношение мощностей потерь в трех- и двухпроводных схемах с односторонним питанием

Аналогично для схем с параллельным питанием

$$\gamma_{\Pi/2}^{**} = \frac{\Delta P'_{\Pi}}{\Delta P''_2} = \frac{n + 3,4}{2(2n + 3,4)}.$$

Графическое изображение последних зависимостей приведено на рис. 2.53.

Анализ соотношений показывает, что схемы ТС с преобразовательными пунктами имеют наименьшие потери. Здесь, однако, следует заметить, что при сравнении не были учтены потери в линии двойного напряжения (ЛДН), питающей ПП, внутренние потери в самом пункте, а также от уравнильных токов. Поэтому кривые рис. 2.53 будут лежать несколько выше. Но даже с их учетом мощность потерь в ТС с ПП в 2...4 раза меньше, чем в сетях с другими схемами соединений.

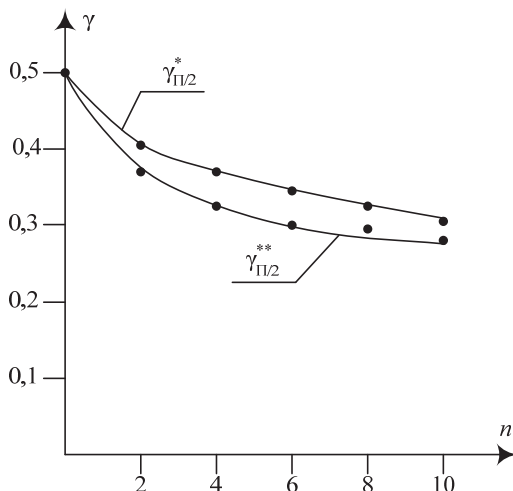


Рис. 2.53. Соотношение мощностей потерь в ТС с ПП

В качестве примера сопоставим тяговые сети скоростного трамвая с ПП и с двусторонним раздельным питанием секций. Исходными данными для расчета являются: интервал движения, равный 180 с; длина секции, рассчитанная по изложенной выше методике (критерию допустимой величины падения напряжения в контактной сети), составляет 4,14 км; плотность поездов на линии  $n' = 0,8$  п/км; напряжение контактной сети  $U_c = 600$  В; напряжение ЛДН составляет  $U_{\text{ЛДН}} = 1200$  В; удельные сопротивления контактной сети  $r_{\text{КС}} = 0,155$  Ом/км, рельсовой сети  $r_p = 0,007$  Ом/км и кабеля ЛДН  $r_{\text{Л}} = 0,04$  Ом/км; КПД преобразователя ПП  $\eta = 0,98$ . ПП установлен в середине МПЗ и соединяется с тяговыми подстанциями кабелем АСБ-800.

На основе исходных данных определяется длина секции  $l_c = 2.07$  км и  $k_{\text{сх}} = 2$ . Исходя из величины среднего тока двигателя трамвая  $I_0 = 220$  А определяются средний и действующий токи фидера, равные соответственно  $I_{0\text{Ф}} = 182$  А и  $I_{\text{Ф}} = 235$  А. Поскольку на ПП четыре одинаковых фидера, средний и действующий токи пункта соответственно составят

$$I_{0\text{ПП}} = 4 \cdot 182 = 728 \text{ А и } I_{\text{ФПП}} = k_{\text{ФПП}} I_{0\text{ПП}} = 788 \text{ А,}$$



где  $k_{\text{ПП}} = 1,083$  – коэффициент эффективности тока преобразовательного пункта.

Средние токи ЛДН и уравнильный определяются по формулам

$$I_{0\text{Л}} = \frac{I_{0\text{ПП}} q_{\text{Л}}}{Q} = 349 \text{ А} \quad \text{и} \quad I_{0\text{У}} = \frac{I_{0\text{ПП}} q_1}{Q} = 36 \text{ А} ,$$

где  $q_{\text{Л}} = (1 + k)r_{\text{КС}} + kr_{\text{р}}; \quad Q = (1 + k)(1 + k\eta)r_{\text{КС}} + r_{\text{Л}} + k^2\eta r_{\text{р}}; \quad q_1 = r_{\text{Л}} - kr_{\text{р}}; \quad k = (U_{\text{ЛДН}} - U_{\text{с}}) / U_{\text{с}}.$

Действующий ток ЛДН  $I_{\text{эЛ}} = k_{\text{эПП}} I_{0\text{Л}} = 378 \text{ А}.$

Мощность потерь в ЛДН, от уравнильных токов и в ПП

$$\Delta P_{\text{Л}} = I_{\text{эЛ}}^2 r_{\text{Л}} L_{\text{Л}} = 11,83 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{У}} = I_{\text{У}}^2 (r_{\text{р}} L_{\text{с}} / 2 + r_{\text{Л}} L_{\text{Л}}) = 0,41 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{ПП}} = 8,74 \text{ кВт}.$$

Мощность потерь в секции контактной сети согласно (2.12) с учетом исходных данных составит

$$\Delta P_{\text{П}} = \frac{0,8^2 \cdot 220^2 \cdot 0,162 \cdot 2,07^3}{3 \cdot 2^2} \left( 1 + \frac{2 \cdot 2,75}{0,8 \cdot 2,07} \right) \approx 16 \text{ кВт}.$$

Полные потери в МПЗ составят  $\Delta P_{\text{З(П)}} = 4 \cdot 16 = 64 \text{ кВт}.$

Мощность потерь в выпрямительном агрегате тяговой подстанции можно принять равной потерям в ПП, т. е.  $\Delta P_{\text{Т/ПС}} = 8,74 \text{ кВт}.$  Суммарные потери в ТС с преобразовательным пунктом

$$\Delta P_{\text{ТС(ПП)}} = 64 + 11,83 + 0,41 + 2 \cdot 8,74 = 93,72 \text{ кВт},$$

а удельные  $\Delta P_{\text{удТС(ПП)}} = \Delta P_{\text{ТС(ПП)}} / 2l_3 = 93,72 / 2 \cdot 4,14 = 11,03 \text{ кВт/км}.$

Мощность потерь в ТС без преобразовательного пункта

$$\Delta P_{\text{П}} = 2 \frac{0,8^2 \cdot 220^2 \cdot 0,162 \cdot 4,14^3}{3 \cdot 2^2} \left( 1 + \frac{2 \cdot 2,75}{0,8 \cdot 4,14} \right) = 157,84 \text{ кВт},$$

а в удельной форме –  $\Delta P_{\text{удТС}} = \Delta P_{\text{ТС}} / 2l_3 = 157,84 / 2 \cdot 4,14 = 19,09 \text{ кВт/км}.$

Таким образом, в ТС с преобразовательным пунктом мощность потерь электрической энергии оказалась в 1,7 раза меньше, чем в схеме раздельного двустороннего питания.

При выполнении требования по нормированию падения напряжения в контактной сети система с преобразовательным пунктом позволяет увеличить расстояние между тяговыми подстанциями, обеспечивая тем самым снижение капитальных затрат на систему электроснабжения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы электрического транспорта: учеб. для вузов / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович, Т. И. Савина, В. Д. Тулупов; под общ. ред. М. А. Слепцова. – М.: Академия, 2006. – 464 с.
2. Мятеж С. В. Трансформаторные преобразователи числа фаз с улучшенными энергетическими показателями: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Мятеж. – Новосибирск, 2003. – 20 с.
3. Щуров Н. И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н. И. Щуров. – Новосибирск, 2003. – 34 с.
4. Векторный метод анализа выпрямителей с применением полярных координат / Г. Н. Ворфоломеев, В. В. Бирюков, С. А. Евдокимов, Б. В. Малоземов, В. Г. Шальнев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2006. – № 2. – С. 241–247.
5. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко и др.; под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
6. Zinoviev G. S. Three-level rectifiers of three-phase orthogonal system of voltages = [Трехуровневые выпрямители трехфазных ортогональных систем напряжений] / G. S. Zinoviev, N. N. Lopatkin // APEIE '06. 8th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, 26–28 Sept. 2006: proceedings. – Novosibirsk, 2006. – Vol. 1. – P. 194–200.
7. Методы нахождения схемных решений выпрямителей с естественной коммутацией / С. А. Евдокимов, Г. Н. Ворфоломеев, В. И. Сопов, В. В. Бирюков // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2006. – № 2 (26), т. 1. – С. 126–130.
8. Евдокимов С. А. Графоаналитический метод оценки влияния конструктивной несимметрии обмоток на форму кривой выпрямленного напряжения / С. А. Евдокимов, В. В. Бирюков, Г. Н. Ворфоломеев // Электричество. – 2007. – № 8. – С. 24–28.



9. Бирюков В. В. Методы исследования электромагнитных процессов в многопульсовых выпрямителях / В. В. Бирюков, Г. Н. Ворфоломеев, С. А. Евдокимов // Науч. вестн. НГТУ. – 2006. – № 2 (23). – С. 105–118.
10. Векторный метод анализа выпрямителей с применением полярных координат / Г. Н. Ворфоломеев, В. В. Бирюков, С. А. Евдокимов, Б. В. Малоземов, В. Г. Шальнев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2006. – № 2. – С. 241–247.
11. Принципы ортогонального выпрямления в трехфазных выпрямителях / Г. Н. Ворфоломеев, С. А. Евдокимов, Н. И. Щуров, Б. В. Малоземов // Высокие технологии – 2004: сб. тр. науч.-техн. форума с междунар. участием: в 4 ч. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2004. – Ч. 4. – С. 137–143.
12. Евдокимов С. А. Трехуровневые выпрямители с искусственными ортогональными системами питающего напряжения / С. А. Евдокимов, В. В. Бирюков // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 4. – С. 42–48.
13. Оптимизация системы электроснабжения городского наземного электрического транспорта / В. В. Бирюков, В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, Е. А. Спиридонов, А. А. Штанг // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 2. – С. 24–27.
14. Сопов В. И. Определение оптимальной схемы подключения секционированного участка контактной сети постоянного тока городского пассажирского электрического транспорта к источнику питания / В. И. Сопов, В. В. Бирюков // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт: тр. второй междунар. науч.-техн. конф., Тобольск, 8–11 сент. 2004 г. – Тобольск, 2004. – Ч. 1. – С. 273–279.
15. Анализ систем электроснабжения подвижного состава с различными схемами тяговых сетей / В. И. Сопов, В. В. Бирюков, Ю. А. Прокушев, Ю. А. Рылов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 2. – С. 49–53.
16. Electric transport vehicle power-supply system analysis with various traction networks topologies / V. I. Sopov, V. V. Biryukov, Y. A. Prokushev, Y. A. Rylov // Proceedings of the Third International Forum on Strategic Technologies (IFOST-2008), Novosibirsk-Tomsk, Russia, June 23–29, 2008. – Novosibirsk: NSTU Publ., 2008. – Vol. 1. – P. 462–464.
17. Повышение эффективности работы системы электроснабжения троллейбуса / В. В. Бирюков, В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, Е. А. Спиридонов, С. А. Евдокимов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2007. – № 12. – С. 19–23.
18. T-Bus Power Supply System Optimization by the Criterion of Process Energy Loss Minimization / V. V. Biryukov, V. I. Sopov, S. A. Evdokimov, Y. A. Prokushev, E. A. Spiridonov // Proceeding of the Second International Forum on Strategic Technology (IFOST-2007), October 3–5, 2007, Ulanbaatar, Mongolia / Mongolian Univ. of Science and Technology. – Ulanbaatar, 2007. – Vol. 1. – P. 449–451.



19. *Sopov V. I.* Definition of the optimum connection circuit of the partitioned sine of the contact network of the direct current of city passenger electric transport to the power supply / V. I. Sopov, V. V. Biryukov // KORUS–2005: the 9 Russian-Korean International Symposium on Science and Technology: proceedings, Novosibirsk, Russia, 26 june – 2 july 2005. – Novosibirsk: NSTU Publ., 2005. – Vol. 1. – P. 396–399.

20. *Бирюков В. В.* Определение оптимальной схемы подключения участка контактной сети постоянного тока горэлектротранспорта к источнику питания / В. В. Бирюков, В. И. Сопов // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2007. – № 3 (31). – С. 61–67.

21. Повышение эффективности использования электрической энергии в субподсистеме электрического транспорта / Н. И. Щуров, В. И. Сопов, Ю. А. Прокушев, А. А. Штанг // Совершенствование технических средств электрического транспорта. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – Вып. 3. – С. 6–20.



## ГЛАВА 3

### ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГИИ НА ПОДВИЖНОМ СОСТАВЕ С АВТОНОМНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

**Р**ассмотренные выше транспортные средства с тяговым электрическим приводом далеко не исчерпывают всего перечня видов грузового и пассажирского транспорта, используемого для перевозок как в населенных пунктах, так и между регионами внутри страны и за рубежом.

Некоторые из них, как, например, электромобили, появились гораздо раньше извечного их конкурента — автомобиля. Как известно, принципиальное отличие между ними заключается в различных источниках энергии для тягового привода и типе двигателя, преобразующего эту энергию в механическую. Но есть у них и общая черта — источник энергии для движения располагается на борту транспортного средства. У электромобилей — это аккумулятор, топливный элемент или преобразователь лучистой энергии (солнечная батарея). У автомобиля — тепловой двигатель, использующий какой-либо вид топлива путем сжигания его, как правило, в цилиндрах либо в реактивных двигателях (турбинах).

Относительно узкий, по сравнению с электрическими машинами, диапазон регулирования силы тяги и скорости вращения вала теплового двигателя привел к необходимости использовать в механической передаче тягового привода многоступенчатый редуктор с переменным передаточным числом, расширяющим этот диапазон до приемлемых границ. Но даже такое решение не позволило избавить энергетическую установку автомобиля от ряда недостатков, главные из которых:

- потеря (пусть и кратковременная) тягового усилия при переключениях коробки передач;

- неэкономичная работа теплового двигателя при разгоне даже при постоянном передаточном числе, поскольку оптимальному расходу горючего соответствует только одна точка на кривой зависимости крутящего момента от скорости;
- возможность остановки теплового двигателя при резком возрастании нагрузки.

Устранение этих недостатков виделось в совершенствовании энергетической установки посредством включения в схему привода электрического двигателя. Но это решение привело к необходимости использовать в энергетической установке и источник электрической энергии – тяговый электрический генератор, вал которого соединили с валом тепловой машины. Таким образом, появился новый вид транспорта – теплоэлектрический [1, 2]. В настоящее время существует достаточно большое количество различных видов как рельсового (например, тепловоз), так и безрельсового (например, большегрузные карьерные самосвалы) транспорта, который с успехом работает в тех случаях, когда нецелесообразно использовать транспорт на электрической тяге.

Здесь уместно напомнить, что помимо тепловых двигателей источником электрической энергии в энергетической установке могут быть и батареи топливных элементов. Однако, как показала практика, их целесообразность с позиций экономичности становится реальной при мощностях примерно несколько тысяч киловатт.

Стремление повысить экономичность работы энергетических установок электроподвижного состава с автономным источником энергии (аккумулятором) привело к появлению контактно-аккумуляторного транспорта, который может работать как от аккумулятора, так и от централизованного источника (контактной сети). В качестве примера можно привести такой вид транспорта, как троллейвоз.

### **3.1. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ**

Ухудшающаяся экологическая обстановка в населенных пунктах, обусловленная загазованностью воздушного бассейна, в том числе и выхлопными газами транспортных средств, приводит к необходимости искать пути снижения негативного воздействия на окружающую среду

факторов антропогенного характера [3]. Уменьшить выбросы в атмосферу выхлопных газов можно различными способами, основные из которых [4, 5, 6]:

- улучшение качества топлива;
- повышение коэффициента полезного действия применяемых силовых энергетических установок транспортных средств;
- применение схмотехнических решений, обеспечивающих снижение потребления углеводородного топлива;
- отказ от использования в силовых установках двигателей внутреннего сгорания.

Повысить коэффициент полезного действия применяемых силовых энергетических установок транспортных средств вряд ли удастся, поскольку к настоящему времени их реальный КПД приблизился к теоретически возможному значению, и ожидать скачкообразного его повышения не приходится.

Улучшение качества топлива способствует некоторому снижению уровня токсичности выхлопных газов, однако не может привести к полной нейтрализации вредных веществ в них.

Отказ от использования в силовых установках двигателей внутреннего сгорания на наземных транспортных средствах и замена их электрическими двигателями реально возможны после создания источника питания с высокими удельными энергетическими показателями. Определенные успехи здесь достигнуты, но до окончательного решения этой проблемы далеко.

Наиболее приемлемым способом снижения выбросов являются разработка и применение схмотехнических решений, обеспечивающих уменьшение потребления углеводородного топлива. Необходимо отметить, что в последнее время в этом направлении работают ведущие производители автомобилей большинства стран мира. Основным решением проблемы стало применение комбинированной энергетической установки (называемой иногда гибридной), в которой механическая энергия, передаваемая на движущие колеса, вырабатывается тепловым и электрическим двигателями.

Общеизвестно, что наибольший расход топлива и наименьший КПД установки с тепловым двигателем наблюдаются в начальной стадии разгона транспортного средства. И хотя применение автоматических коробок передач несколько повышает экономичность работы

двигателя независимо от квалификации водителя, существенно снизить выброс в атмосферу не сгоревшего полностью топлива не позволяет.

Решение проблемы большинству разработчиков видится в использовании на начальной стадии пуска электрического двигателя, помогающего осуществить разгон до определенной скорости. Однако такое решение не является единственно возможным. Поэтому рассмотрим различные варианты решений и оценим их по критериям массогабаритных и стоимостных показателей с учетом уменьшения расхода топлива.

Структурная схема тягового привода с гибридной силовой установкой (рис. 3.1), позволяющей осуществить движение при включении на первом этапе электрического, а на следующем – теплового двигателя (так называемая «последовательная схема»), включает в себя: ИЭЭ – источник электрической энергии; Пр – преобразователь; ЭМП – электромеханический преобразователь (электродвигатель); МП – механическую передачу (трансмиссия); Д – движитель (колесо); ТД – тепловой двигатель.

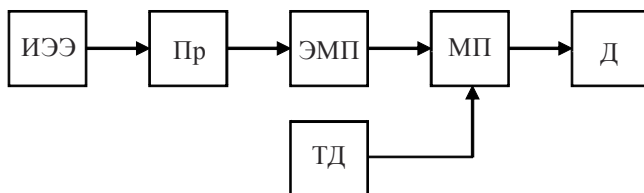


Рис. 3.1. Структурная схема гибридной силовой установки с последовательной схемой включения двигателей

Отличительная особенность такого схемного решения в том, что энергия для электродвигателя запасается в источнике независимо от теплового двигателя, а приведение в движение транспортного средства осуществляется обоими двигателями через одну механическую передачу.

В режиме пуска транспортное средство при помощи электродвигателя разгоняется до скорости примерно 20 км/ч (соответствует скорости достижения автоматической характеристики электродвигателя). При этом двигатель потребляет электроэнергию от накопителя, в который она поступает в процессе торможения подвижного состава, когда электродвигатель переводится в генераторный режим. По достижении скорости 20 км/ч такой динамический показатель, как ускорение,

начинает уменьшаться в силу специфики автоматической характеристики электродвигателя, для которого характерно снижение тягового усилия по мере увеличения скорости при разгоне по характеристике.

Дальнейшее движение целесообразно осуществлять при работе теплового двигателя, так как диапазон изменения частоты вращения его вала способствует наращиванию тягового усилия и поддержанию необходимого ускорения. Как известно, трансмиссия транспортного средства содержит коробку передач, с помощью которой производится изменение передаточного числа, что и позволяет тепловому двигателю работать в диапазоне оптимальных скоростей. Подключение теплового двигателя к механическому приводу по достижении определенной скорости, во-первых, уменьшает количество переключений в механической передаче при разгоне, а следовательно, ведет к более экономичному потреблению топлива и, во-вторых, уменьшает расход топлива, поскольку при остановке транспортного средства тепловой двигатель может не работать (даже на холостом ходу).

На рис. 3.2 показана структурная схема тягового привода, включающая в себя энергетическую установку на базе теплового двигателя и генератора Г, питающую электроэнергией тяговый электродвигатель.

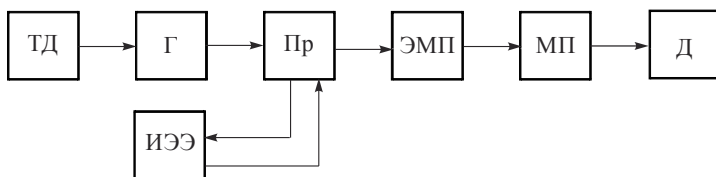


Рис. 3.2. Структурная схема гибридной силовой установки с дизель-генератором

Разгон транспортного средства осуществляется только при помощи электродвигателя. В начальной стадии пуска потребление энергии может производиться по одному из двух вариантов: от накопителя ИЭЭ, а затем – от генератора Г либо одновременно от двух источников – ИИЭ и Г. Второй вариант предпочтительнее, поскольку тепловой двигатель работает постоянно и отсутствует переходный процесс от режима его работы на холостом ходу к рабочему.

В режиме выбега, пока электродвигатель не потребляет энергию, а транспортное средство движется за счет накопленной кинетической энергии, вырабатываемая генератором электроэнергия поступает в

накопитель, заряжая его. Кроме того, энергия в накопитель поступает и в процессе торможения подвижного состава, когда электродвигатель переводится в генераторный режим.

На рис. 3.3 приведена структурная схема тягового привода, аналогичная схеме рис. 3.2, но в ней потребителем электроэнергии являются мотор-колеса.

Режим работы гибридной силовой установки аналогичен рассмотренному выше с той лишь разницей, что из схемы исключаются такие элементы механической части привода, как карданный вал и центральный редуктор, создающие дополнительные вибрации кузова и уменьшающие клиренс транспортного средства, что очень важно при разработке транспортных средств с низким уровнем пола. Редуктор, который в большинстве случаев необходим для согласования угловых скоростей двигателя и колеса, является составной частью мотор-колеса.

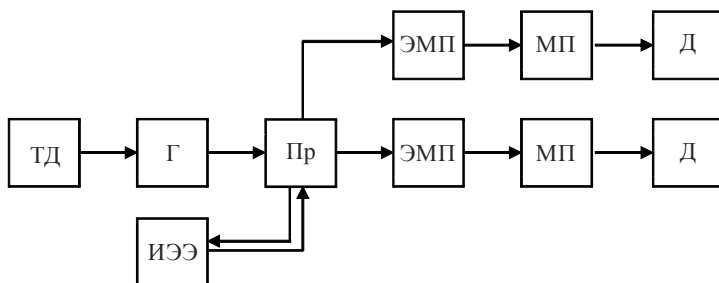


Рис. 3.3. Структурная схема гибридной силовой установки с мотор-колесным приводом

На рис. 3.4 показана структурная схема тягового привода с гибридной силовой установкой, аналогичная схеме рис. 3.1, в которой валы электрического и теплового двигателей соединены жестко и приводят в движение транспортное средство через механическую передачу.

В режиме пуска, в отличие от первого схемного решения, транспортное средство разгоняется до скорости 20 км/ч под действием крутящих моментов, создаваемых как электродвигателем, так и тепловым двигателем (так называемая «параллельная схема»). В зависимости от соотношения мощностей двигателей по достижении 20 км/ч электродвигатель либо отключается, либо продолжает работать. При таком схемном решении механическая передача должна содержать редуктор

с изменяемым передаточным числом (коробку передач), что позволяет тепловому двигателю работать в диапазоне оптимальных скоростей.

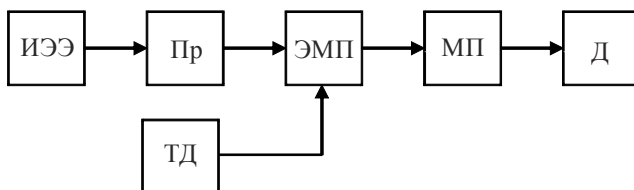


Рис. 3.4. Гибридная силовая установка с параллельной работой двигателей

Ниже в качестве примера приведен ориентировочный расчет всех перечисленных вариантов гибридной силовой установки автобуса полной массой  $m = 18$  тонн с асинхронным электродвигателем. В целях обеспечения объективности оценки энергопотребления для всех вариантов в качестве базовых исходных данных было принято условие неизменности длины расчетного перегона, средней скорости движения на перегоне и времени стоянки на остановочном пункте.

В первом варианте в режиме пуска транспортное средство разгоняется до скорости  $v_a = 20$  км/ч (соответствует скорости достижения автоматической характеристики электродвигателя) при помощи электродвигателя, который потребляет электроэнергию от накопителя. Сила тяги, необходимая для реализации пускового ускорения (принято равным  $a_n = 1,3$  м/с<sup>2</sup>) полностью нагруженного ЭПС, рассчитываются так [7]:

$$F = ma_n(1 + \gamma) + W_{20} = 18000 \cdot 1,3 \cdot 1,1 + 2448 = 28,5 \text{ кН}, \quad (3.1)$$

где  $\gamma = 0,1$  – коэффициент инерции вращающихся масс автобуса;

$W_{20} = 2448$  Н – среднее за время разгона до скорости 20 км/ч основное сопротивление движению.

Величина мощности электродвигателя, необходимая для реализации движения по такой схеме,

$$P = Fv_a = 28474 \cdot 5,5 = 158 \text{ кВт}, \quad (3.2)$$

где  $v_a = 5,5$  м/с – скорость достижения автоматической характеристики электродвигателя.



С учетом перегрузочной способности асинхронного двигателя (принимаемой равной 3) номинальная мощность электродвигателя составит  $P_{\text{ном}} = 53$  кВт. По достижении скорости движения 20 км/ч происходит замещение электродвигателя тепловым.

Тяговое усилие на ободе колеса при скорости  $v = 60$  км/ч, необходимое для преодоления сил сопротивления движению, составит согласно (3.1)

$$F = W = 4,75 \text{ кН},$$

а величина мощности теплового двигателя для реализации такого усилия согласно (3.2):

$$P = Fv = 4,75 \cdot 10^3 \cdot 16,7 = 79 \text{ кВт}.$$

Для реализации ускорения  $a = 0,3 \text{ м/с}^2$  на скорости 60 км/ч необходимое тяговое усилие на ободе колеса в соответствии с (3.1) составит

$$F = ma(1 + \gamma) + W = 18000 \cdot 0,3(1 + 0,1) + 4752 = 10,7 \text{ кН},$$

а требуемая для этого мощность теплового двигателя:

$$P = Fv = 10,7 \cdot 10^3 \cdot 16,7 = 179 \text{ кВт}.$$

Номинальная же мощность электродвигателя при этом составит только 53 кВт (с учетом перегрузочной способности).

Расчеты, аналогичные произведенному выше, дали результаты, сведенные в табл. 3.1.

Т а б л и ц а 3.1

| Параметр                      | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 | Вариант 4 | Вариант 5 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Мощность ТД, кВт              | 179       | 34        | 35        | 122       | —         |
| Мощность ЭМП, кВт             | 53        | 90        | 2/45      | 19        | 90        |
| Расход энергии, л             | 0,31      | 0,14      | 0,17      | 0,238     | —         |
| Расход энергии, Вт · ч        | —         | —         | —         | —         | 594       |
| Стоимость энергии, руб.       | 9,46      | 4,17      | 4,62      | 7,04      | 3,57      |
| Стоимость установки, млн руб. | 1,314     | 4,059     | 4,518     | —         | —         |

Для объективного сравнения энергоэффективности каждого из вариантов схемных решений были выполнены расчеты расхода энергии на движение на перегоне 450 м при условии сохранения средней скорости движения на нем подвижного состава. В качестве дополнительного варианта рассмотрен подвижной состав с электрическим приводом (вариант 5).

Тягово-энергетические расчеты для транспортного средства, оснащенного тяговым электроприводом, показали, что в процессе пуска на расстоянии 88 м подвижной состав разгоняется до скорости 47 км/ч за 12 с, потребовав при этом на разгон 594,2 Вт · ч электроэнергии. В процессе торможения электродвигатель, переведенный в генераторный режим, позволяет вернуть в источник 227,2 Вт · ч энергии.

Для первого варианта гибридной силовой установки, когда электродвигатель выполняет разгон до 20 км/ч, а дальнейшее движение осуществляется посредством теплового двигателя, потребленная при пуске энергия составила 671,8 Вт · ч, а возвращенная в режиме торможения – 193,1 Вт · ч. Расход же углеводородного топлива на перегоне составил 0,32 литра.

Во втором варианте разгон транспортного средства осуществляется только при помощи электродвигателя, потребляющего энергию от генератора и накопителя энергии. Расход электроэнергии на движение в этом случае совпадает с вариантом тягового электропривода, а с учетом потерь в генераторе – выше и составляет 714,17 Вт · ч. Вместе с тем постоянная работа теплового двигателя как во время движения, так и на остановочных пунктах приводит к необходимости расхода топлива в объеме 0,14 л.

В третьем варианте расход электроэнергии на нужды тяги возрастает еще больше по сравнению со вторым, поскольку общий КПД привода транспортного средства снижается вследствие одновременной работы двух электродвигателей. Расход энергии на движение составляет 732,9 Вт · ч. Возрастает и расход топлива для теплового двигателя до 0,17 л.

Для определения оптимального соотношения мощностей теплового и электрического двигателей в четвертом варианте силовой энергетической установки были произведены расчеты, графическое отображение которых дано на рис. 3.5.



Для поиска оптимальной величины соотношения мощностей электрического и теплового двигателей ( $P_{\text{ЭМП}}/P_{\text{ТД}}$ ) были просчитаны варианты, в которых это соотношение составляло: 10/90, 23/77, 30/70, 40/60, 45/55, 50/50, 70/30. Результаты расчетов сведены в табл. 3.2.

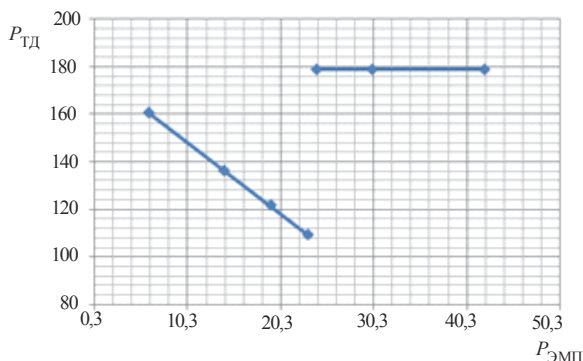


Рис. 3.5. Зависимость оптимального соотношения  $P_{\text{ТД}}$  и  $P_{\text{ЭМП}}$

Таблица 3.2

| Параметр                | 10/90 | 23/77 | 30/70 | 39/61 | 40/60 | 50/50 | 70/30 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Мощность ТД, кВт        | 161   | 137   | 122   | 110   | 179   | 179   | 179   |
| Мощность ЭМП, кВт       | 6     | 14    | 19    | 23    | 24    | 30    | 42    |
| Расход энергии, л       | 0,305 | 0,259 | 0,238 | 0,212 | 0,299 | 0,307 | 0,393 |
| Стоимость энергии, руб. | 8,99  | 7,66  | 7,04  | 6,27  | 8,85  | 9,07  | 11,62 |

При соотношении мощностей электрического и теплового двигателей 10/90 тяговый электродвигатель не способен обеспечить тормозное замедление  $1,3 \text{ м/с}^2$ . При использовании соотношения мощностей более 39/61 энергии накопителя не хватает, чтобы обеспечить оптимальную параллельную работу электротягового и теплового двигателей. Таким образом, оптимальная величина соотношения мощностей лежит в пределах 30/70...39/61.

Предварительные расчеты четырех вариантов схемного исполнения гибридных силовых установок выявили, что в городском цикле наиболее приемлемый вариант – использование гибридной силовой установки с дизель-генератором. Такое решение позволяет транспортному средству иметь более низкий расход топлива в сравнении с авто-

транспортными средствами, оснащенными только тепловыми двигателями. Кроме того, данные автомобили обеспечивают выполнение норм экологической безопасности на транспорте, включая снижение выбросов токсичных веществ в атмосферу и транспортного шума. На сегодняшний день существенными недостатками силовой установки с дизель-генератором являются увеличенные массогабаритные и стоимостные показатели по сравнению с другими вариантами схемотехнических решений. Структурная схема гибридной силовой установки с дизель-генератором может быть реализована следующим образом (рис. 3.6).

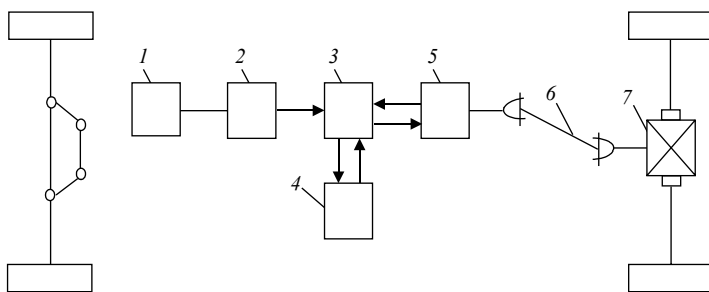


Рис. 3.6. Структурная схема гибридной силовой установки с дизель-генератором

Основные элементы тягового привода: 1 – тепловой двигатель; 2 – генератор; 3 – преобразователь; 4 – накопитель энергии; 5 – электро-механический преобразователь (электрический двигатель); 6 – карданный вал; 7 – редуктор с дифференциалом.

В загородном цикле, т. е. при движении с установившейся скоростью, наиболее приемлемый вариант – это использование гибридной силовой установки с последовательной работой двигателей. Энергетическая установка, собранная по такой схеме, позволяет транспортному средству поддерживать постоянное тяговое усилие на ободу колеса (двигаться с постоянной заданной скоростью) при пониженном расходе топлива. Кинематическая схема гибридной силовой установки с параллельной работой двигателей показана на рис. 3.7.

Схема включает в себя: 1 – тепловой двигатель; 2 – планетарный редуктор; 3 – накопитель энергии; 4 – преобразователь; 5 – электро-механический преобразователь; 6 – карданный вал; 7 – дифференциал.

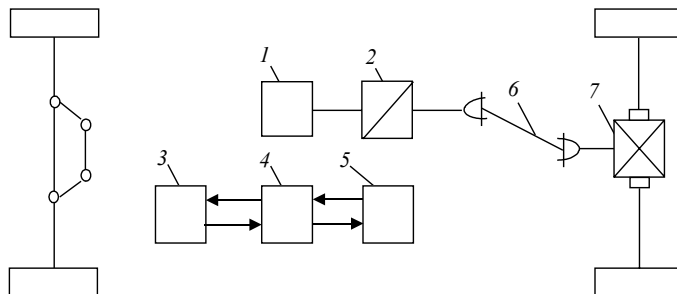


Рис. 3.7. Кинематическая схема гибридной силовой установки с параллельной работой двигателей

Проведенные исследования подтверждают целесообразность использования на транспортных средствах с тепловыми двигателями комбинированных силовых энергетических установок, включающих в себя тепловой и электрический двигатели, соотношение величин мощности которых лежит в строго определенном диапазоне.

### 3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Экономичная работа привода любого транспортного средства обусловлена целым рядом факторов как объективного, так и субъективно-го плана, основными из которых являются:

- состояние путевой структуры;
- техническое состояние элементов привода и подвижного состава в целом;
- погодные условия;
- квалификация водителя и т. д.

Вместе с тем одним из основополагающих моментов, определяющих впоследствии экономичность его работы, становится использование на транспортном средстве тягового двигателя оптимальной мощности. Действительно, при недостаточной мощности двигателя приемлемые динамические показатели достигаются, как правило, в результате форсировки режимов его работы, что сопровождается повышенным расходом энергии, вызванным снижением КПД привода.

Применение двигателя большой мощности также ведет к перерасходу энергии, но уже вследствие малых значений КПД энергетической



установки, работающей в режиме недоиспользования мощности. Такая ситуация характерна для приводов как с электрическими машинами, так и с тепловыми.

Общеизвестно, что для городского пассажирского транспортного средства, оснащенного электроприводом, при классической схеме движения различают три фазы: пуск, выбег, торможение. При этом энергия, необходимая для движения на всем перегоне, потребляется на стадии пуска и расходуется на преодоление сил сопротивления движению, а также накапливается в виде кинетической энергии подвижного состава.

Графики, отражающие такую схему движения транспортного средства с электроприводом в виде зависимостей  $v(t)$  и  $v(l)$ , получившие название «кривые движения», показаны на рис. 3.8, а [7].

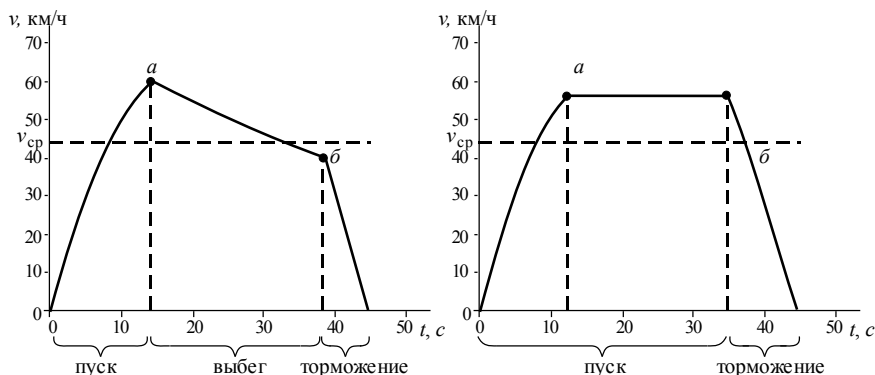


Рис. 3.8. Кривые движения транспортных средств:

$a$  – с электроприводом;  $b$  – с тепловым двигателем

Для транспортного средства, оснащенного приводом с тепловым двигателем, кривые движения имеют вид, представленный на рис. 3.8, б. Обе кривые построены для перегона одной длины при условии равенства средних скоростей движения на нем для обоих вариантов исполнения приводов.

При сопоставлении кривых движения выясняется, что характер энергопотребления в обоих вариантах принципиально различается:

- для подвижного состава с электроприводом характерно потребление энергии во время пуска и возврат (рекуперация) во время торможения;

- для подвижного состава с тепловым двигателем характерно потребление энергии (топлива) во всех фазах движения, а также во время стоянки на остановочном пункте.

Из рисунков видно, что независимо от типа привода в кривых движения присутствуют две характерные точки: точка *a*, в которой приводной мотор развивает максимальную мощность, и точка *b*, с которой начинается процесс торможения.

Развиваемая двигателем в процессе пуска мощность позволяет подвижному составу преодолевать сопротивление движению и получать необходимое ускорение. Для подвижного состава с электроприводом в соответствии с рис. 3.8, *a* после перехода на выбег (точка *a* кривой движения) тяговое усилие исчезает, а движение происходит по инерции за счет накопленной кинетической энергии. Для подвижного состава с тепловым двигателем в точке *a* происходит переход в режим поддержания постоянства скорости, при котором развиваемая двигателем мощность позволяет транспортному средству преодолевать только силы сопротивления движению.

В процессе торможения подвижного состава с электродвигателем появляется возможность возврата части потребленной при пуске энергии за счет рекуперации. Необходимым условием обеспечения режима рекуперативного торможения будет использование накопителя электрической энергии [8, 9]. При оснащении транспортного средства приводом с тепловым двигателем торможение происходит только с помощью механического тормоза.

Таким образом, даже поверхностное сопоставление экономичности рассматриваемых вариантов дает основание сделать предположение о целесообразности использования на транспорте тяговых электроприводов.

Вместе с тем следует отметить, что до настоящего времени нет однозначного ответа на вопрос, каким образом следует определить оптимальную величину мощности тягового двигателя. Естественно предположить, что мощность зависит от вместимости подвижного состава. Но каков характер этой зависимости – неизвестно. И если в области электрического транспорта в свое время были предприняты попытки теоретически обосновать определение мощности тягового электродвигателя [10], то для пассажирского транспорта с тепловым двигателем такого обоснования не разрабатывалось. Здесь надо сказать, что, хотя



для электрического транспорта и были разработаны рекомендации, они не давали однозначного ответа на вопрос, оптимальна или нет величина мощности для подвижного состава данной вместимости [11].

Немаловажным фактором, влияющим на расход энергии на движение, является длина перегона, оптимальное значение которой по критерию минимума расхода энергии на движение для наземного электрического транспорта согласно [12] составляет  $L_{\text{пер}} = 550$  м. Это величина и была положена в основу при расчете расхода энергии на движение транспортного средства как с электроприводом, так и с тепловым двигателем.

В соответствии с изложенным выше максимальная потребная величина мощности  $P$  для реализации движения в точке  $a$  кривой определяется как

$$P = (F_{\text{т}} - W)v_a = [(1 + \gamma)m_{\text{ПС}}a_{\text{пуск}} - W]v_a, \quad (3.3)$$

где  $F_{\text{т}}$  – развиваемое усилие тяги на обод колеса;

$W$  – сила сопротивления движению (в качестве примера кривая зависимости удельного сопротивления движению для троллейбуса приведена на рис. 3.9);

$\gamma = 1,12 \dots 1,14$  – коэффициент инерции вращающихся масс экипажа;

$m_{\text{ПС}}$  – масса подвижного состава;

$a_{\text{пуск}}$  – ускорение при пуске;

$v_a$  – скорость в точке  $a$ .

При этом накопленная подвижным составом механическая энергия определяется по известному выражению

$$A_{\text{мех}} = (1 + \gamma)m_{\text{ПС}}v_a^2 / 2. \quad (3.4)$$

Мощность же, реализуемая двигателем для разгона подвижного состава с ускорением  $a_{\text{пуск}}$  с учетом КПД передачи, определяется выражением

$$P_{\text{дв}} = (P + Wv_a) / \eta_{\text{дв}}\eta_{\text{МП}}, \quad (3.5)$$

где  $\eta_{\text{дв}}$  – КПД двигателя;

$\eta_{\text{МП}}$  – КПД механической передачи.

Дальнейший анализ кривых движения показывает, что, во-первых, скорость подвижного состава с электродвигателем в точке  $a$  выше, чем



у того, который оснащен тепловым, и, во-вторых, величины скорости начала торможения также различны. Для подвижного состава с электроприводом скорость в точке *б* ниже, чем у того, который оснащен тепловым двигателем. Механическая энергия, накопленная транспортными средствами с электрическим ( $A_{\text{мехТЭД}}$ ) и тепловым двигателем ( $A_{\text{мехТД}}$ ) в точке *а*, согласно (3.4) составит соответственно:

$$A_{\text{мехТЭД}} = 1,12 \cdot 13200 \cdot 17^2/2 = 2136 \text{ кДж}$$

и

$$A_{\text{мехТД}} = 1,12 \cdot 13200 \cdot 16^2/2 = 1892 \text{ кДж.}$$

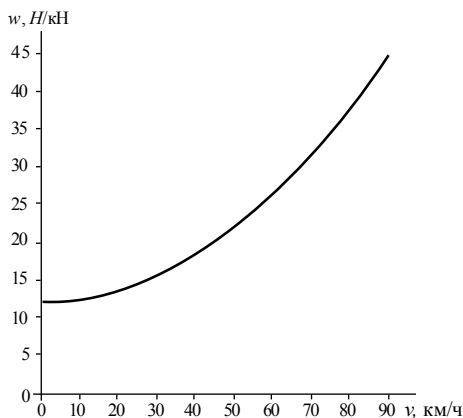


Рис. 3.9. Кривая зависимости удельного сопротивления движению для троллейбуса

Здесь следует отметить, что несмотря на более высокую скорость конца режима пуска транспортного средства с электроприводом, номинальная мощность тягового электродвигателя благодаря его перегрузочной способности, как правило, в 2 раза меньше для приводов с двигателем постоянного тока и в 3 – с двигателем переменного тока. В связи с этим номинальная мощность тягового электродвигателя определяется как

$$P_{\text{ТЭД ном}} = P_{\text{дв}}/k_{\text{пер}}, \quad (3.6)$$

где  $k_{\text{пер}}$  – коэффициент перегрузочной способности электродвигателя.

Анализ выражения (3.3) показывает, что мощность двигателя на стадии пуска определяется главным образом величиной пускового ускоре-



ния. Для подтверждения этого факта воспользуемся в качестве примера расчетом мощности тягового двигателя для транспортного средства массой 13,2 т. На городском электрическом транспорте среднее пусковое ускорение принимается обычно равным  $a_{\text{пуск}} = 1,5 \text{ м/с}^2$ , однако реальное его значение в приводах с двигателями постоянного тока изменяется в соответствии с зависимостью, показанной на рис. 3.10.

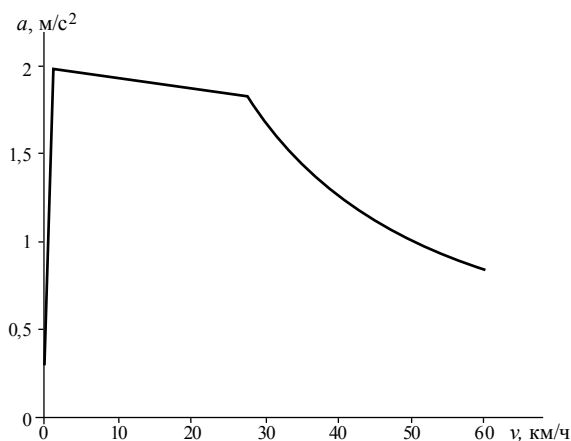


Рис. 3.10. Кривая изменения ускорения в функции скорости

С учетом сказанного максимальные потребные величины мощности  $P_{\text{ТЭД}}$  и  $P_{\text{ТД}}$  для реализации движения в точке  $a$  кривой движения для электрического и теплового двигателей, рассчитанные в соответствии с (3.3):

$$P_{\text{ТЭД}} = [1,12 \cdot 13200 \cdot 0,84 - 13,2 \cdot 9,8(12 + 0,004 \cdot 60^2)]17 = 153 \text{ кВт},$$

$$P_{\text{ТД}} = [1,12 \cdot 13200 \cdot 0,9 - 13,2 \cdot 9,8(12 + 0,004 \cdot 56^2)]16 = 162 \text{ кВт}.$$

Значения  $F_t$  и  $W$  для варианта привода с электродвигателем составляют соответственно 12419 Н и 3415 Н, для привода с тепловым двигателем – 13306 Н и 3195 Н. При этом скорости в точке  $a$  согласно рис. 3.8 равны  $v_{\text{ТЭД}} = 17 \text{ м/с}$  и  $v_{\text{ТД}} = 16 \text{ м/с}$ .

Мощность же двигателей, необходимая для разгона подвижного состава, при использовании в качестве тягового электродвигателя переменного тока и рассчитанная в соответствии с (3.5) и (3.6):



$$P_{\text{ТЭД ном}} = (153 + 3415 \cdot 17 \cdot 10^{-3}) / 0,97 \cdot 0,98 \cdot 3 = 74 \text{ кВт},$$

а теплового –  $P_{\text{ТД ном}} = (162 + 3195 \cdot 16 \cdot 10^{-3}) / 0,98 = 217 \text{ кВт}$ .

Для определения оптимальной мощности теплового двигателя воспользуемся следующим приемом. Построим зависимость расхода энергии на движение в удельной форме, для чего подвижной состав оснастим двигателями различной мощности и для каждого варианта строим кривые движения  $v(t)$ , определяем расход энергии на движение и величину удельного расхода энергии, эквивалентной электрической.

На рис. 3.11 приведены кривые движения для транспортного средства массой 13,2 т с тепловыми двигателями от 191 до 217 кВт, движущегося на принятом перегоне  $L_{\text{пер}} = 550 \text{ м}$ .

По результатам расчетов расхода энергии на движение транспортным средством с различными по мощности тепловыми двигателями построена зависимость удельного расхода энергии  $A_{\text{уд}}$  в функции мощности двигателя  $P$  (рис. 3.12).

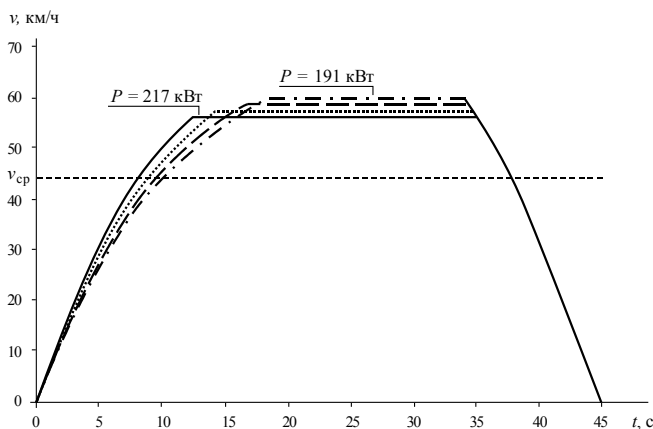


Рис. 3.11. Кривые движения транспортного средства с тепловым двигателем различной мощности

Анализ кривых движения и удельного расхода энергии на нужды тяги демонстрирует снижение удельного расхода энергии при увеличении мощности теплового двигателя.

Для реализации экономичной работы энергетической установки транспортного средства целесообразно использовать на нем двигатели



внутреннего сгорания, электрическую машину с преобразователем и буферный накопитель энергии, позволяющий оптимизировать режимы работы как двигателя внутреннего сгорания, так и электрической машины.

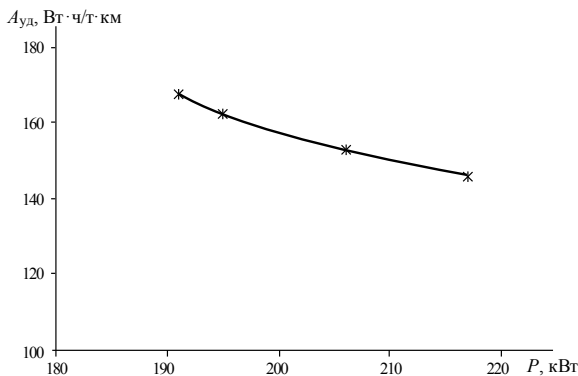


Рис. 3.12. Зависимость удельного расхода энергии  $A_{уд}$  в функции мощности двигателя  $P$

Критерии для определения величины мощности электрического двигателя вытекают из выполнения следующих условий.

1. *Обеспечение реализации необходимого замедления при торможении.* В этом случае при рекуперации двигатель развивает мощность, обеспечивающую регламентированное замедление. Для подвижного состава горэлектротранспорта обычно принимается  $a_{\text{торм}} = a_{\text{пуск}} = 1,5 \text{ м/с}^2$ .

2. *Обеспечение реализации необходимого ускорения при пуске.* При этом двигатель полностью расходует электроэнергию от накопителя, в который она поступает в процессе торможения подвижного состава.

В режиме пуска, как уже говорилось выше, возможны два варианта исполнения движения:

- транспортное средство разгоняется при помощи электродвигателя, мощность которого определена из условия обеспечения режима торможения. В этом случае разгон его до определенной скорости осуществляется с худшими динамическими показателями (кривая 2 на рис. 3.13);
- транспортное средство при помощи электродвигателя разгоняется до определенной скорости с требуемыми динамическими показате-



лями (кривая 1 на рис. 3.13). При этом требуемая величина мощности электродвигателя больше, чем определенная по режиму торможения.

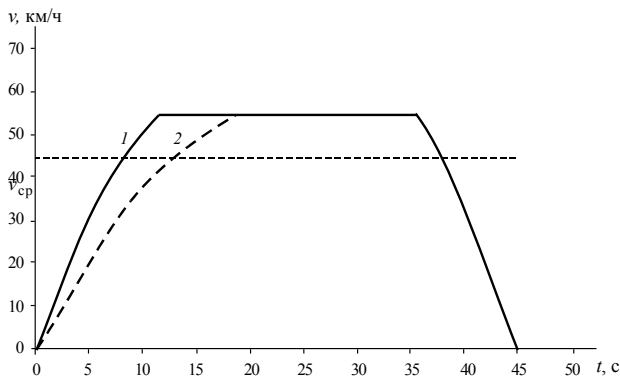


Рис. 3.13. Кривые движения при различных мощностях двигателя

В обоих случаях дальнейший разгон до установившейся скорости необходимо осуществлять с помощью теплового двигателя.

Для оценки величины мощности электрического двигателя транспортного средства с принятой массой произведен расчет ее значения для режима торможения с рекуперацией энергии в накопитель. Для обеспечения режима торможения со скорости 16 м/с должна развиваться мощность ( $P_{рек}$ ):

$$P_{рек} = A_{рек}/t = A_{торм}/t - A_{кин}/t = 1,12 \cdot 13,2 \cdot 16^2/2 \cdot 9,1 - \\ - 1,12 \cdot 13,2 \cdot 1,4^2/2 \cdot 0,7 = 178 \text{ кВт},$$

где  $A_{кин}$  – кинетическая энергия, которой обладает подвижной состав к моменту прекращения процесса рекуперации (5...7 км/ч) и замещения электрического торможения механическим.

Так как на тормозящий подвижной состав действуют тормозные усилия, создаваемые электродвигателем и окружающей средой, то

$$P_{дв} = P_{рек} - P(W) = 178 - 26 = 152 \text{ кВт},$$

где  $P(W)$  – в соответствии с рис. 3.13 может быть определена с достаточной степенью точности как средняя величина в интервале скоростей от 60 ( $W_{60}$ ) до 5 км/ч ( $W_5$ ):



$$P(W) = [P(W_{60}) + P(W_5)]/2 = 26 \text{ кВт},$$

а номинальная мощность двигателя переменного тока в соответствии с (3.5 и 3.6) –

$$P_{\text{ТЭД ном}} = 152/0,97 \cdot 0,98 \cdot 3 = 53 \text{ кВт},$$

что существенно меньше ранее найденной величины мощности в режиме пуска.

Таким образом, в целях уменьшения расхода горючего на транспортных средствах, оснащенных тепловыми двигателями, целесообразно использовать тяговые электрические двигатели с накопителем электрической энергии. Мощности электрического и теплового двигателей могут быть определены согласно предложенной методике.

### 3.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

Одним из радикальных путей уменьшения расхода энергии на движение транспортных средств является, как указывалось ранее, использование энергии торможения [7, 13, 14]. Реализация этого пути возможна в тех случаях, когда для нужд тяги на подвижном составе установлена электрическая машина, как это делается на электрическом и теплоэлектрическом подвижном составе. При этом на теплоэлектрическом транспортном средстве возможно использование накопленной энергии при повторном пуске, а на электроподвижном составе к тому же появляется возможность возврата энергии в источник питания (рекуперация). Независимо от варианта использования энергии оба они требуют установки накопителей электрической энергии на подвижном составе, в системе электроснабжения или в их комбинации.

На теплоэлектрическом подвижном составе рекуперативное торможение невозможно без применения накопителя, в качестве которого могут быть использованы аккумуляторные батареи либо конденсаторы. Энергия рекуперации способствует существенному снижению потребления топлива тепловым двигателем энергетической установки подвижного состава, что заметно улучшает экологическую обстановку в населенных пунктах. Не случаен поэтому интерес производителей автомобильного транспорта к использованию в приводе электрической машины.

Поскольку, как отмечалось выше, в качестве накопителя энергии могут применяться различные устройства, возникает вопрос о типе накопителя, отвечающего как техническим, так и экономическим требованиям. К техническим относятся такие, как соответствие параметров накопителя (прежде всего величины электрической емкости) объемам возвращаемой энергии, минимальные массогабаритные показатели, удовлетворительный срок службы и ряд других. К экономическим – минимальное удорожание транспортного средства, срок окупаемости и т. д.

Анализ возможности применения накопителей различного типа на транспортных средствах показал, что на подвижном составе, оснащенном приводом с электрической машиной, накопителями могут служить [13]:

- аккумулятор;
- конденсатор;
- их комбинация.

Так как в настоящее время производится достаточно большое количество гальванических аккумуляторов, различающихся и по составу компонентов, и по характеристикам, то рассматриваются те из них, которые наиболее полно отвечают требованиям эксплуатации на подвижном составе.

Основой для расчета и выбора типа аккумулятора служит величина электрической энергии, которую необходимо запасти в процессе электрического торможения для последующего использования ее при пуске.

Первая проблема, с которой сталкиваются проектировщики накопителя электрической энергии, – это определение величины напряжения, на которое следует рассчитывать накопитель. Обусловлено это тем, что в соответствии с существующими нормативами напряжение питания, например в контактной сети троллейбуса, меняется в интервале от  $U_{\min} = 420$  В до  $U_{\max} = 720$  В при номинальном напряжении на двигателе в  $U_{\text{ном}} = 550$  В [14].

Аналогичная ситуация наблюдается и на других видах электрического транспорта.

Поскольку для надежной работы электрохимического накопителя энергии напряжение на нем в период зарядки не должно превышать допустимого значения, за расчетное значение для аккумуляторов, работающих на электроподвижном составе, принимают величину  $U_{\max}$ .



Для теплоэлектрического подвижного состава регламентирующей величиной является номинальное напряжение двигателя  $U_{\text{ном}}$ , которое согласно [7] может быть поднято на 10 % в случае применения импульсного регулирования напряжения, подводимого к тяговому двигателю.

Вторая проблема, связанная с расчетной величиной напряжения, заключается в определении количества последовательно включенных гальванических элементов в аккумуляторной батарее. Общеизвестно, что в процессе потребления энергии от аккумулятора происходит не только его разряд, но и понижение напряжения на его зажимах, что вызвано спецификой его работы и нашло отражение на рис. 3.14. Верхняя граница зоны определяется кривой напряжения при максимальной величине заряда аккумулятора  $Q_{\text{max}}$ , нижняя ( $Q_{\text{min}}$ ) – минимальной величиной заряда, которая зависит от типа аккумулятора и обычно составляет 20...25 % от номинального значения заряда аккумулятора. В процессе зарядки величина максимально допустимого напряжения аккумулятора  $U_{\text{АБ max}}$  должна быть не ниже максимального напряжения источника питания, т. е.  $U_{\text{АБ max}} \geq U_{\text{max}}$ .

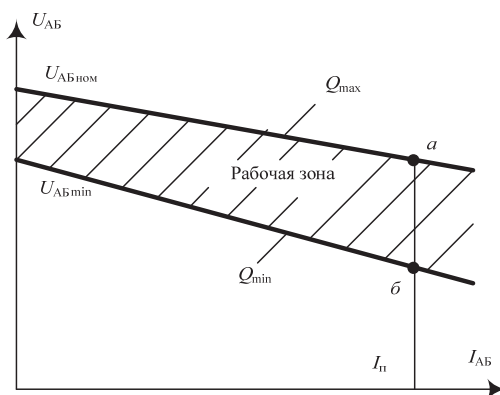


Рис. 3.14. Рабочая зона аккумулятора

Поскольку гальванические элементы обладают напряжением, значительно меньшим, чем номинальное напряжение тягового двигателя, для создания необходимого напряжения, как известно, используется последовательное включение элементов, образующих аккумуляторную батарею. Тогда количество последовательно включенных элементов в батарее  $n_{\text{посл}}$  определяется выражением

$$n_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{эл. max}}}, \quad (3.7)$$

где  $U_{\text{эл. max}}$  – максимально допустимое напряжение на элементе батареи.

Величина максимально допустимого напряжения  $U_{\text{эл. max}}$ , прикладываемого к элементу в момент его зарядки, отличается от номинального значения напряжения на нем  $U_{\text{эл. ном}}$ , превышая его, как правило, на 10...15 %. Так, в частности, при номинальном напряжении литий-ионного гальванического элемента  $U_{\text{эл. ном}} = 3,2$  В при его зарядке допускается приложение напряжения  $U_{\text{эл. max}} = 3,7$  В [15].

Третья проблема связана с определением величины электрической емкости аккумулятора, который должен обеспечить прием электрической энергии, вырабатываемой в процессе торможения. Здесь уместно напомнить, что эффективное торможение, т. е. торможение с регламентированным замедлением, которое принимается, в частности, на городском электрическом транспорте равным  $a_{\text{торм}} = 1,5$  м/с<sup>2</sup>, возможно при снижении скорости подвижного состава только до  $v_{\text{мех}} = 5...7$  км/ч [7]. Поэтому возврат накопленной транспортным средством энергии возможен в интервале скоростей от скорости начала торможения  $v_{\text{торм}}$  до скорости замещения электрического торможения механическим  $v_{\text{мех}}$ . Количество энергии, которое теоретически может быть возвращено в процессе торможения, рассчитывается по выражению

$$A_{\text{рек}} = A_{\text{кин}} = (1 + \gamma) \frac{m_{\text{ПС}} (v_{\text{торм}}^2 - v_{\text{мех}}^2)}{2},$$

где  $\gamma$  – коэффициент инерции вращающихся масс подвижного состава.

Количество энергии  $A_{\text{рек}}$ , возвращаемой в процессе торможения, определяется прежде всего величиной скорости начала торможения [12].

Проведенные тягово-энергетические расчеты показали, что для подвижного состава наземного городского электрического транспорта, совершающего движение по классической схеме «пуск–выбег–торможение», характерным является независимость скорости начала торможения от длины перегона, значение которой лежит в пределах  $v_{\text{торм}} = 29...31$  км/ч.

Накапливаемая за время электрического торможения  $t_{\text{торм. эл}}$  энергия определяется известным выражением



$$A_{\text{рек}} = UIt = U_{\text{max}} I_{\text{рек}} t_{\text{торм эл}} = U_{\text{АБ ном}} Q_{\text{max}}, \quad (3.8)$$

где  $t_{\text{торм эл}} = (v_{\text{торм}} - v_{\text{мех}})/a_{\text{торм}}$  – время торможения с замедлением  $a_{\text{торм}}$ ;  
 $I_{\text{рек}}$  – среднее значение тока рекуперации.

Перед началом процесса рекуперации минимальное значение энергии в аккумуляторе определяется величиной, рассчитываемой в соответствии с (3.8) и изложенными выше соображениями по формуле

$$A_{\text{АБ ост}} = Q_{\text{min}} U_{\text{АБ min}} = (0,2 \dots 0,25) Q_{\text{max}} U_{\text{АБ min}}.$$

После рекуперации энергия определяется согласно

$$A_{\text{АБ } \Sigma} = A_{\text{АБ ост}} + A_{\text{рек}} = Q_{\text{max}} U_{\text{АБ ном}}.$$

Тогда искомая емкость аккумулятора, выраженная в ампер-часах ( $A \cdot \text{ч}$ ),

$$Q_{\text{max}} = \frac{A_{\text{рек}}}{(1 - k_{\text{разр}} k_{\text{min}}) U_{\text{АБ ном}}}, \quad (3.9)$$

где  $k_{\text{разр}} = Q_{\text{min}}/Q_{\text{max}} = 0,2 \dots 0,25$ ;

$$k_{\text{min}} = U_{\text{АБ min}} / U_{\text{АБ ном}};$$

$$U_{\text{АБ ном}} = n_{\text{посл}} U_{\text{эл.ном}}.$$

Здесь уместно заметить, что на практике не исключаются случаи, когда процесс торможения начинается сразу после разгона подвижного состава до максимальной скорости  $v = v_{\text{max}}$  его движения на перегоне. Поэтому при расчете энергии рекуперации  $A_{\text{рек}}$  необходимо принимать эту скорость  $v_{\text{торм}} = v_{\text{max}}$ .

Определенные таким образом емкость гальванического элемента и их количество будут соответствовать назначению при условии равенства допустимого тока зарядки аккумулятора току рекуперации. Однако на практике это невыполнимо, поскольку номинальный ток заряда аккумулятора, при котором он сохраняет свою работоспособность в гарантированном заводом-изготовителем количестве циклов, определяется, как правило, величиной 10...20 % от величины емкости аккумулятора  $Q_{\text{АБ}}$ , выраженной в ампер-часах, т. е.

$$I_{\text{зар}} \approx (0,1 \dots 0,2) Q_{\text{АБ}}. \quad (3.10)$$

Для обеспечения данного условия приходится увеличивать емкость аккумулятора в  $k = I_{\text{рек}}/I_{\text{зар}}$  раз, что делает мало привлекательным его использование на подвижном составе в качестве накопителя вследствие больших массогабаритных показателей.

Применение форсированного режима заряда токами, в 2...3 раза превышающими номинальный ток заряда, резко сокращает срок службы аккумулятора, что делает его, несмотря на меньшие массогабаритные показатели, непрактичным с позиций эксплуатационных расходов.

Поскольку процесс рекуперации продолжается относительно небольшой промежуток времени (не более 8...9 секунд на подвижном составе городского наземного транспорта), в целях временного хранения энергии и последующей передачи ее в аккумулятор можно применить электрический конденсатор, подключаемый в тяговом приводе постоянного тока параллельно электрической машине. В случае использования, например, двигателя последовательного возбуждения вариант схемы подключения конденсатора, выполняющего роль буфера, а также регулятора величины зарядного тока аккумуляторной батареи, показан на рис. 3.15.

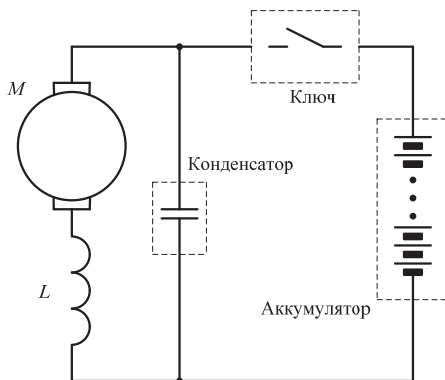


Рис. 3.15. Схема включения конденсатора

Принцип работы оборудования в режиме рекуперативного торможения, соединенного по приведенной схеме, заключается в следующем. Тяговый электродвигатель, переведенный в генераторный режим, заряжает подключенный параллельно ему конденсатор, а ключ, выполненный на базе силовых полупроводниковых приборов, регулирует величину зарядного тока в соответствии с требуемыми значениями.



Поскольку величина допустимого на коллекторе тяговой машины напряжения в режиме электрического торможения согласно [5] может достигать двойной по отношению к номинальному значению величины  $U_{\text{рек}} \approx 2U_{\text{ном}}$ , конденсатор, выбранный по этому параметру, будет обладать приемлемыми массогабаритными показателями.

Необходимая минимальная величина электрической емкости конденсатора  $C_K$  для принятия энергии рекуперации рассчитывается по известному соотношению

$$C_K = \frac{2A_{\text{рек}}}{U_{\text{рек}}^2}. \quad (3.11)$$

С учетом того, что в момент начала торможения напряжение на конденсаторе равно напряжению на аккумуляторе, величина остаточной энергии в нем определяется согласно

$$A_{C_{\text{ост}}} = \frac{C_K U_{\text{АБ min}}^2}{2}, \quad (3.12)$$

а величина энергии в конденсаторе после окончания процесса рекуперации может быть найдена по формуле

$$A_{C_{\Sigma}} = A_{\text{рек}} + A_{C_{\text{ост}}} = \frac{C_K U_{\text{рек}}^2}{2}.$$

Энергия в конденсаторе определена с некоторой допустимой погрешностью, поскольку не учитывалась доля энергии, принятая за время рекуперации аккумулятором.

После преобразования последнего выражения с учетом (3.11) величина электрической емкости  $C_K$  буферного конденсатора будет:

$$C_K = \frac{2(A_{\text{рек}} + A_{\text{ост}})}{U_{\text{рек}}^2} = \frac{2A_{\text{рек}}}{(4 - k_{\text{min}}^2)U_{\text{АБ ном}}^2}. \quad (3.13)$$

При ограничении величины напряжения на конденсаторе в процессе рекуперации уровнем  $U_{\text{огр}}$  следует увеличить его емкость до значения  $C'_K$  согласно выражению

$$C'_K = C_K \frac{U_{\text{рек}}^2}{U_{\text{огр}}^2}.$$

При снижении уровня напряжения на конденсаторе до  $U = U_{\text{АБ мин}}$  он начинает выполнять функцию аккумулятора, поэтому от последнего можно отказаться.

Включение конденсатора параллельно аккумуляторной батарее позволяет уменьшить емкость аккумулятора на величину приведенной емкости буферного конденсатора, поскольку суммарная емкость накопителя  $C_{\text{нак}}$  для принятия энергии рекуперации описывается известным соотношением

$$C_{\text{нак}} = C'_{\text{АБ}} + C_{\text{К}}.$$

Здесь  $C'_{\text{АБ}}$  – величина емкости аккумулятора, выраженная в фарадах.

Определенный интерес при расчете накопителя вызывает оценка соотношения между количеством потребленной подвижным составом энергии при пуске и возвращаемой при рекуперации. На рис. 3.16 показаны кривые движения  $v(t)$  для подвижного состава электрического транспорта (кривая 1) и теплоэлектрического (кривая 2) подвижного состава, построенные в соответствии с [1] для подвижного состава массой 18 т. При этом движение электроподвижного состава осуществлялось по классической схеме. Основное условие, которое выполнялось при построении кривых движения, – равенство времени движения по перегону (одинаковая средняя скорость на перегоне).

Из сопоставления кривых движения видно, что электроподвижной состав разгоняется на перегоне до большей скорости, чем теплоэлектрический, а начинает торможение – с меньшей. В то же время расход энергии на движение у теплоэлектрического подвижного состава больше, поскольку топливо потребляется им почти все время движения по перегону.

Накопленная подвижным составом во время пуска кинетическая энергия в соответствии с рис. 3.16 рассчитывается по известному соотношению и выражается:

- для электроподвижного состава  $A_{\text{пуск ЭПС}} = (1 + \gamma)m_{\text{ПС}}v_1^2/2$ ;
- для теплоэлектрического подвижного состава  $A_{\text{пуск ТЭПС}} = (1 + \gamma) \times m_{\text{ПС}}v_2^2/2$ .

В то же время величина кинетической энергии в момент начала торможения составит:

- для электроподвижного состава  $A_{\text{торм ЭПС}} = (1 + \gamma)m_{\text{ПС}}v_3^2/2$ ;
- для теплоэлектрического подвижного состава  $A_{\text{торм ТЭПС}} = (1 + \gamma) \times m_{\text{ПС}}v_2^2/2$ .

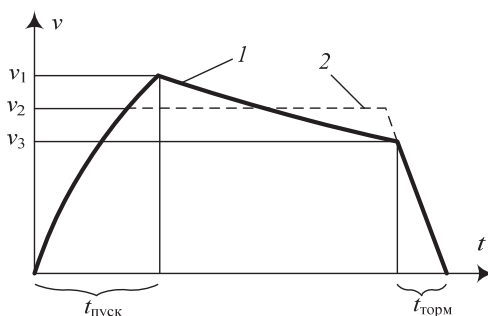


Рис. 3.16. Кривые движения электрического (1) и теплоэлектрического (2) подвижного состава

В частности, для подвижного состава массой 18 т величины этих показателей составляют:

$$A_{\text{пуск ЭПС}} = 792 \text{ Вт} \cdot \text{ч}; A_{\text{торм ЭПС}} = 544 \text{ Вт} \cdot \text{ч};$$

$$A_{\text{пуск ТЭПС}} = A_{\text{торм ТЭПС}} = 641 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Из приведенных данных видно, что накопитель может сохранить (без учета потерь) для последующего пуска:

- на электроподвижном составе 69 % от потребного для разгона до скорости  $v_1$  количества энергии;
- на теплоэлектрическом подвижном составе 100 % от потребного для разгона до скорости  $v_2$  количества энергии.

Не меньший интерес вызывает вопрос о времени заряда аккумулятора в процессе и после рекуперации при ограничении зарядного тока в пределах, упоминавшихся выше.

Очевидно, что длительность процесса заряда аккумулятора зависит от величины заряда и зарядного тока и может быть определена в соответствии с известным соотношением  $Q = I_{\text{зар}} t_{\text{зар}}$ .

Тогда время  $t'_{\text{зар}}$  дозаряда аккумулятора после прекращения рекуперации  $t'_{\text{зар}} = t_{\text{зар}} - t_{\text{торм}}$ .

Рассмотрим порядок расчета параметров аккумулятора и конденсатора на примере электроподвижного состава массой 18 т, оснащенного двигателем постоянного тока с номинальным напряжением 550 В.

В качестве расчетного перегона, на котором движется транспортное средство, взят отрезок пути длиной  $L_{\text{пер}} = 450$  м. Аккумулятор –



литий-ионный. Проведенные для этого перегона тягово-энергетические расчеты показали, что при ускорениях  $a_{\text{пуск}} = a_{\text{торм}} = 1,5 \text{ м/с}^2$  торможение начинается со скорости 31 км/ч.

Накопленная подвижным составом к моменту начала торможения механическая энергия составляет

$$A_{\text{кин}} = (1 + \gamma) \frac{m_{\text{ПС}} v_{\text{торм}}^2}{2} = (1 + 0,14) \frac{18 \cdot 10^3 \cdot 8,6^2}{2} = 760,4 \text{ кДж} = 211 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Величина энергии электрического торможения со скорости 31 км/ч до 5 км/ч (когда происходит замещение электрического торможения механическим вследствие неэффективности первого) составляет  $A_{\text{рек}} = 188 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 677 \text{ кДж}$ , длительность периода рекуперации  $t_{\text{рек}} = 4,8 \text{ с}$ .

Емкость аккумулятора  $Q_{\text{АБ}}$  в ампер-часах ( $\text{А} \cdot \text{ч}$ ), принимающего всю энергию рекуперации, составит

$$Q_{\text{max}} = \frac{A_{\text{рек}}}{(1 - k_{\text{разр}} k_{\text{min}}) n_{\text{посл}} U_{\text{эл.ном}}} = \frac{677 \cdot 10^3}{(1 - 0,2 \cdot 0,875) \cdot 172 \cdot 3,2} = 1500 \text{ А} \cdot \text{с} = 0,41 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, для принятия энергии рекуперации на подвижном составе должна быть установлена аккумуляторная батарея из 172 элементов с емкостью каждого из них  $Q_{\text{эл.ном}} = 0,41 \text{ А} \cdot \text{ч}$ . Емкость батарей  $Q_{\text{АБ ном}} = 71 \text{ А} \cdot \text{ч}$ .

Емкость конденсатора, рассчитанного на максимальное напряжение, возникающее на зажимах электрической машины при рекуперации ( $U_{\text{рек}} = 1100 \text{ В}$ ), в соответствии с [12, 14]

$$C_{\text{к}} = \frac{2 A_{\text{рек}}}{(2 - k_{\text{min}}^2) U_{\text{рек}}^2} = \frac{2 \cdot 677 \cdot 10^3}{(4 - 0,875^2) \cdot 1100^2} = 0,346 \text{ Ф}.$$

Величина энергии  $A'_{\text{рек}}$ , отданной буферным конденсатором в аккумулятор, определяется как разность между полученной им энергией



рекуперации и оставшейся после разряда его на аккумулятор  $A'_{C_{ост}}$ , когда напряжение на нем падает до величины  $U_C = U_{AB \text{ ном}}$ , т. е.

$$A'_{C_{ост}} = \frac{C_K U_{AB \text{ ном}}^2}{2} = \frac{C_K (n_{\text{посл}} U_{\text{эл. ном}})^2}{2} = \frac{0,364 \cdot (172 \cdot 3,2)^2}{2} = 55,14 \text{ кДж.}$$

Тогда

$$A'_{\text{рек}} = A_{\text{рек}} - A'_{C_{ост}} = 677 \cdot 10^3 - 55,14 \cdot 10^3 = 621,86 \text{ кДж,}$$

а время дозаряда аккумулятора током  $I_{\text{зар}} \equiv 0,2 Q_{AB \text{ ном}} = 14,2 \text{ А}$  до номинального напряжения определяется как

$$t'_{\text{зар}} = \frac{A'_{\text{рек}}}{n_{\text{посл}} U_{\text{эл. ном}} I_{\text{зар}}} = \frac{621,86 \cdot 10^3}{172 \cdot 3,2 \cdot 14,2} = 79,6 \text{ с.}$$

Таким образом, полный заряд аккумулятора произойдет по истечении 1 мин и 20 с после остановки. При составлении расписания движения необходимо предусматривать время стоянки на остановочном пункте не менее 1,5 мин.

Таким образом, предложенная методика определения параметров накопителей электрической энергии для транспортных средств позволяет рассчитать оптимальные значения емкости гальванического аккумулятора и буферного конденсатора, обеспечивающего работу аккумулятора в течение всего срока эксплуатации, регламентированного изготовителем.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болдов Н. А. Теплоэлектрический подвижной состав (основы теории) / Н. А. Болдов, А. Д. Степанов: учеб. для вузов. – М.: Транспорт, 1968. – 360 с.
2. Погарский Н. А. Универсальные трансмиссии пневмоколесных машин повышенной единичной мощности / Н. А. Погарский, А. Д. Степанов. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.
3. Транспорт и атмосферное загрязнение [Электронный ресурс]. – URL: <http://central-asians.ru/ekologiya-i-geoekologiya/97-transport-i-atmosfernoe-zagryaznenie.html> (дата обращения: 10.12.2012).
4. Гибридный транспорт [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eltoncar.ru/applications/gibridnyj-transport> (дата обращения: 10.12.2012).



5. *Larminie J.* Electric Vehicle Technology Explained / J. Larminie, J. Lowry. – Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd., 2003. – 296 p.
6. *Щетина В. А.* Электромобиль: техника и экономика / Ю. А. Морговский, Б. И. Центр, В. А. Богомазов; под общ. ред. В. А. Щетины. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 253 с.: ил.
7. *Розенфельд В. Е.* Теория электрической тяги: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Транспорт, 1995. – 294 с.
8. *Barrow K.* Wireless connections: The latest catenary-free power systems [Electronic Recource] // Intern. Railway J. – 2009. – Vol. 49, № 6. – P. 20–24. – URL: [http://www.nxtbook.com/fx/save/flush.php?url=http://pages.nxtbook.com/nxtbooks/sb/irj0609/offline/sb\\_irj0609\\_pdf.zip&size=11732170](http://www.nxtbook.com/fx/save/flush.php?url=http://pages.nxtbook.com/nxtbooks/sb/irj0609/offline/sb_irj0609_pdf.zip&size=11732170) (Available at: 05.06.2014).
9. Supercapacitors to be tested on Paris STEEM tram [Electronic Recource] // Railway Gazette. – 08 July 2009. – URL: <http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/supercapacitors-to-be-tested-on-paris-steem-tram.html> (Available at: 05.06.2014).
10. *Пролыгин А. П.* Электрооборудование подвижного состава городского электрифицированного транспорта / А. П. Пролыгин, А. А. Рабинович. – М.: Энергия, 1973. – 352 с.
11. Определение мощности тягового двигателя подвижного состава по критерию минимума удельного расхода энергии / В. В. Бирюков, М. Ю. Никулин, А. В. Трейзе, Т. А. Ворок // Автоматизированные электромеханические системы: коллектив. моногр. / под ред. В. Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 2. – С. 235–240.
12. *Бирюков В. В.* Энергосбережение на электрическом транспорте: монография / В. В. Бирюков. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. – 244 с.
13. Теория и расчет тягового привода электромобилей: учеб. пособие для вузов по спец. «Городской электрический транспорт» и «Электрическая тяга и автоматизация тяговых устройств» / И. С. Ефремов, А. П. Пролыгин, Ю. М. Андреев, А. Б. Миндлин. – М.: Высшая школа, 1984. – 383 с., ил.
14. *Ефремов И. С.* Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта: учеб. для вузов / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – М.: Высшая школа, 1976. – 480 с.
15. Руководство по эксплуатации аккумуляторов литий-ионных моделей. LT.64366939.3482.001-2012РЭ. – Новосибирск: Завод «Лиотех», 2012. – 8 с.

## ГЛАВА 4



### **ДИАГНОСТИКА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

**Д**иагностика технических объектов, как известно, включает в себя методы и средства определения технического состояния этих объектов. Использование технических средств позволяет исключить полностью или свести к минимуму влияние субъективного фактора при диагностировании технического состояния подвижного состава или оборудования системы электроснабжения и выявлении причин их отказа.

Несомненным достоинством средств технической диагностики помимо отмеченных выше являются:

- высокое быстродействие;
- точность и достоверность (за счет возможности многократных измерений в процессе проведения одного диагностирования);
- возможность перехода к контролю за состоянием каждого объекта в течение всего срока его службы;
- проведение диагностирования в одних и тех же условиях и т. д.

В настоящее время известно большое количество методов и средств диагностирования, которые с успехом могут применяться для определения технического состояния как отдельных узлов и деталей подвижного состава [1–5] и системы электроснабжения [6–8], так и электротранспортного комплекса в целом [9]. Изменение технического состояния объектов в процессе эксплуатации неизбежно, поскольку



связано с естественными процессами износа трущихся поверхностей, старения изоляции, некачественной регулировки и пр. Все это приводит к изменению величины внутренних потерь энергии, в том числе и на преодоление сил сопротивления движению.

В качестве иллюстрации к сказанному рассмотрим в обобщенном виде влияние технического состояния подвижного состава на расход энергии на его движение. Как указывалось выше, потребление подвижным составом энергии от источника питания осуществляется и для преодоления сил сопротивления движению. Для расчета расхода энергии на преодоление сил сопротивления движению воспользуемся графоаналитическим способом. С этой целью совместим кривые движения поезда  $v(l)$  на каком-либо участке с кривой сил сопротивления движению  $w(l)$  на этом же участке (рис. 4.1). Для построения зависимости  $w(l)$  воспользуемся приведенным выше аналитическим выражением для определения удельных сил сопротивления движению:

$$w = a + bv + cv^2 + w_i.$$

Полагаем для определенности, что подвижным составом является трамвай, аналитическая зависимость  $w(v)$  для которого при движении под током имеет вид

$$w = 2,5 + (30 + 0,04v^2) \frac{G_{\text{пс}}}{g}$$

и при движении без тока

$$w = 3,0 + (40 + 0,05v^2) \frac{G_{\text{пс}}}{g}.$$

Предположим, что в результате некачественного проведения ремонтных и регулировочных работ сопротивление движению от действия внутренних сил увеличилось и стало определяться выражением при движении под током

$$w' = 3,5 + (30 + 0,04v^2) \frac{G_{\text{пс}}}{g}$$

и при движении без тока

$$w = 4,0 + (40 + 0,05v^2) \frac{G_{\text{ПС}}}{g}.$$

Такое изменение может быть вызвано, например, постоянным подтормаживанием колесных пар вследствие неправильно отрегулированного тормозного механизма. Принятое увеличение  $w$  эквивалентно изменению уклона на 1 ‰. Кривая движения  $v(l)$ , а также кривые  $w(l)$  и  $I(l)$  для нормально отрегулированных тормозных механизмов при движении по перегону в 500 метров с уклоном 3 ‰ показаны на рис. 4.1. Удельный расход энергии на движение при этом составил  $A_{\text{уд. } w} = 64 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ .

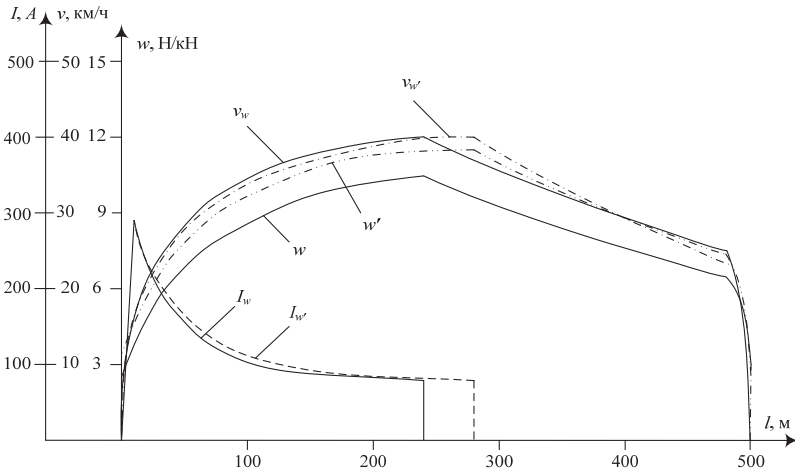


Рис. 4.1. Кривые движения и потребления тока при изменении сопротивления движению

Определить увеличение удельного расхода энергии на преодоление прироста сопротивления движению аналитическим способом по формуле

$$\Delta A_{\text{уд}} = \int_0^{l_g} (w' - w) dl$$

достаточно трудно, поскольку зависимость  $w(l)$  имеет трансцендентный характер. Поэтому его можно определить графически, например



через соотношение разности площадей фигур, ограниченных кривыми потребления токов  $I_w$  и  $I_{w'}$ , и площади кривой тока  $I_w$ , умноженной на удельный расход  $A_{уд. w}$ . Рассчитанный графическим способом прирост удельного расхода энергии составил  $\Delta A_{уд} = 8,3 \text{ Вт} \cdot \text{ч/т} \cdot \text{км}$ , т. е. 13 % от первоначального значения. Если на подвижном составе используется рекуперативное торможение, то прирост удельного расхода энергии в процентном отношении для рассмотренного случая возрастания сопротивления движению увеличится вследствие снижения скорости начала торможения (рис. 4.1).

Приведенный пример наглядно показал необходимость поддерживать подвижной состав в исправном состоянии, контроль которого обеспечивается при использовании средств диагностики, а регламентирующие показатели технического состояния определяются [10, 11].

Каждое из средств диагностики обладает своими параметрами, в том числе и таким, как энергопотребление. Именно с позиций минимизации энергопотребления в соответствии с рекомендациями [12] и рассматриваются далее вопросы диагностирования элементов электрического транспорта.

#### 4.1. ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИКИ

Современный электроподвижной состав – это сложная электротехническая система, которую условно можно представить состоящей из двух основных частей: механической и электрической.

Несмотря на многообразие схемных решений, электрическую часть различных видов электроподвижного состава объединяет идентичность структуры, которая включает в себя: цепи силового (тягового) оборудования; цепи вспомогательного оборудования; цепи собственных нужд; цепи дополнительного оборудования. Аналогично можно структурировать и механическое оборудование подвижного состава: ходовые части, кузов, системы направления движения и т. д.

Рассматривая подвижной состав электрического транспорта в качестве объекта исследования с целью определения его технического состояния, необходимо отчетливо представлять себе, что он может быть представлен как многоуровневая система, диагностирование каждого уровня которой осуществляется своими способами и средствами, а переход на последующий уровень не только повышает точность диагностирования, но и увеличивает затраты на определение состояния.



Вместе с тем существуют обобщенные признаки и параметры, которые могут быть использованы в качестве основных и дополнительных при переходе от одного уровня диагностирования к другому. Так, в частности, на электроподвижном составе в качестве одного из основных признаков общего технического состояния используется ток тягового двигателя, с помощью которого диагностируется электрическая цепь тягового оборудования в режимах пуска и торможения. Этот же признак может использоваться при определении технического состояния и отдельных узлов и агрегатов (преобразователя, тягового двигателя и т. д.).

Для разработки эффективных методов и средств диагностирования, позволяющих с минимальными затратами, в том числе энергетическими, получать объективную информацию о техническом состоянии оборудования ЭПС, необходимо проанализировать не только подвижной состав как объект с учетом его конструктивных и функциональных особенностей, безотказности работы на линии, а также влияния неисправностей оборудования на безопасность, экономичность и комфортабельность пассажироперевозок, но и существующие наработки в области методов и средств диагностирования.

#### 4.1.1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА КАК ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИКИ

Для анализа существующих методов диагностирования, их совершенствования и разработки новых методов необходимо произвести функциональную дифференциацию оборудования как сложного многоуровневого электромеханического комплекса. Рассмотрим вопросы диагностирования оборудования подвижного состава на примере троллейбуса. С этой целью предлагается [4, 5] блочно-функциональная декомпозиция оборудования ЭПС по вертикали и горизонтали (рис. 4.2).

На каждом уровне декомпозиции показаны конкретные элементы подвижного состава, подвергающиеся диагностике, а также ряд диагностических признаков, по которым оценивается техническое состояние объекта. Из приведенных примеров видно, что некоторые признаки могут выступать как в качестве обобщенных – на первом уровне (например, ток тягового двигателя), так и в качестве частных при углубленной диагностике.

Более глубокие уровни диагностирования позволяют не только оценить техническое состояние по принципу «годен – не годен», но и



Рис. 4.2 Блочно-функциональная декомпозиция подвижного состава

во многих случаях указать на места дефекта или отказа, которые со временем могут стать причиной выхода из строя подвижного состава.

Наличие одинаковых признаков на разных уровнях позволяет использовать одни и те же методы и средства при диагностировании ЭПС «в глубину». Это способствует снижению капитальных затрат по оснащению ремонтных предприятий и уменьшению эксплуатационных



расходов на определение характера и местонахождения неисправностей и исключение субъективного фактора при оценке технического состояния как объекта в целом, так и его узлов и деталей.

В результате, например, анализа гистограмм распределения отказов электрооборудования троллейбуса и сходимости функций была подобрана универсальная аналитическая сглаживающая функция, с помощью которой удалось получить характеристики безотказной работы  $P(L)$  для каждого типа электротехнического оборудования (ЭО). Универсальная аналитическая функция имеет вид

$$\psi(L) = 1 - \left( \frac{\xi_1 - \xi_2}{1 + e^{\frac{(L-L_0)}{\Delta L}}} + \xi_2 \right).$$

В качестве примера на рис. 4.3 приведены характеристики безотказной работы  $P(L)$  щеток тягового электродвигателя и головки токоприемника троллейбусов депо № 2 г. Новосибирска. Коэффициенты, описывающие функцию, и числовые характеристики приведены в табл. 4.1, в которой  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $L_0$ ,  $\Delta L$  – коэффициенты функции;  $P_K$  и  $P_{\chi^2}$  – вероятности критериев согласия Колмогорова и Стьюдента соответственно.

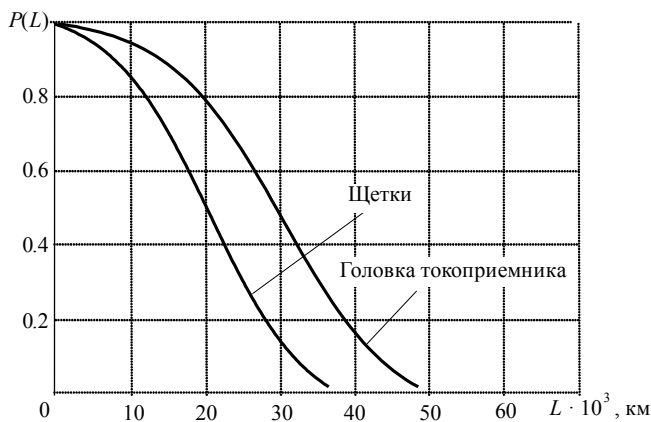


Рис. 4.3. Кривые характеристик безотказной работы узлов подвижного состава



Таблица 4.1

| Наименование<br>отказавшего узла   | Коэффициенты и числовые характеристики     |       |              |
|------------------------------------|--------------------------------------------|-------|--------------|
|                                    | $\xi_1, \xi_2, L_0, \Delta L$              | $P_K$ | $P_{\chi^2}$ |
| Щетки тягового<br>электродвигателя | –0,06657<br>1,16504<br>21304,1<br>7346,17  | 0,688 | 0,701        |
| Головка токоприемника              | –0,02206<br>1,11252<br>29665,1<br>7601,954 | 0,547 | 0,687        |

Определение текущего технического состояния, несомненно, является важным моментом при эксплуатации подвижного состава в условиях изменения надежности электротехнического оборудования  $P(L)$ , но еще более важно прогнозировать изменение надежности электрооборудования на перспективу. Полученные стохастические модели статистического моделирования (рис. 4.3) рекомендуется использовать для оценки и прогнозирования изменения технического состояния среднестатистического элемента оборудования. Так, задаваясь необходимым уровнем надежности  $P(L)$ , можно определять время  $t$  или пробег  $L$  нормальной безаварийной эксплуатации оборудования. Одновременно, используя закон изменения надежности, можно определять допустимое остаточное время  $t$  или пробег  $L$  эксплуатации до тех пор, пока ресурс надежности не будет исчерпан.

Аналогичные блочно-функциональные схемы декомпозиции могут быть составлены для подвижного состава трамвая, метрополитена и т. д.

#### 4.1.2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Методы и средства диагностирования подвижного состава служат для имитации режимов его работы, измерения диагностических параметров и постановки диагноза. Они создаются в соответствии с диагностируемым объектом, видом диагностических параметров и технологическим назначением.



По видам измеряемых диагностических параметров методы и средства диагностирования подразделяются, как известно, на две группы: функциональные, соответствующие параметрам эффективности транспортного средства (мощность, тормозной путь и т. д.), и локальные, соответствующие параметрам процессов, сопутствующих его функционированию (нагрев, вибрация и т. д.), или же структурным, геометрическим параметрам. Первая группа методов и средств предназначена главным образом для определения работоспособности в целом, т. е. для общего (комплексного) диагностирования. Локальные методы и средства обеспечивают поэлементное диагностирование.

По способу исполнения диагностические средства разделяются на стендовые и портативные.

Принципиально важное значение приобретает классификация методов и средств диагностирования по схеме их применения: в стационарных условиях или в движении. Ходовое диагностирование осуществляется во время движения при помощи встроенных датчиков и портативных диагностических устройств. Ходовые испытания по своему характеру являются наиболее ответственными, так как при этом диагностируемый подвижной состав подвергается воздействию целого ряда факторов, имитация которых при стендовых испытаниях либо практически невозможна, либо трудноосуществима. Вместе с тем при ходовых испытаниях трудно выявить влияние отдельных факторов на работу двигателя, трансмиссии, ходовую часть и т. д.

Стационарное диагностирование обеспечивает контроль состояния транспортного средства при техническом обслуживании и ремонте подвижного состава в производственных помещениях предприятий. Стендовые испытания позволяют уменьшить влияние различного рода случайностей на процесс диагностирования и более достоверно выявить степень влияния того или иного фактора как на объект диагностирования в целом, так и на различные его элементы. Кроме того, стендовые испытания имеют следующие преимущества перед ходовыми: высокую точность результатов испытаний, безопасность проведения испытаний при различных скоростях, малые затраты времени и средств на проведение испытаний, возможность стандартизации условий испытаний.

Методы и средства диагностирования должны отвечать следующим требованиям [1]:

- обладать достоверностью измерений;

- иметь высокую надежность;
- отвечать требованиям технологичности;
- обладать минимальным энергопотреблением.

Последнее требование является критичным по отношению к диагностическим стендам, имитирующим реальные условия движения транспортного средства. Применение диагностических стендов на эксплуатационных предприятиях становится необходимым в тех случаях, когда на их территории невозможно организовать испытательный полигон для определения динамических показателей подвижного состава. Поскольку техническое состояние исправного подвижного состава должно проверяться ежедневно как минимум дважды (при выпуске на линию и заходе в парк), а неисправного подвижного состава – еще и перед ремонтом и по его окончании, продолжительность работы диагностического стенда в течение суток, а следовательно, и потребление им энергии весьма существенны, что будет показано ниже.

Многолетний опыт эксплуатации на автотранспортных предприятиях различных модификаций диагностических стендов, имитирующих реальные условия движения, показал, что оптимальным вариантом его кинематической схемы является схема с двумя беговыми барабанами (рис. 4.4).

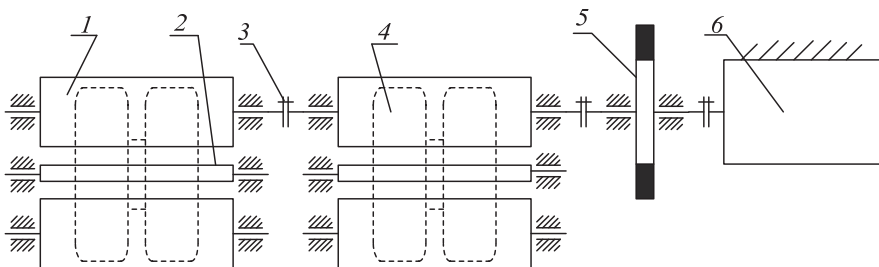


Рис. 4.4. Кинематическая схема стенда с беговыми барабанами

Кинематическую схему образуют: беговые барабаны 1; соединительные муфты 3; маховик 5; приводной мотор 6. Измерительные ролики 2, соприкасающиеся с колесом подвижного состава, выполняют роль датчиков скорости вращения колес. При необходимости диагностирования дифференциалов ведущих мостов и поколесного измерения тягового усилия следует использовать кинематическую схему, показанную на рис. 4.5.

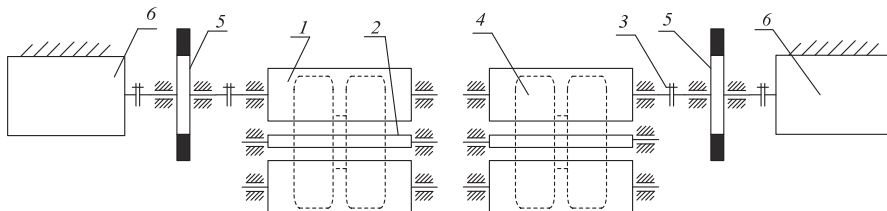


Рис. 4.5 Кинематическая схема стенда с беговыми барабанами под каждое колесо

Применение сдвоенных барабанов под одно колесо способствует установке подвижного состава на стенде без применения дополнительных фиксирующих устройств. Включение в стенд маховика обеспечивает эквивалентность режима работы тягового двигателя подвижного состава реальным условиям движения, так как энергия, накапливаемая маховиком, равна энергии поступательно движущегося транспортного средства. Расчет параметров маховика (массы, диаметра и т. д.) не вызывает затруднений и поэтому здесь не приводится.

Имитации реальных условий движения на стенде способствует не только использование необходимого схемного решения механической части стенда, но и применение таких элементов в его электрических цепях, которые позволяли бы в полной мере реализовывать все режимы движения. Отличительной особенностью системы электроснабжения стендов для диагностики подвижного состава городского электрического транспорта является то, что источником питания в них служит тяговая сеть, от которой получает питание тяговый двигатель подвижного состава. Поэтому и все остальное электрооборудование стенда целесообразно питать от тяговой сети.

Потребляемая при диагностировании подвижного состава энергия соизмерима по величине с той, что потребляется в реальных условиях движения. Один из путей снижения расхода электроэнергии при диагностировании – это применение метода взаимной нагрузки, при котором в качестве нагрузки для приводного мотора используется генератор, позволяющий возвращать энергию за счет рекуперации. При этом энергия, потребляемая из источника питания, расходуется только на покрытие потерь в элементах стенда. Один из вариантов схемного решения электрических цепей питания стенда показан на рис. 4.6.

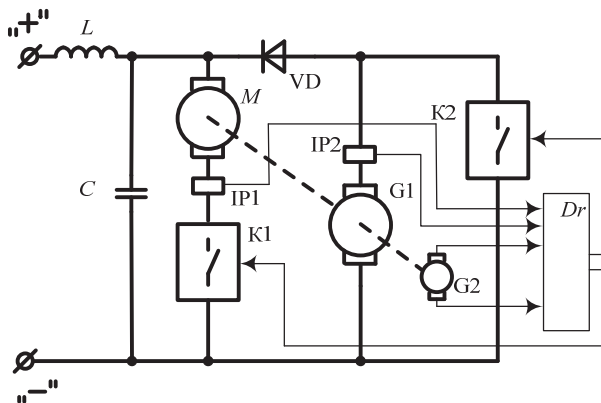


Рис. 4.6. Принципиальная электрическая схема силовых цепей стенда диагностики

Принцип работы электрической части стенда заключается в следующем. При включении регулятора K1 подвижного состава, установленного на беговые барабаны стенда, начинается вращение колес, что приводит к появлению на зажимах нагрузочного генератора G1 ЭДС. Изменяя время проводящего состояния ключа K2, можно регулировать величину тока генератора, а следовательно, и величину нагрузочного момента. Применение электрической части с таким схемным решением позволяет отказаться от использования в механической части маховых масс, что упрощает конструкцию стенда.

Зона рабочих режимов стенда с полупроводниковыми регуляторами, ограниченная осями координат, кривыми предельных величин тока  $I_{\text{пуск}}(v)$  и скорости  $v_{\text{констр}}(I)$ , а также  $v(I)$  при максимальном ослаблении потока, показана на рис. 4.7. Из рисунка видно, что она полностью покрывает зону рабочих режимов тягового двигателя (заштрихованная область) в реальных условиях движения.

Для анализа затрат энергии при работе стенда рассмотрим основные соотношения, описывающие режим работы установки. С этой целью используем диаграммы электромагнитных процессов, поясняющие принцип работы электрической части стенда (рис. 4.8). На рисунке изображены диаграммы токов и напряжений в цепях двигателя и генератора, соответствующие трем квазистационарным режимам работы стенда, характеризующимся различными величинами токов тягового двигателя и нагрузочного генератора и скоростями вращения колес.

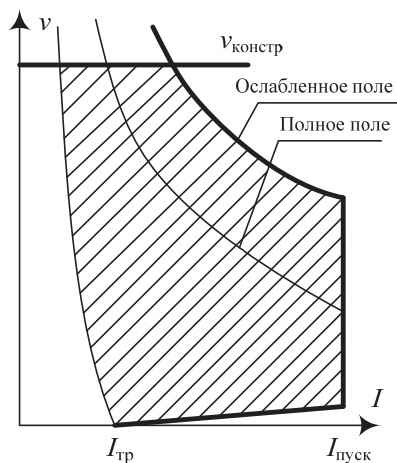


Рис. 4.7. Зона рабочих режимов стенда диагностики

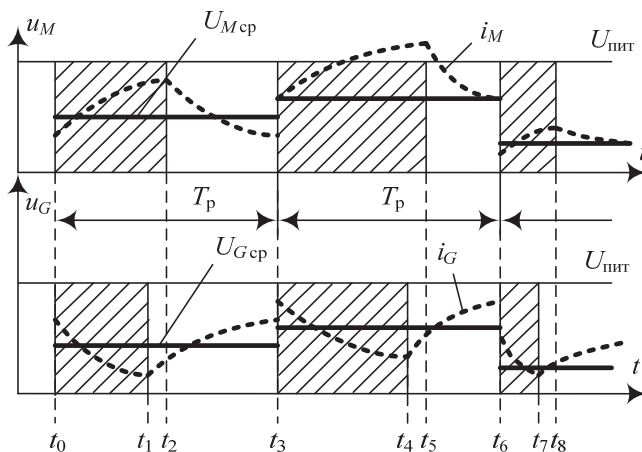


Рис. 4.8. Диаграммы токов и напряжений в цепях двигателя и генератора стенда

Для каждого периода регулирования  $T_p$  (на диаграммах им соответствуют интервалы времени  $t_0 - t_3$ ,  $t_3 - t_6$ ,  $t_6 \dots$ ) характерны свои величины мгновенных и средних за период токов и напряжений, обусловлен-



ные законом сохранения энергии, описываемым уравнением движения электропривода

$$M_M - M_G = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt},$$

где  $M_M$  – момент, развиваемый тяговым двигателем на валу якоря;

$M_G$  – приведенный к валу тягового двигателя момент, развиваемый нагрузочным генератором;

$J_\Sigma$  – приведенный момент инерции вращающихся масс установки;

$\omega$  – угловая скорость вращения якоря тягового двигателя,

Для любой точки зоны рабочих режимов установки (когда  $\omega = \text{const}$ ) справедлив баланс мощностей, описываемый уравнением

$$P_M = P_G + P_{\text{пер}}, \quad (4.1)$$

где  $P_M$ ,  $P_G$ ,  $P_{\text{пер}}$  – мощности, развиваемые соответственно тяговым электродвигателем и нагрузочным генератором, а также мощность потерь в стенде.

Потребляемая тяговым двигателем от источника питания энергия может быть выражена через среднее за период регулирования значение мощности

$$P_0 = U_{\text{пит}} I_M + P_{\text{пМ}} = M_M \omega + \Delta P_M + P_{\text{пМ}}, \quad (4.2)$$

где  $P_{\text{пМ}} = \sum I_{\text{пМ}}^2 r_{\text{пМ}}$  – мощность потерь в параллельных цепях возбуждения;

$\Delta P_{\text{пМ}} = I_M^2 r_{\text{сМ}} + \Delta U_{\text{щ}} I_M + \Delta P_{\text{Ммех}} + k_{\text{с}} (\Delta P_{\text{М0}} - \Delta P_{\text{Ммех}})$  – мощность потерь в двигателе;

$r_{\text{сМ}}$  и  $r_{\text{пМ}}$  – активное сопротивление обмоток последовательного и параллельного возбуждения двигателя;

$\Delta U_{\text{щ}}$  – падение напряжения под щетками;

$\Delta P_{\text{Ммех}}$  и  $\Delta P_{\text{М0}}$  – мощность механических потерь в двигателе под нагрузкой и на холостом ходу соответственно;

$k_{\text{с}}$  – коэффициент потерь в стали двигателя (рис. 4.9).

Мощность возвращаемой генератором электрической энергии определится как разность между подведенной к генератору мощностью и мощностью потерь в нем:



$$P_p = P_G - \Delta P_G - P_{пГ} =$$

$$= M_G \omega - \left[ I_G^2 r_{сГ} + \Delta U_{щ} I_G + \Delta P_{Гмех} + k_c (\Delta P_{Г0} - \Delta P_{Гмех}) \right] - P_{пГ}, \quad (4.3)$$

где слагаемые формулы аналогичны слагаемым в выражениях для двигателя.

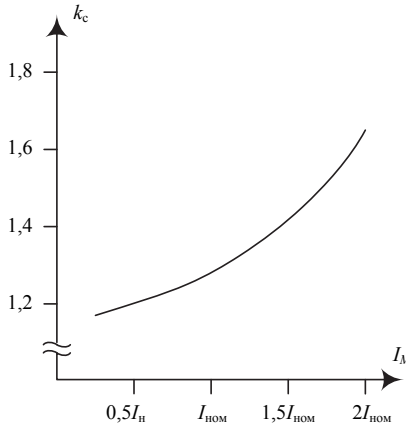


Рис. 4.9. Коэффициент потерь в стали двигателя

Совместное решение системы уравнений (4.1)–(4.3) дает выражение для определения величины мощности, потребляемой от источника электроэнергии,

$$P = P_0 - P_p = \Delta P_M + \Delta P_G + P_{пер} + P_{п}. \quad (4.4)$$

При отсутствии цепей параллельного и независимого возбуждения выражение (4.4) приобретает вид

$$P = \Delta P_M + \Delta P_G + P_{пер}.$$

Поскольку мощность нагрузочного генератора принимается обычно равной мощности тягового двигателя подвижного состава,  $\Delta P_G \approx \Delta P_M$ . Если при этом учесть, что

$$\Delta P_M = (1 - \eta)P_M \text{ и } P_{пер} = (0,02 \dots 0,05)P_M,$$



то мощность суммарных потерь энергии в стенде не превышает 10...15 % от величины мощности тягового двигателя.

Применять подобного рода стенды для диагностирования рельсового подвижного состава нецелесообразно, поскольку это сопряжено с определенными трудностями установки и фиксации ходовых частей на беговых барабанах. Для проведения диагностирования подвижного состава необходимо оборудовать специальный полигон, как правило, на территории предприятия. В отличие от диагностирования на стенде определение состояния подвижного состава на полигоне не обеспечивает стабильности условий проведения испытаний и независимости от субъективного фактора. Кроме того, испытания на полигоне не позволяют повысить объективность оценки результатов путем проведения многократных измерений.

В соответствии с рис. 4.2 стенды с беговыми барабанами позволяют проводить диагностирование подвижного состава на первых двух уровнях. Причем диагностирование на первом уровне должно производиться согласно требованиям нормативных документов перед каждым выпуском подвижного состава на линию. После завершения работы на линии подвижной состав также необходимо протестировать для определения его технического состояния.

Диагностирование подвижного состава на более глубоких уровнях производится, как правило, во время планово-предупредительных ремонтов при помощи средств, стоимость которых на несколько порядков ниже стоимости стенда с беговыми барабанами.

## **4.2. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИКИ**

Поскольку систему электроснабжения, как отмечалось выше, образуют два относительно самостоятельных элемента (тяговая подстанция и тяговая сеть), целесообразно рассмотреть методы и средства их диагностирования отдельно.

Выпрямительные агрегаты тяговой подстанции, состоящие из тягового трансформатора и выпрямителя, – это наиболее стабильные в плане эксплуатационных характеристик элементы системы электроснабжения по сравнению, например, с контактной сетью. Существующие методы и средства контроля их технического состояния достаточно эффективны и не требуют значительных затрат энергии на проведение диагностических работ. Поэтому здесь они не рассматриваются.



В тяговых сетях наиболее нестабильным звеном является контактная сеть, подвергающаяся воздействию не только климатических факторов, но и механических нагрузок, вызванных взаимодействием токоприемника и контактного провода. Перемещение токоприемника по контактному проводу приводит к постоянному изменению сечения последнего вследствие износа, что влияет не только на его электрические параметры, но и на механическую прочность. Поэтому рассмотрим вопросы, связанные с диагностированием контактной сети как наиболее «слабого» звена системы электроснабжения.

#### 4.2.1. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА КОНТАКТНОЙ СЕТИ КАК ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИКИ

Контактная сеть (КС) – сложное инженерное сооружение, имеющее значительную протяженность и периодическую структуру, предназначенное для непрерывного электроснабжения подвижного состава посредством скользящего контакта.

Анализ простоев подвижного состава (ПС) трамвая на линии в ряде крупных городов показывает, что довольно частой причиной простоев на линии становится отказ контактной сети. Так, по данным департамента транспорта г. Новосибирска, до 7,5 % простоев ПС во временном выражении произошло на линии из-за отказа КС. В связи с этим оценка технического состояния КС с позиций надежности – одна из важнейших задач.

При анализе отказов КС в г. Новосибирске были выявлены и исключены отказы, возникавшие в результате посторонних взаимодействий, таких как обрыв подвесок негабаритными грузами, повреждение опорных конструкций транспортными средствами, отжиг провода в результате аварий на ПС, повреждение подвесок неисправными токоприемниками. В ходе предварительного анализа статистического материала было выявлено, что основную часть (79,8 % от общего количества отказов) составляют такие отказы: обрыв контактного провода, вырыв провода из зажима, обрыв гибкой поперечины, повреждение пересечений.

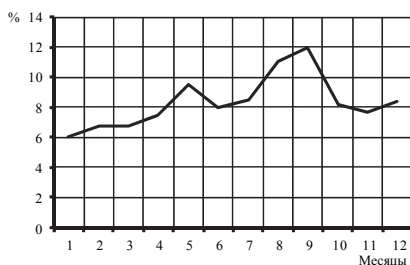
Анализ статистического материала и данных эксплуатационных служб показывает, что контактная подвеска не является равнонадежной системой, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования конструкций и узлов контактной подвески трамвая, в частности пересечений. Наибольшее количество отказов возникает



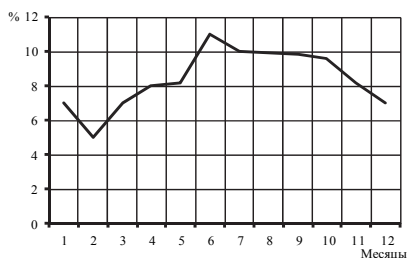
в момент прохождения токоприемником спецчастей и точек подвешивания и фиксации контактного провода, т. е. в результате неудовлетворительного взаимодействия, обусловленного неправильной регулировкой и монтажом подвески, а также неисправностями токоприемника.

Следует отметить, что до 27,3 % всех отказов токоприемников трамвая на линии возникает в результате пропилов и повышенного износа контактных вставок, что, как известно [6, 7], в значительной мере вызвано нарушением параметров контактной подвески, таких как: величины зигзагов, высота контактного провода над уровнем головок рельсов, уклоны и подъемы контактного провода, поджоги.

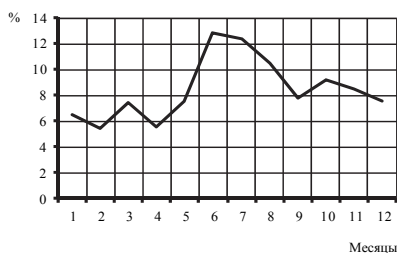
Кроме того, из графиков, показанных на рис. 4.10, прослеживается явная зависимость количества повреждений от климатических условий. Так, максимальная интенсивность отказов вида «обрыв гибкой поперечины» приходится на май и сентябрь с наибольшим суточным перепадом температур, а по отказам типа «обрыв КП и вырыв КП» из зажима максимальная интенсивность приходится на июнь, характеризующийся самыми высокими температурами.



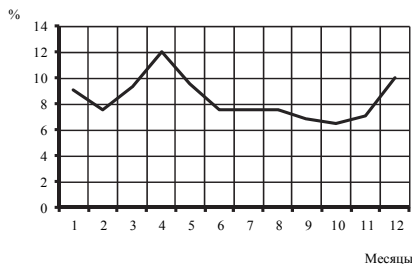
а



б



в



г

Рис. 4.10. Кривые отказов контактного провода в течение года



Поскольку КС является сложным электротехническим объектом, надежность ее как единого целого определяется надежностью составляющих элементов. Поэтому при анализе надежности КС необходимо:

- определить влияние типа подвески и качества ее обслуживания на надежность КС;
- выявить элементы, имеющие пониженную, по сравнению с другими, надежность;
- определить климатические факторы, влияющее на надежность элементов.

Основное требование к КС как элементу системы технического обслуживания и ремонта – постоянное соответствие основных параметров необходимому уровню надежности, условиям эксплуатации и интенсивности использования. Такое соответствие может быть достигнуто, если фактические показатели надежности КС, как и параметры системы технического обслуживания и ремонта, формируются на основе объективной информации о техническом состоянии КС.

Определить техническое состояние КС можно по результатам измерения и оценки большого количества входных, внутренних и выходных параметров. Практически же для определения технического состояния достаточно выделить совокупность прямых и косвенных диагностических признаков и параметров, отображающих наиболее вероятные неисправности, связанные со снижением работоспособности и возникновением отказов.

Блочно-функциональная декомпозиция КС показана на рис. 4.11 [7]. Вертикальная декомпозиция приводит к построению иерархии связей составляющих ее компонентов. В этой иерархии выделено четыре уровня: секционный, включающий в себя секцию контактной сети; системный, включающий поддерживающие, несущие, фиксирующие, линейные токоведущие, опорные устройства, устройства компенсации температурных удлинений, сопряжения и специальные части; подсистемный уровень включает в себя отдельные сборочные единицы; четвертый уровень – элементный – включает неразборные детали. Такая декомпозиция предопределяет форму соподчинения диагностических целей и алгоритмов. Горизонтальная декомпозиция КС позволяет выделить отдельные составляющие по основному принципу физического процесса, функциональному назначению или принципу технического исполнения.

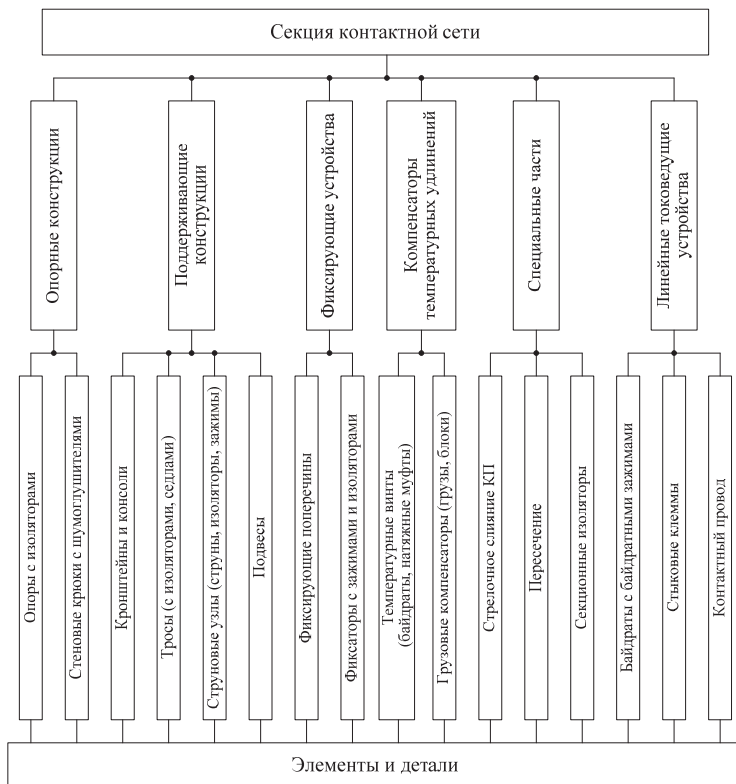


Рис. 4.11. Блочно-функциональная декомпозиция контактной сети

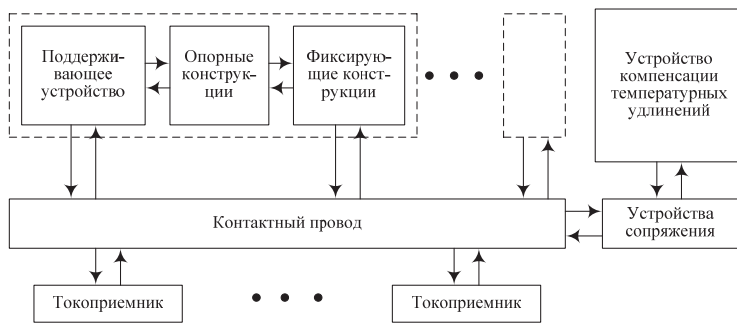
В качестве примера взаимосвязи элементов КС на рис. 4.12 приведены схемы при простой (а) и цепной (б) подвесках.

При диагностировании каждой из этих систем в ряду нескольких используемых физических методов диагностирования можно выделить доминирующий, позволяющий с достаточной степенью достоверности определить техническое состояние КС.

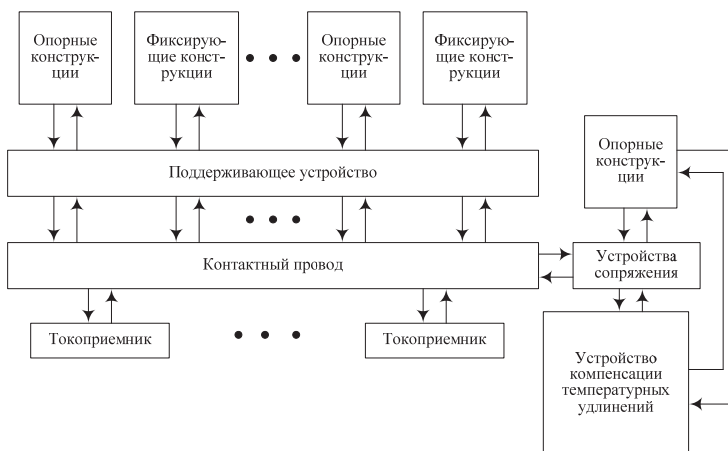
В процессе эксплуатации КС может находиться в следующих основных состояниях:

- исправна и работоспособна, а значит, и параметры  $Z_i$ , характеризующие состояние ее элементов и узлов, находятся в пределах номинального поля допусков:

$$Z_{i \min} \leq Z_i \leq Z_{i \max};$$



а



б

Рис. 4.12. Схемы взаимосвязи элементов контактной сети

• неисправна, но работоспособна, что обусловлено выходом параметров основных элементов и узлов из поля допусков, но не выше предельных значений:

$$Z_{i \min}^{\text{нр}} < Z_i < Z_{i \max}^{\text{нр}}, \quad Z_{i \max}^{\text{нр}} > Z_i > Z_{i \max}^{\text{нр}};$$

• неисправна и неработоспособна, следовательно, параметры основных элементов и узлов вышли за пределы допусков:

$$Z_i < Z_{i \min}^{\text{нр}}, \quad Z_i > Z_{i \max}^{\text{нр}}.$$



Границы указанных допусков для существующих типов контактных подвесок приведены в нормативных документах [10–12]. Однако следует отметить, что существующие допуски в основном отражают состояние подвески через ее геометрические размеры в статическом состоянии, т. е. при отсутствии подвижного состава. В режиме нормального функционирования КС на всем своем протяжении находится во взаимодействии с токоприемниками ПС, а следовательно, должна оцениваться также по показателям, характеризующим взаимодействие, учитывающее надежность, долговечность и качество, т. е. стабильность контакта.

Заданный уровень эксплуатационной надежности КС поддерживается реализацией системы ремонтов и регулировок, определенной нормативно-технической документацией. Существующая система технического обслуживания и ремонта, направленная на поддержание работоспособности КС, включает в себя контроль важнейших параметров контактной подвески и их регулировку. Однако контрольные измерения показывают, что техническое оснащение отдельных операций недостаточно и малопроизводительно. Кроме того, предусматривается контроль параметров КС в статическом состоянии, что при имеющихся связях еще в большей степени затрудняет объективную оценку ее состояния. Следовательно, получить полную и достоверную информацию можно лишь посредством комплексного диагностирования всех параметров КС на всем ее протяжении в режиме функционирования.

#### 4.2.2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Применительно к контактной сети можно выделить три группы методов диагностирования, получивших наиболее широкое применение на практике [6]:

- диагностика по параметрам рабочих процессов, которые непосредственно характеризуют состояние контактной сети;
- диагностика по параметрам сопутствующих процессов, косвенно характеризующих состояние КС;
- диагностика по структурным параметрам, непосредственно характеризующим состояние отдельных элементов и узлов КС.

Первые две группы методов можно отнести к динамическим, так как они применимы только к функционирующему объекту. Третья группа относится к статическим методам.



Методы диагностирования КС в основном базируются на измерении механических параметров и относятся к классу непосредственной оценки состояния.

Разнообразие диагностических методов позволяет воспользоваться наиболее целесообразными из них в каждом конкретном случае. При этом необходимо учитывать степень их информативности, точности, универсальности, экономичности и т. д. В то же время сложность структуры КС и многообразие физических процессов, сопровождающих ее работу, вызывают необходимость сочетать различные методы при ее диагностировании.

Независимо от типа контактной подвески существует определенный набор признаков, по которым оценивается ее техническое состояние. К ним прежде всего относятся:

- высота контактного провода над уровнем головок рельсов;
- смещение контактного провода относительно оси пути;
- величины контактного нажатия.

Последний из отмеченных диагностических признаков позволяет оценивать качество взаимодействия токоприемника подвижного состава с контактным проводом.

Качество взаимодействия можно оценить по регистрации кратковременных нарушений контакта вследствие вертикальных ударов при проходе токоприемником спецчастей, зажимов, изгибов провода. Кратковременные отрывы регистрируются посредством фиксации возникающей при этом дуги с помощью оптических датчиков либо по увеличению уровня радиопомех, либо по нарушению цепи КП–токоприемник–контактный рельс.

Наиболее эффективным и информативным средством диагностики технического состояния контактной сети является комплекс, объединяющий в себе средства для измерения параметров всех указанных выше признаков и размещаемый обычно на специализированном подвижном составе – вагоне-лаборатории (ВЛ). Существующие ВЛ в полном объеме или частично позволяют контролировать следующие параметры КС:

- положение провода в плане (зигзаги, выносы);
- высоту подвешивания КП над уровнем головок рельсов;
- уклоны КП;
- величину контактного нажатия токоприемника;



- препятствие движению токоприемника от КП;
- износ КП.

Основное достоинство диагностических комплексов – это возможность контроля основных параметров КС за один проезд участка. Оснащение комплекса устройствами привязки ВЛ к точке начала измерений с фиксацией прохождения контрольных пунктов (например, опор, спецчастей и т. д.), а также устройствами обработки информации позволяет оперативно оценивать техническое состояние как отдельных участков, так и сети в целом.

Вместе с тем нельзя не отметить, что использование ВЛ предполагает значительно бóльшие капитальные затраты и эксплуатационные расходы в сравнении с ручными измерениями и становится целесообразным лишь при наличии достаточно протяженной длины линий.

При использовании диагностических комплексов возникает проблема эффективности их применения для городов с различной протяженностью КС. Для расчета границы целесообразности использования комплекса необходимо рассмотреть два варианта: первый вариант – ручные измерения с автовышки, второй – с использованием вагона-лаборатории (ВЛ). В случае первого варианта капвложения можно считать равными нулю, т. е.  $K_1 = 0$ , а себестоимость измерений –  $C_1$ . При втором варианте необходимы капвложения  $K_2$  при себестоимости измерений  $C_2$ . Использование ВЛ является целесообразным при выполнении условия

$$T_n \geq \frac{K_2}{C_1 - C_2},$$

где  $T_n$  – нормативный срок окупаемости.

Удельная себестоимость ручных измерений  $C'_1$  включает в себя затраты на рабочую силу, расходы на механизмы, инструмент, спец-одежду, а полная себестоимость может быть определена как

$$C_1 = C'_1 L_{КС},$$

где  $L_{КС}$  – протяженность КС.

Расходы по контролю параметров контактной сети во втором варианте, т. е. при использовании ВЛ, можно разделить на зависимые и независимые от объема работы, тогда



$$C_2 = qK_2 + C_{2\text{нез}} + C_{2\text{зав}}L,$$

где  $q$  – доля амортизационных отчислений;

$K_2$  – капитальные затраты;

$C_{2\text{нез}}$  – независимые расходы;

$C_{2\text{зав}}$  – зависимые расходы.

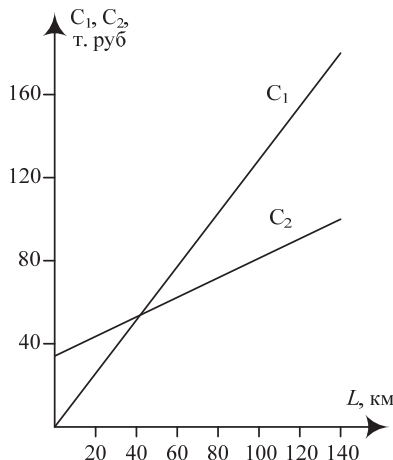


Рис. 4.13. Кривые затрат на диагностику контактной сети

Независимые расходы  $C_{2\text{нез}}$  складываются из заработной платы обслуживающего персонала и стоимости обслуживания вагона. В состав зависимых расходов  $C_{\text{зав}}$  входят расходы на электроэнергию, запасные части и материалы, ремонты по пробегу.

Результаты расчетов для определения границ целесообразности использования различных вариантов проведения измерений (вручную и с использованием ВЛ) на примере КС г. Новосибирска представлены на рис. 4.13 [5].

Следует отметить, что данные расчеты не учитывают экономического эффекта от снижения количества отказов, так как такие расчеты могут быть выполнены только по результатам эксплуатационных исследований.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бирюков В. В.* Исследование и разработка преобразователей для электроснабжения стендов диагностики подвижного состава городского электрического транспорта: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Бирюков; Моск. энерг. ин-т. – М., 1979. – 20 с.
2. *Аршинов С. А.* Исследование и разработка устройств диагностики электрического оборудования троллейбусов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. А. Аршинов; Моск. энерг. ин-т. – М., 1984. – 20 с.
3. Измерительный комплекс диагностики тормозной системы и определение удельного сопротивления движению трамвайного вагона / А. М. Головин, М. В. Калугин, М. А. Шелепов, В. В. Бирюков // Наука и техника в городском хозяйстве. – Киев: Будивельник, 1981. – Вып. 48. – С. 32–37.
4. *Шелепов М. А.* Разработка средств технического диагностирования оборудования трамвайных вагонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. А. Шелепов; Моск. энерг. ин-т. – М., 1988. – 20 с.
5. *Калугин М. В.* Электроподвижной состав как объект диагностирования и прогнозирования его технического состояния / М. В. Калугин, Б. В. Малоземов, В. В. Бирюков // Транспортные проблемы Сибири: материалы II Всерос. науч.-техн. конф., 25–26 нояб. 2004 г., Красноярск / под ред. В. Н. Катаргина. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 73–75.
6. *Калугин М. В.* Разработка устройств диагностики контактной сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. В. Калугин. – М., 1987. – 20 с.
7. *Калугин М. В.* Анализ контактной сети трамвая как объекта диагностики / М. В. Калугин, В. В. Бирюков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 1. – С. 73–75.
8. *Сопов В. И.* Системы электроснабжения электрического транспорта на постоянном токе: учебник / В. И. Сопов, Н. И. Шуров. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 728 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
9. Диагностирование электротранспортных систем / Б. В. Малоземов, С. А. Аршинов, Г. Н. Ворфоломеев, В. В. Бирюков // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2005. – № 4 (24). – 2005. – С. 81–85.
10. Правила технической эксплуатации трамваев: утв. М-вом жилищ. и коммунал. хоз-ва РСФСР 06.08.81. – М., 1982. – 78 с.
11. Правила технической эксплуатации троллейбусов: утв. М-вом жилищ. и коммунал. хоз-ва РСФСР 06.08.81. – М., 1982. – 78 с.
12. ГОСТ 16468–79. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации: Основные положения. – Документ заменен на РД 50-204–87. Методические указания. Надежность в технике. Сбор и обработка информации о надежности изделий в эксплуатации. Основные положения. – Взамен ГОСТ 16468–79; введ. 1988–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 16 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экономное расходование энергетических ресурсов на транспорте и в первую очередь на одной из разновидностей его – экологически чистом электрическом, всегда оставалось одной из важнейших задач проектировщиков и эксплуатационников.

Развитие и совершенствование электрического транспорта постоянно сопровождалось поиском оптимальных схемных решений всех составляющих его элементов: силовых цепей тяговых подстанций, подвижного состава, тяговых сетей и т. д. Однако все они были направлены на решение какой-либо узкой конкретной задачи без учета взаимного влияния принятых решений на систему электрического транспорта в целом.

В данной работе предпринята попытка оценки и принятия конкретных решений по энергосбережению на городском электрическом транспорте как едином электротехническом комплексе, учитывающая различные, порой противоречащие друг другу требования, обусловленные спецификой каждого элемента системы, начиная от подвижного состава и заканчивая эксплуатационным предприятием. Отправной точкой исследований явилось соблюдение основного требования, предъявляемого к транспорту: обеспечение пассажиро- и грузоперевозок с минимальными затратами времени, с максимальной реализацией пропускной способности транспортной сети.

Возросший в последнее время интерес к использованию на транспорте с тепловыми двигателями энергетических установок, привод которых дополнен электрическими машинами в целях снижения расхода углеводородного топлива и повышения экологичности подвижного состава, поставил перед разработчиками проблемы, решение которых в той или иной мере нашло отражение в изложенном материале.

Книга может быть рекомендована специалистам и студентам в качестве дополнительного источника при формировании целостного взгляда на состояние дел и перспективы развития энергосбережения на транспорте.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Предисловие .....                                                                                                              | 7         |
| Введение .....                                                                                                                 | 10        |
| <b>Глава 1. Экономия электрической энергии на электроподвижном составе .....</b>                                               | <b>13</b> |
| 1.1. Структура электроподвижного состава как объекта потребления электрической энергии .....                                   | 16        |
| 1.2. Расчет мощности тяговых электродвигателей электроподвижного состава .....                                                 | 18        |
| 1.2.1. Влияние динамических показателей на величину мощности тягового электродвигателя .....                                   | 19        |
| 1.2.2. Влияние внешних факторов на расход подвижным составом энергии на движение .....                                         | 28        |
| 1.3. Определение основных параметров механической части тягового электропривода подвижного состава .....                       | 33        |
| 1.3.1. Определение кинематической схемы механической части тягового привода .....                                              | 34        |
| 1.3.2. Влияние передаточного числа трансмиссии на потребление энергии на движение .....                                        | 37        |
| 1.4. Выбор схемного решения преобразователя для питания тяговых электродвигателей подвижного состава .....                     | 39        |
| 1.4.1. Некоторые аспекты электромагнитной совместимости источника питания и тягового электродвигателя подвижного состава ..... | 39        |
| 1.4.2. Определение элементной базы преобразователей .....                                                                      | 41        |
| 1.4.3. Выбор способа регулирования подводимого к электродвигателю напряжения .....                                             | 52        |
| 1.4.4. Определение схемного решения электрических цепей преобразователя .....                                                  | 69        |
| 1.5. Источник энергии как фактор корректировки схемного решения электрических цепей подвижного состава .....                   | 83        |
| 1.5.1. Уровень напряжения источника питания как средство энергосбережения .....                                                | 83        |
| 1.5.2. Методы и средства определения расхода энергии на движение .....                                                         | 88        |
| Библиографический список .....                                                                                                 | 106       |



|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 2. Экономия электрической энергии в системе электроснабжения</b>                                               | 109 |
| 2.1. Структура системы тягового электроснабжения как объект технологических потерь электроэнергии                       | 110 |
| 2.2. Определение схемного решения силовых цепей преобразовательных агрегатов тяговых подстанций                         | 111 |
| 2.2.1. Определение схемы соединения обмоток тягового трансформатора                                                     | 112 |
| 2.2.2. Определение схемы соединения вентилях выпрямительных агрегатов                                                   | 126 |
| 2.3. Выбор схемного решения цепей питания контактной сети                                                               | 159 |
| 2.3.1. Анализ существующих систем тягового электроснабжения                                                             | 160 |
| 2.3.2. Анализ схем тяговых сетей по показателям технологического расхода электроэнергии                                 | 185 |
| Библиографический список                                                                                                | 198 |
| <b>Глава 3. Экономия энергии на подвижном составе с автономными источниками энергии</b>                                 | 201 |
| 3.1. Структурные схемы транспортных средств с комбинированной энергетической установкой                                 | 202 |
| 3.2. Определение мощности тягового двигателя транспортного средства                                                     | 212 |
| 3.3. Расчет параметров накопителей электрической энергии на транспорте                                                  | 221 |
| Библиографический список                                                                                                | 231 |
| <b>Глава 4. Диагностика подвижного состава и системы электроснабжения как инструмент снижения потерь электроэнергии</b> | 233 |
| 4.1. Подвижной состав как объект диагностики                                                                            | 236 |
| 4.1.1. Структурная схема подвижного состава как объекта диагностики                                                     | 237 |
| 4.1.2. Методы и средства диагностирования подвижного состава                                                            | 240 |
| 4.2. Система электроснабжения как объект диагностики                                                                    | 248 |
| 4.2.1. Структурная схема контактной сети как объекта диагностики                                                        | 249 |
| 4.2.2. Методы и средства диагностики контактной сети                                                                    | 254 |
| Библиографический список                                                                                                | 258 |
| Заключение                                                                                                              | 259 |

## CONTENTS

|                                                                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Preface .....                                                                                                    | 7          |
| Introduction.....                                                                                                | 10         |
| <b>Chapter 1. Energy saving in electric transport vehicle.....</b>                                               | <b>13</b>  |
| 1.1. The structure of electric transport vehicle as the object of electrical energy consumption .....            | 16         |
| 1.2. Calculation of traction engine's power for electric transport vehicle .....                                 | 18         |
| 1.2.1. The influence of dynamic indices on traction engine's power definition .....                              | 19         |
| 1.2.2. The influence of external factors on energy consumption of electric vehicle .....                         | 28         |
| 1.3. The estimation of major parameters of mechanical part of electric vehicle traction drive.....               | 33         |
| 1.3.1. The estimation of kinematical scheme of traction drive's mechanical part .....                            | 34         |
| 1.3.2. The influence of transmission's gear ratio on electrical energy consumption .....                         | 37         |
| 1.4. The selection of converter topology for electric vehicle traction engines power supply .....                | 39         |
| 1.4.1. Some aspects of electromagnetic compatibility of energy source and electric vehicle traction engine ..... | 39         |
| 1.4.2. The estimation of control technique for engine voltage input.....                                         | 41         |
| 1.4.3. The choice of converter topology .....                                                                    | 52         |
| 1.4.4. The choice of semiconductors for power converter .....                                                    | 69         |
| 1.5. Energy source as a factor for correction the power converter topology.....                                  | 83         |
| 1.5.1. Power source voltage level as the energy saving medium.....                                               | 83         |
| 1.5.2. Methods and technique for estimation of electric vehicle energy consumption.....                          | 88         |
| Bibliography .....                                                                                               | 106        |
| <b>Chapter 2. Energy savings in electric power supply system.....</b>                                            | <b>109</b> |
| 2.1. Power supply system structure as the object of energy process loss.....                                     | 110        |
| 2.2. The choice of power converter topology for traction substations .....                                       | 111        |
| 2.2.1. The determination of traction transformer interconnection scheme.....                                     | 112        |



---

|                                                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.2.2. The determination of rectifier's valves interconnection scheme.....                                            | 126        |
| 2.3. The estimation of feed circuit topology for contact system .....                                                 | 159        |
| 2.3.1. The analysis of present traction power supply systems .....                                                    | 160        |
| 2.3.2. The technique for estimation of energy process loss<br>in contact system.....                                  | 185        |
| Bibliography .....                                                                                                    | 198        |
| <b>Chapter 3. Energy saving in rolling stock with independent sources<br/>of energy.....</b>                          | <b>201</b> |
| 3.1. Block diagrams of vehicles with a combined power plant.....                                                      | 202        |
| 3.2. Determination of power traction motor vehicle means .....                                                        | 212        |
| 3.3. Calculation of the storage of electricity in the transport .....                                                 | 221        |
| Bibliography .....                                                                                                    | 231        |
| <b>Chapter 4. Electric vehicle and power supply system diagnostics<br/>as a tool for energy losses reducing .....</b> | <b>233</b> |
| 4.1. Electric vehicle as diagnostic object .....                                                                      | 236        |
| 4.1.1. Structure chart of electric vehicle as the object for its technical<br>state diagnostics .....                 | 237        |
| 4.1.2. Methods and diagnostic devises for electric transport vehicle .....                                            | 240        |
| 4.2. Power supply system as diagnostic object .....                                                                   | 248        |
| 4.2.1. Structure chart of power supply system as the object for its technical<br>state diagnostics .....              | 249        |
| 4.2.2. Methods and diagnostic devises for power supply system.....                                                    | 254        |
| Bibliography .....                                                                                                    | 258        |
| Conclusions.....                                                                                                      | 259        |

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Бирюков Валерий Викторович**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

**Монография**

Редактор *И.Л. Кескевич*  
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*  
Художественный редактор *А.В. Ладыжская*  
Корректор *И.Е. Семенова*  
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Подписано в печать 16.10.2014  
Формат 60×90 1/16. Бумага офсетная  
Уч.-изд. л. 16,5. Печ. л. 16,5.  
Тираж 3000 экз. (1-й з-д – 1–100 экз.)  
Изд. № 79. Заказ № 1175.

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции  
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Издательство Новосибирского государственного  
технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
Тел. (383) 346-31-87  
E-mail: office@publish.nstu.ru

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20