

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В. В. БИРЮКОВ

АВТОНОМНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2021

УДК 621.331:621.337(075.8)
Б 649

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *Н. И. Щуров*

д-р техн. наук, профессор *В. Н. Аносов*

Работа подготовлена на кафедре электротехнических комплексов

Бирюков В. В.

Б 649 Автономные виды электрического транспорта. Теория и практика : учебное пособие / В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. – 78 с.

ISBN 978-5-7782-4439-9

Рассматриваются основные схемные решения, расчёт и конструктивное исполнение элементов автономного транспорта с электроприводом. Особое внимание уделяется описанию принципа работы как самого электрооборудования, так и принципиальных электрических схем силовых цепей.

Пособие предназначено для студентов бакалаврского цикла обучения по направлению «Энергетика и электротехника» и может быть рекомендовано другим категориям учащихся для систематизации знаний в области электрооборудования, а также разработчикам и эксплуатационникам электроподвижного состава.

УДК 621.331:621.337(075.8)

ISBN 978-5-7782-4439-9

© Бирюков В. В., 2021

© Новосибирский государственный
технический университет, 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Возрастающая автомобилизация населения крупных городов вызывает перегруженность существующих улиц и магистралей транспортными средствами и приводит к образованию автомобильных пробок, увеличению затрат времени на проезд в транспорте, загазованности воздушного бассейна и т. д.

Оптимальным решением этой проблемы является опережающее развитие сети общественного транспорта, отличающегося большей по сравнению с индивидуальным транспортом вместимостью [1]. Наиболее привлекательным в плане экологической безопасности выступает транспорт с электрическим приводом. Для удовлетворения массовых пассажироперевозок, как известно, в городах используются автобусы, трамваи, троллейбусы, метрополитен, электропоезда пригородных сообщений. В последнее время наметилась тенденция распространения электробусов.

Применение электроподвижного состава с централизованным электроснабжением связано с развитием такого элемента системы питания, как контактная сеть, что помимо ухудшения архитектуры улиц приводит к снижению скорости движения транспортных средств в местах пересечения из-за ограничения скорости прохождения стрелочных переводов, а также вследствие меньшей манёвренности по сравнению с автомобильным транспортом.

Появление в последнее время таких источников электрической энергии, как новые типы аккумуляторов, конденсаторов, топливных элементов, привело к применению энергетических установок на базе традиционных транспортных средств.

Необходимо отметить, что, несмотря на различие транспортных средств в плане использования источника для перемещения, их объединяют общие схемотехнические решения, касающиеся электрического оборудования как рельсового, так и безрельсового транспорта.

Развитие науки в сфере транспорта сопровождается постоянным совершенствованием подвижного состава, в том числе и его электрического оборудования. Определённый вклад в развитие схемотехнических решений в этой области внёс коллектив кафедры электротехнических комплексов НГТУ.

ВВЕДЕНИЕ

Под *автономными видами подвижного состава* электрического транспорта понимаются безрельсовые и рельсовые транспортные средства, несущие на своём борту источники энергии для питания тягового электрического привода, реализующего режимы пуска, выбега и торможения. В этом плане автономные виды транспорта отличаются от традиционных (трамвай, троллейбус, электропоезд и т. д.) только источником энергии. Поэтому при разработке автономных видов транспорта за основу механического и электрического оборудования подвижного состава в качестве прототипов могут быть приняты лучшие образцы эксплуатируемых транспортных средств.

Изданная в последнее время литература не в полной мере, на наш взгляд, отражает достижения в области теории автономного транспорта и недостаточно чётко определяет практику проектирования электрической части подвижного состава в плане обоснования схемных решений, расчёта параметров элементов и разработки структурных схем управления, что вызывает у студентов определённые трудности при выполнении расчётно-графических заданий, курсовых проектов, выпускных квалификационных работ.

Стремление восполнить образовавшийся пробел послужило поводом для написания учебного пособия, материал которого излагался автором в соответствующей дисциплине студентам высшей школы в течение последних пяти лет.

В целях укрепления межпредметных связей данной дисциплины с ранее изучавшимися в бакалавриате курсами механического и электрического оборудования подвижного состава исходные данные составлены таким образом, чтобы они были направлены на модернизацию разработанных ранее транспортных средств.

Учебное пособие состоит из семи разделов, каждый из которых представляет собой функционально законченный блок со сведениями теоретического и практического плана по определённой группе элементов подвижного состава. В разделах 1–6 в конспективной форме изложены основные положения теории и конкретные схмотехнические решения, в разделе 7 приводятся примеры расчётов основного оборудования и схемные решения электрических цепей подвижного состава.

Автор выражает признательность рецензентам – докторам технических наук, профессорам Н. И. Щурову и В. Н. Аносову, сделавшим ценные замечания по материалу, которые были учтены при подготовке окончательного варианта учебного пособия.

1. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

При выполнении расчётно-графической работы (РГР) необходимо:

- выбрать источник энергии для подвижного состава;
- определить количество и тип двигателей тягового привода;
- разработать принципиальную электрическую схему силовых цепей и описать принцип её работы в режимах пуска и торможения;
- рассчитать параметры входящих в силовую схему элементов;
- разработать структурную схему системы управления и описать принцип её работы.

Варианты заданий с исходными данными приведены в таблице.

№ вар.	Тип ПС	Масса, т	Тип тягового двигателя	Элементная база	Накопитель энергии
1	Трамвай	25	Переменный	Транзистор	– *
2	Троллейбус	17	Постоянный	Тиристор	Есть
3	Вагон метро	30	Переменный	Транзистор	–
4	Электромобиль	3,5	Постоянный	Транзистор	Есть
5	Электробус	10	Переменный	Тиристор	Есть
6	Трамвай	30	Постоянный	Транзистор	Есть
7	Троллейбус	25	Переменный	Тиристор	–
8	Вагон метро	35	Постоянный	Транзистор	Есть
9	Электромобиль	5	Переменный	Тиристор	Есть
10	Электробус	14	Постоянный	Транзистор	Есть
11	Трамвай	35	Переменный	Тиристор	–

Окончание таблицы

№ вар.	Тип ПС	Масса, т	Тип тягового двигателя	Элементная база	Накопитель энергии
12	Троллейбус	13	Постоянный	Транзистор	–
13	Вагон метро	45	Переменный	Тиристор	Есть
14	Электромобиль	3	Постоянный	Транзистор	Есть
15	Электробус	17	Переменный	Транзистор	Есть
16	Трамвай	25	Постоянный	Тиристор	Есть
17	Троллейбус	25	Переменный	Тиристор	–
18	Вагон метро	35	Постоянный	Транзистор	Есть
19	Электромобиль	4	Переменный	Транзистор	Есть
20	Электробус	22	Постоянный	Тиристор	Есть
21	Трамвай	35	Переменный	Транзистор	Есть
22	Троллейбус	17	Постоянный	Тиристор	–
23	Вагон метро	45	Переменный	Тиристор	–
24	Электромобиль	4,5	Постоянный	Транзистор	Есть
25	Электробус	15	Переменный	Транзистор	Есть

*Для обеспечения режима электрического торможения следует предусмотреть тормозной реостат.

2. ВЫБОР ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В энергетических установках автономных транспортных средств большой мощности наибольшее развитие получили источники электрической энергии, вырабатываемой электрическими машинами – тяговыми генераторами. Для приведения их в действие используются главным образом тепловые двигатели – дизели и газотурбинные установки [2].

На транспортных средствах с двигателями средней и малой мощности в качестве источников энергии могут использоваться гальванические и топливные элементы, суперконденсаторы, а также их комбинации. В некоторых случаях в качестве дополнительного источника электрической энергии применяются солнечные батареи.

Гальванический элемент является химическим источником тока многократного действия, основная специфика которого заключается в обратимости внутренних химических процессов, что обеспечивает его многократное циклическое использование (через заряд/разряд) для накопления энергии. Несколько аккумуляторов, объединённых в одну электрическую цепь, составляют *тяговую аккумуляторную батарею* (ТАБ). Основные характеристики (электродвижущая сила (ЭДС) и область применения) некоторых аккумуляторов приведены в табл. 2.1.

Основными параметрами сравнения различных типов аккумуляторов являются напряжение разомкнутой цепи, номинальное разрядное напряжение U_p при нормированном токе разряда $I_p = 0,1...0,2C$ (C – номинальная ёмкость аккумулятора) при 25 °С, ёмкость, сохранность и срок службы аккумуляторов, максимальный ток разряда и номинальный

ток заряда. На рис. 2.1 в качестве примера показана зависимость некоторых параметров аккумуляторов от условий эксплуатации.

Т а б л и ц а 2.1

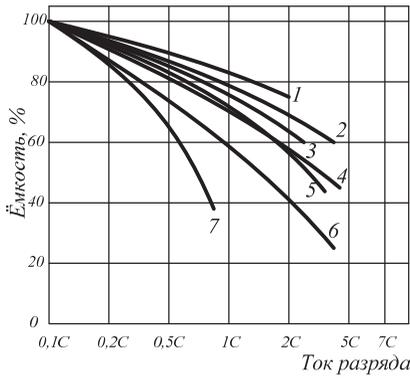
Тип	ЭДС, В	Область применения
Свинцово-кислотные (Pb)	2,1	Троллейбусы, трамваи, воздушные суда, автомобили, мотоциклы, электропогрузчики, штабелёры, электротягачи, аварийное электроснабжение, источники бесперебойного питания
Никель-кадмиевые (Ni-Cd)	1,2	Замена стандартного гальванического элемента, строительные электроинструменты, троллейбусы, воздушные суда
Никель-металлгидридные (Ni-MH)	1,2	Замена стандартного гальванического элемента, электромобили
Литий-ионные (Li-ion)	3,7	Мобильные устройства, строительные электроинструменты, электромобили
Литий-полимерные (Li-pol)	3,7	Мобильные устройства, электромобили
Никель-цинковые (Ni-Zn)	1,6	Замена стандартного гальванического элемента

Кривые на рис. 2.1, *а* соответствуют следующим аккумуляторам: 1 – никель-кадмиевым (Ni-Cd) со спечённым электродом и никель-металлгидридным (Ni-MH); 2 – серебряно-цинковым (Ag-Zn); 3 – никель-кадмиевым (Ni-Cd) с ламельным электродом; 4 – никель-цинковым (Ni-Zn); 5 – литий-ионным (Li-ion); 6 – свинцовым (Pb); 7 – никель-железным (Ni-Fe).

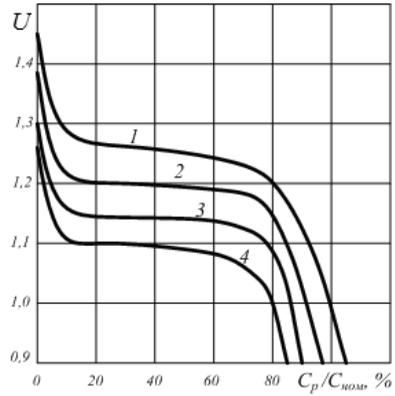
На рис. 2.1, *б* показан характер изменения напряжения в функции неизменного тока разряда при постоянной температуре (20 °С) на примере Ni-MH-аккумулятора: кривая 1 – ток разряда 0,2С; кривая 2 – ток 1С; кривая 3 – ток 2С; кривая 4 – ток 3С.

С повышением нагрузки (уменьшение времени разряда) и при понижении температуры ёмкость Ni-MH-аккумулятора уменьшается (рис. 2.1, *в*). Особенно заметно снижение температуры действует на ёмкость при больших скоростях разряда и при температурах ниже 0 °С:

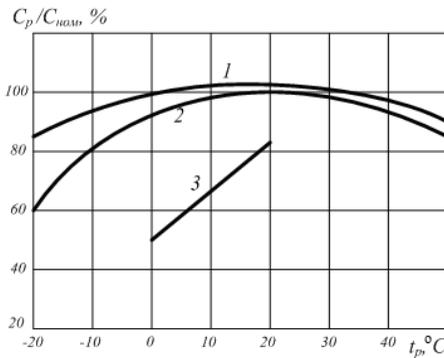
кривая 1 соответствует току разряда, равному 0,2С; кривая 2 – току 1С;
 кривая 3 – току 3С.



а



б



в

Рис. 2.1

При хранении аккумуляторов, как известно, происходит их само-разряд. На рис. 2.2 в качестве примера приведены зоны нахождения зависимостей разрядной ёмкости Ni-MH-аккумулятора от времени хранения (τ) при разных температурах: зона 1 соответствует температуре 0 °С; зона 2 – 20 °С; зона 3 – 40 °С.

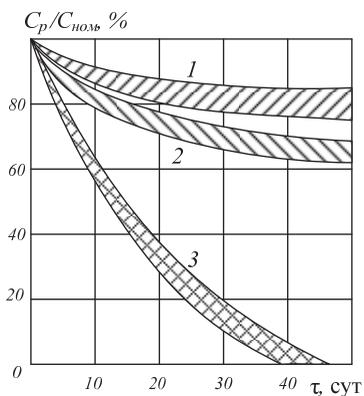


Рис. 2.2

Конструктивное исполнение аккумулятора показано на рис. 2.3. Аккумуляторная батарея состоит из корпуса 1, отрицательного электрода (пластины) 2, сепаратора 3, положительного электрода (пластины) 4, ба- ретки 5, опорных призм 6, крышки 7, пробки заливного отверстия 8, по- ложительного вывода 9, межэлементных перемычек (соединительного мостика) 10 и отрицательного вывода 11.

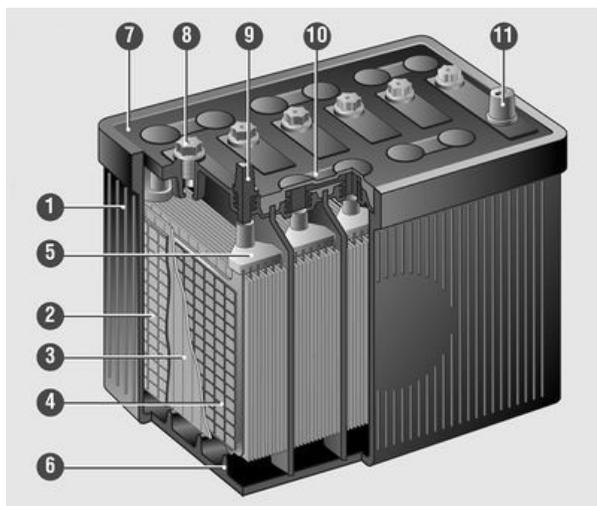


Рис. 2.3

Топливный элемент (ТЭ) – это устройство, которое эффективно вырабатывает постоянный ток и теплоту из богатого водородом топлива путем электрохимической реакции.

В отличие от других генераторов электроэнергии, таких как двигатели внутреннего сгорания или турбины, работающие на газе, угле, мазуте и прочем, топливные элементы не сжигают топливо. Топливные элементы высокоэффективны и не производят большого количества парниковых газов, таких как углекислый газ, метан и оксид азота. Единственным продуктом выброса при работе топливных элементов являются вода в виде пара и небольшое количество углекислого газа, который вообще не выделяется, если в качестве топлива используется чистый водород. Топливные элементы формируются в сборки, а затем – в функциональные модули [2].

Топливные элементы классифицируются по электролиту и виду топлива:

- 1) твёрдополимерные водород-кислородные электролитные;
- 2) твёрдополимерные метанольные;
- 3) на щелочном электролите;
- 4) фосфорно-кислотные;
- 5) на расплавленных карбонатах;
- 6) твёрдооксидные.

Некоторые физико-химические особенности работы ТЭ приведены в табл. 2.2.

Подобно существованию различных типов двигателей внутреннего сгорания, выделяют различные типы топливных элементов – высоко- и низкотемпературные ТЭ. Низкотемпературные требуют в качестве топлива чистый водород.

Преимущества водородных топливных элементов заключаются в следующем:

- экологичность (в воздух выделяется лишь водяной пар, который не наносит вреда окружающей среде);
- компактность (ТЭ легче и имеют меньшие размеры, чем традиционные источники питания, производят меньше шума, меньше нагреваются, более эффективны с позиции потребления топлива);
- высокий КПД (у существующих топливных элементов КПД составляет 60...80 против 35...38 % у тепловых машин).

Т а б л и ц а 2.2

Тип топливного элемента	Реакция на аноде	Электролит	Реакция на катоде	Температура, °С
Щелочной ТЭ (англ. <i>Alkaline fuel cells – AFC</i>)	$2\text{H}_2 + 4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	Раствор КОН	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$	200
ТЭ с протонно-обменной мембраной (англ. <i>Proton-exchange membrane fuel cell – PEMFC</i>)	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	Протонно-обменная мембрана	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	80
Метанольный ТЭ (англ. <i>Direct-methanol fuel cell – DMFC</i>)	$2\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^-$	Протонно-обменная мембрана	$3\text{O}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^- \rightarrow 6\text{H}_2\text{O}$	60
ТЭ на основе ортофосфорной кислоты (англ. <i>Phosphoric-acid fuel cells – PAFC</i>)	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	Раствор фосфорной кислоты	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	200
ТЭ на основе расплавленного карбоната (англ. <i>Molten-carbonate fuel cells – MCFC</i>)	$2\text{H}_2 + 2\text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^-$	Расплавленный карбонат	$\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-}$	650
Твёрдотельный оксидный ТЭ (англ. <i>Solid-oxide fuel cells – SOFC</i>)	$2\text{H}_2 + 2\text{O}_2^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$	Смесь оксидов	$\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}_2^-$	1000

Напряжения, развиваемого одним топливным элементом, недостаточно для приведения во вращение тягового двигателя. Поэтому путём последовательного соединения необходимого количества ТЭ формируются батареи (БТЭ). Внешняя характеристика БТЭ описывается уравнением

$$U_{\text{БТЭ}} = U_{\text{БТЭ}0}(q_{\text{T}}) - r_{q_{\text{T}}} I_{\text{БТЭ}},$$

где $U_{\text{БТЭ}0}(q_{\text{T}})$ – напряжение БТЭ при $I_{\text{БТЭ}} = 0$, q_{T} – удельный расход топлива; $r_{q_{\text{T}}}$ – коэффициент жёсткости внешней характеристики, соответствующий q_{T} и определяемый динамическим сопротивлением.

Пример внешних характеристик напряжения $U_{\text{БТЭ}0}(I_{\text{БТЭ}})$ и мощности $P_{\text{БТЭ}}(I_{\text{БТЭ}})$ БТЭ приведён на рис. 2.4.

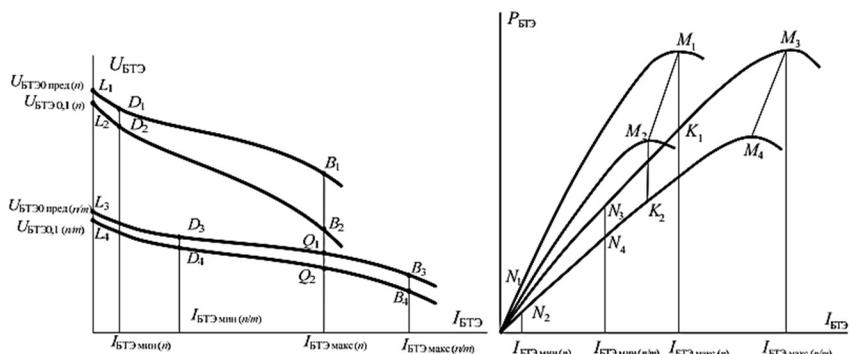


Рис. 2.4

Целесообразная область использования БТЭ на наземном транспорте – питание тяговых электродвигателей мощностью 50...150 кВт.

Появление нового элемента электротехнических устройств – *ионистора* (суперконденсатора, ультраконденсатора, конденсатора двойного электрического слоя) – сделало возможным использование его в качестве источника (накопителя) энергии (НЭ) для автономных транспортных средств.

По своей физической сущности ионистор – это электрохимическое устройство, конденсатор с органическим или неорганическим электролитом, «обкладками» в котором служит двойной электрический слой на границе раздела электрода и электролита. По характеристикам он занимает промежуточное положение между конденсатором и химическим источником тока [2].

Как и любой электротехнический элемент, ионистор обладает достоинствами и недостатками, которые проявляются при сравнении его характеристик с другими источниками электрической энергии, которые могут быть использованы на транспорте.

К основным недостаткам относятся:

- высокая стоимость ионисторов с большими разрядными токами;
- зависимость напряжения от степени заряженности;
- возможность выгорания внутренних контактов при коротком замыкании для ионисторов большой ёмкости с низким внутренним электрическим сопротивлением;

- низкое рабочее напряжение по сравнению с большинством конденсаторов других типов;
- значительно больший по сравнению с аккумуляторами саморазряд – порядка 1 мкА у ионистора $2 \Phi \times 2,5 \text{ В}$;
- существенно меньшая скорость отдачи заряда по сравнению с обычными конденсаторами.

Преимущества ионисторов заключаются в следующем:

- большие максимальные токи зарядки и разрядки;
- малая деградация даже после сотен тысяч циклов заряда/разряда (проводились исследования по определению максимального числа циклов, и после 100 000 циклов ухудшения характеристик не наблюдалось);
- высокое внутреннее сопротивление у большинства ионисторов (препятствует быстрому саморазряду, а также перегреву и разрушению);
- длительный срок службы (при $0,6 U_{\text{ном}}$ около 40 000 ч с незначительным снижением ёмкости);
- малый вес по сравнению с электролитическими конденсаторами идентичной ёмкости;
- низкая токсичность материалов (кроме органических электролитов);
- неполярность (хотя на ионисторах и указаны «+» и «-», это делается для обозначения полярности остаточного напряжения после его зарядки на заводе-изготовителе);
- малая зависимость от окружающей температуры (могут работать как на морозе, так и на жаре – от -40 до $+70 \text{ }^\circ\text{C}$);
- большая механическая прочность (выносят многократные перегрузки).

При выборе того или иного типа источника энергии необходимо сравнивать не только их технические, но и массогабаритные и стоимостные характеристики. В качестве примера блочной компоновки ионисторов (суперконденсаторов) на рис. 2.5 показан один из вариантов их конструкции.

Комбинированный источник энергии, или комбинированная энергетическая установка (КЭУ), тягового привода автономного транспортного средства представляет собой совокупность нескольких видов или типов установок, работающих поочерёдно либо одновременно, дополняя друг друга.

В зависимости от области использования подвижного состава (для внутригородских или междугородных перевозок) различают два режима работы электрооборудования: 1) повторно-кратковременный с частыми пусками и торможением; 2) длительный [2].



Рис. 2.5

В первом случае движение транспортного средства осуществляется по классической схеме «пуск – выбег – торможение». Поскольку при торможении современного подвижного состава используется рекуперация (возврат электрической энергии), то КЭУ должна её воспринимать, т. е. не только быть производителем, но и потребителем энергии.

Во втором случае тяговый электропривод движущегося по маршруту подвижного состава потребляет энергию практически в течение всего времени движения за исключением периода торможения, т. е. в длительном режиме. Переход на выбег в конце движения в целях некоторой экономии энергии за время выбега не всегда может оказаться целесообразным, поскольку в этом случае снижается скорость начала торможения.

При использовании в качестве комбинированного источника *двух тяговых аккумуляторных батарей* режим их работы можно отследить по кривым на рис. 2.6, на котором изображены внешние характеристики каждой из них для моментов начала и конца циклов движения.

В рабочем интервале токов от $I_{\text{КЭУ мин}}$ до $I_{\text{КЭУ макс}}$ характеристики пусковой ТАБ1 обозначены как $A_1 B_{1\text{нач}} D_{1\text{нач}}$ и $A_1 B_{1\text{кон}} D_{1\text{кон}}$, а тяговой

ТАБ2 – $A_2B_{2нач}D_{2нач}$. При выборе пускового источника следует обеспечивать выполнение условия $I_{ЭУ1 макс} > I_{КЭУ макс}$. Запас по току $\Delta I = I_{ЭУ1 макс} - I_{КЭУ макс}$ должен быть таким, чтобы при пуске электро-мобиль на зажимах КЭУ было необходимое напряжение $U_{КЭУ}$, соответствующее ординатам точек $A_1B_{1нач}D_{1нач}$ (рис. 2.6). Тогда внешние характеристики КЭУ суть кривые $A_1B_{1,2нач}C_{нач}D_{2нач}$ и $A_1B_{1,2нач}C_{нач}D_2$ в момент времени $t_{нач}$ и кривые $A_1B_{1,2кон}C_{кон}D_{2кон}$ и $A_1B_{1,2кон}C_{кон}D_2$ в момент времени $t_{кон}$.

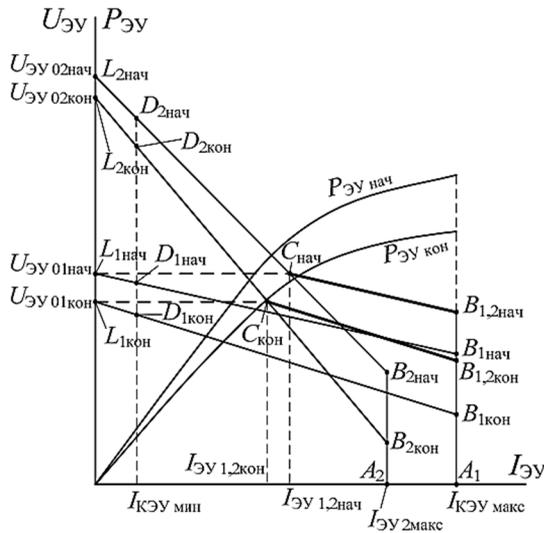
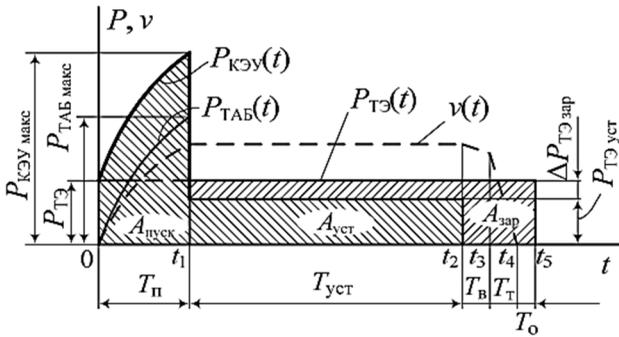


Рис. 2.6

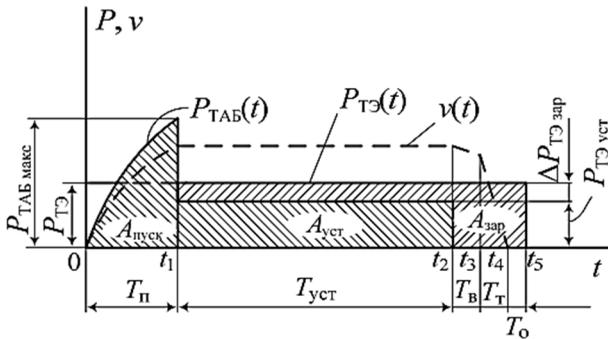
При использовании на транспортном средстве КЭУ на основе ТАБ и ТЭ источники энергии могут питать тяговый электродвигатель (ТЭД) одновременно или поочерёдно (рис. 2.7).

При одновременной работе (рис. 2.7, а) один из источников энергии (здесь – ТЭ) функционирует непрерывно при постоянной мощности $P_{ТЭ}$. Требуемая в течение времени пуска $T_{п}$ максимальная мощность $P_{КЭУ1 макс}$ достигается суммированием мощности $P_{ТЭ}$ и разрядной

мощности аккумуляторной батареи $P_{ТАБ}(t)$, что обеспечивает тяговый привод энергией $A_{П}$, затрачиваемой на разгон подвижного состава до установившейся скорости $v_{уст}$. По окончании разгона в момент времени $t = t_1$ ТАБ отключаются, а поддержание постоянной скорости движения в течение времени $T_{уст}$ осуществляется за счёт энергии $A_{уст}$, вырабатываемой ТЭ. В момент времени $t = t_2$ подвижной состав переводится в режим выбега, в течение которого (в период $T_{в}$) производится подзаряд ТАБ. Далее в интервале времени $T_{т}$ идет процесс торможения [2].



а



б

Рис. 2.7

Энергия $A_{\text{зар}}$, которую вырабатывает ТЭ, расходуется на подзаряд батареи: в период времени $T_{\text{уст}}$ – за счёт мощности $P_{\text{ТЭзар}} = P_{\text{ТЭ}} - P_{\text{ТЭуст}}$, а в период времени $T_{\text{в}} + T_{\text{т}} + T_{\text{о}}$, где $T_{\text{о}}$ – время нахождения на остановочном пункте, – за счёт мощности $P_{\text{ТЭ}}$.

При поочерёдной работе источников (рис. 2.7, б) в течение периода времени $T_{\text{п}}$ работает только ТАБ, и по достижении скорости $v_{\text{уст}}$ включается второй источник, а батарея отключается. Поддержание заданной скорости подвижного состава, а также подзаряд ТАБ в период времени $T_{\text{уст}}$ осуществляются за счёт энергии генератора, развивающего мощность $P_{\text{г.уст}}$. В период времени $T_{\text{в}} + T_{\text{т}} + T_{\text{о}}$ происходит восполнение запаса энергии батареи.

При использовании на автономном транспортном средстве в качестве КЭУ *тяговой батареи и накопителя энергии* появляется возможность сокращения расхода электроэнергии на движение за счёт рекуперативного торможения.

Поскольку в режиме электрического торможения ток рекуперации соизмерим с пусковым током, а ТАБ рекомендуется заряжать током на порядок меньше пускового, то возникает необходимость сохранения энергии в некотором накопителе, в качестве которого может выступать конденсатор. При этом конденсатор должен быть рассчитан на двойное напряжение по отношению к номинальному, которое допускается на двигателе в режиме работы приводного мотора-генератора. Поэтому зарядный ток ТАБ необходимо регулировать. Один из вариантов для случая использования в приводе машины постоянного тока регулятора тока заряда ТАБ с применением IGBT-транзисторов приведён на рис. 2.8 [2].

Принцип работы схемы заключается в следующем. При пуске регулирование подачи энергии в электродвигатель осуществляется транзистором $VT2$, регулирование тормозного тока – транзистором $VT3$, а регулирование тока заряда аккумулятора – транзистором $VT1$.

Ток рекуперации заряжает накопитель (конденсатор C), а регулирование величины зарядного тока аккумулятора производится транзистором $VT3$ до тех пор, пока напряжение накопителя не сравняется с напряжением на аккумуляторе.

Если напряжение на накопителе $U_{\text{нак}}$ не успело снизиться до уровня напряжения на батарее $U_{\text{пит}}$ и начался повторный пуск, то питание

электродвигателя на начальной стадии пуска осуществляется от накопителя до тех пор, пока $U_{\text{нак}}$ не станет равным $U_{\text{пит}}$.

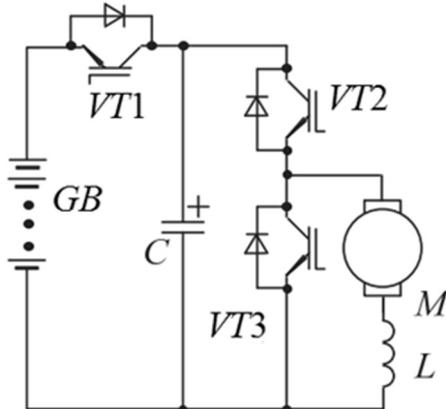


Рис. 2.8

Комбинированные источники энергии на базе *теплового двигателя, тягового генератора и накопителя энергии* получили довольно широкое распространение на подвижном составе большой грузоподъёмности как безрельсового (например, карьерные самосвалы), так и рельсового (например, тепловозы) транспорта.

Применительно к пассажирскому транспорту для массовых перевозок использование энергетической установки (ЭУ) в таком сочетании элементов становится привлекательным при дополнении её накопителем энергии, в качестве которого можно использовать как аккумуляторы (при условии восприятия ими зарядного тока, равного разрядному), так и конденсаторы.

Структурная схема ЭУ приведена на рис. 2.9.

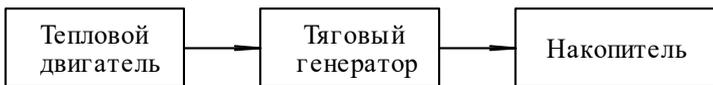


Рис. 2.9

В качестве теплового двигателя можно использовать дизель или бензиновый двигатель, в качестве тягового генератора – машину постоянного тока или трёхфазный генератор с выпрямителем.

Применительно к индивидуальным транспортным средствам использовать такое схемное решение нецелесообразно, поскольку вес энергетической установки значительно возрастает из-за тягового генератора.

Более приемлемым вариантом, который уже используется производителями легковых автомобилей, является дооснащение их электрической машиной, применяемой в режиме рекуперативного торможения как генератор, а на начальной стадии разгона после остановки – в качестве двигателя. Номинальная мощность электрической машины, а следовательно, и её вес в этом случае значительно меньше, чем в варианте использования её в электрическом приводе тягового генератора, а накопленная в процессе рекуперативного торможения энергия расходуется на начальной стадии разгона, когда машина работает в режиме двигателя совместно с тепловым.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ТЯГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЕГО МОЩНОСТИ

Динамика транспортного средства определяется величиной ускорения, которое при пуске подвижного состава (ПС) большой вместимости не должно превышать $a_{\text{пуск}} < 1,5 \text{ м/с}^2$, а его нарастание $a'_{\text{пуск}} < 2 \text{ м/с}^3$. Для транспортных средств, в которых всем пассажирам предоставлены сидячие места, ускорение можно принимать равным $a_{\text{пуск}} = 3 \dots 4 \text{ м/с}^2$.

Мощность тягового электродвигателя (ТЭД), развиваемая на обode колеса, определяется согласно [3–5] как

$$P = F_{\text{тяг}} v,$$

где $F_{\text{тяг}} = 102(1 + \gamma) \frac{G_{\text{ПС}}}{g} a_{\text{пуск}} + w_0 G_{\text{ПС}}$ – тяговое усилие на обode колеса,

H , γ – коэффициент инерции вращающихся масс подвижного состава, $G_{\text{ПС}}$ – вес подвижного состава, кН, w_0 – основное удельное сопротивление движению транспортного средства, Н/кН; v – скорость транспортного средства, м/с.

При расчёте мощности двигателя постоянного тока скорость v должна приниматься равной пусковой, за которую принимают скорость выхода на автоматическую характеристику полного поля.

Повторно-кратковременный режим работы тягового двигателя допускает его двукратную перегрузку по току, что позволяет расчётную величину мощности снизить в два раза.

Для машины переменного тока перегрузка может достигать трёхкратной величины.

С учётом потерь в тяговой передаче номинальная мощность машины определяется согласно формуле

$$P_{ТЭД} = P / \eta_{пер},$$

где $\eta_{пер}$ – КПД передачи, который на начальной стадии проектирования может быть принят равным 0,95.

Для рассчитанной мощности следует подобрать серийно выпускаемую машину по условию $P_{ТЭД\text{сер}} > P_{ТЭД}$. В том случае, когда нет серийной машины, следует перейти от однодвигательного привода к многодвигательному.

Тяговый привод может быть построен на основе двигателя как постоянного, так и переменного тока. При этом, поскольку питание двигателя постоянного тока осуществляется от источника постоянного тока, регулирование подаваемой в него энергии может осуществляться через преобразователь постоянно-постоянного тока, а машины переменного тока – через преобразователь постоянно-переменного тока.

В силу особенностей свойств на транспорте целесообразно применять машины с «жесткой» характеристикой, при которой зависимость скорости от силы тяги незначительно изменяется во всём диапазоне изменения тягового усилия. Такими свойствами обладают машины постоянного тока независимого возбуждения и синхронные машины с фазным ротором или с постоянными магнитами.

Постоянное совершенствование электрооборудования подвижного состава привело к появлению схемных и конструктивных решений, в которых тяговые электродвигатели объединяются с другими элементами тягового привода в один агрегат (мотор-колесо, мотор-ось). В качестве примера на рис. 3.1 приведено мотор-колесо троллейбуса [5].

Передний подшипниковый щит электродвигателя 1 болтами 2 соединён со стаканом 3, наружная цилиндрическая поверхность которого является опорой подшипников 4, на внешнюю обойму которых посажена ступица 5 колеса. Ко второй торцевой поверхности стакана крепятся на шпильках корпус 6 двухступенчатого планетарного редуктора и крышка 7, к которой посредством болтового соединения привёрнут суппорт 8 тормозного механизма барабанного типа. К корпусу редуктора со стороны двигателя болтами прикреплено водило 9 первой ступени редуктора.

Крутящий момент с вала 10 тягового двигателя, на который посредством шлицевого соединения насажена солнечная шестерня 11 первой

ступени редуктора, передаётся на сателлиты, а с них – на коронную шестерню 12. Её торцевая часть заканчивается валом-шестернёй 13, являющейся солнечной для второй ступени редуктора.

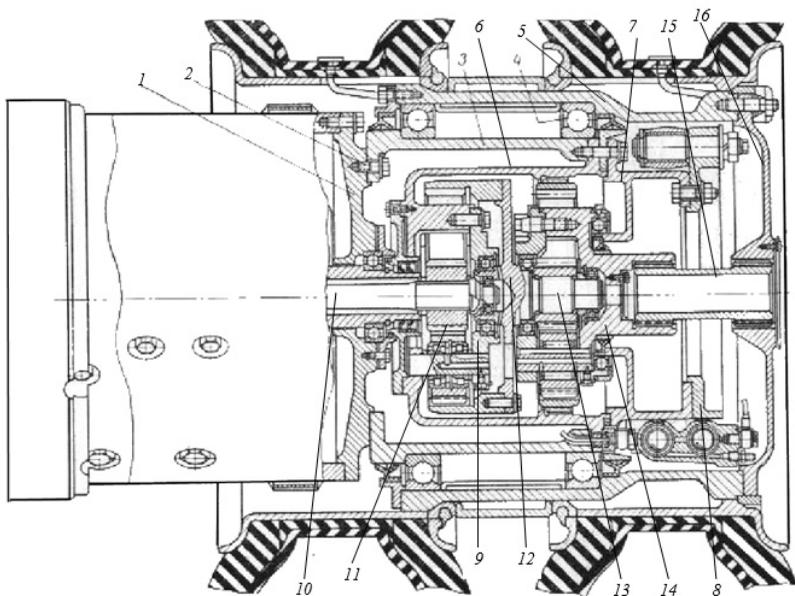


Рис. 3.1

Поскольку коронная шестерня второй ступени нарезана на неподвижном корпусе 6 редуктора, то крутящий момент с солнечной шестерни этой ступени через сателлиты передаётся на водило 14, которое через полый вал 15 связано с крышкой колеса 16, а то, в свою очередь, – со ступицей 5 колеса.

В качестве примера на рис. 3.2 приведено конструктивное исполнение мотор-колеса трамвайного вагона Variobahn с трёхфазным асинхронным двигателем.

Статорная обмотка двигателя уложена на валу машины, а роторная – в корпусе. Благодаря такой компоновке удалось, во-первых, решить проблему подведения питания к трёхфазной обмотке статора; во-вторых, обеспечить приемлемое решение фиксации жёсткого колеса на корпусе двигателя и, в-третьих, исключить из механической части привода такой элемент, как редуктор.

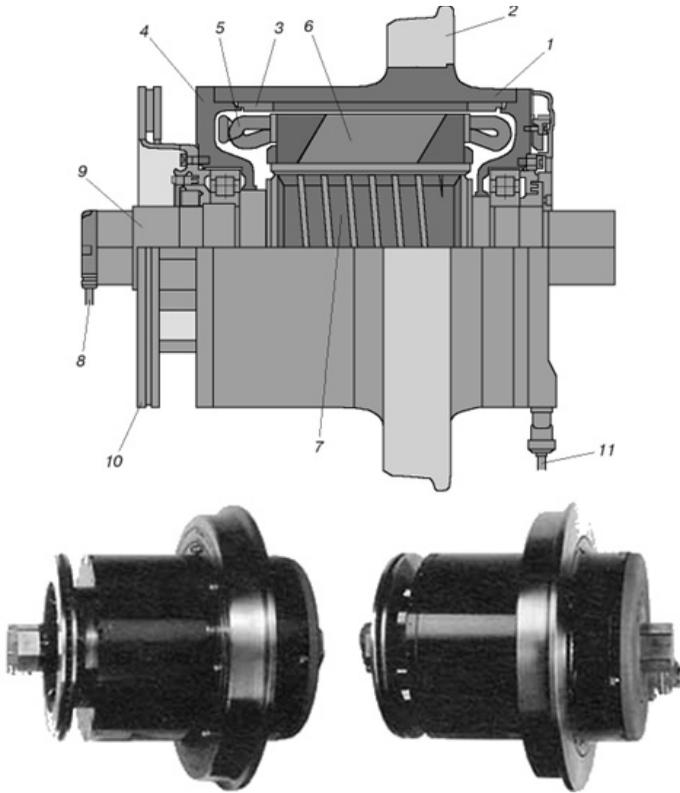


Рис. 3.2

Корпус 1 (рис. 3.2) является основанием для колёсного банджа 2 и ротором двигателя, в пазы которого уложены стержни 3 короткозамкнутой обмотки. Вращающиеся подшипниковые щиты 4 герметизируют внутренний объём двигателя, защищая статорную обмотку 5, уложенную в пакет 6 статора, от попадания пыли и грязи. Пакет статора насажен на трубу 7 рубашки охлаждения, а та, в свою очередь, – на неподвижную полуось 9 колёсной пары. Штекерный разъем 8 служит для подвода трёхфазного питания, а штуцер 11 – для подвода охлаждающей жидкости.

При выполнении расчётно-графического задания необходимо определиться с типом привода (индивидуальный, групповой, дифференциальный), что оказывает существенное влияние на принципиальную электрическую схему.

4. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ

Независимо от рода тока тягового двигателя принципиальная электрическая схема силовых цепей должна включать в себя помимо источника энергии элементы, обеспечивающие все режимы работы транспортного средства и защищающие электрооборудование от нештатных ситуаций: коротких замыканий, понижения и повышения напряжения, перегрева оборудования, превышения скорости движения и т. д. [2, 5–7].

В качестве защитных устройств и коммутирующих аппаратов, обеспечивающих сборку цепи для реализации заданного режима работы, используются электромагнитные реле и контакторы. Как устройства управления и защиты применяются автоматические выключатели, предохранители, резисторы, дроссели.

На рис. 4.1 приведена конструкция контактора КТК-0-10, имеющего два силовых контактора, заключённых в дугогасительные камеры. Контактор рассчитан на применение в цепях постоянного тока напряжением 550 В на токи до 15 А.

Характерной компоновкой электрооборудования для всех без исключения моделей электрического подвижного состава является блочный вариант её исполнения, при котором однотипные элементы размещаются на одной панели, или конструктиве. В качестве примера на рис. 4.2 приведена компоновка контакторов и реле в троллейбусе Тролза-5265.00 «Мегаполис».

На левой панели размещены контакторы, на правой – автоматические выключатели, на средней – реле. Связь между элементами электрических цепей осуществляется посредством жгутов, каждый из проводов которых подводится к соответствующим клеммным рейкам.

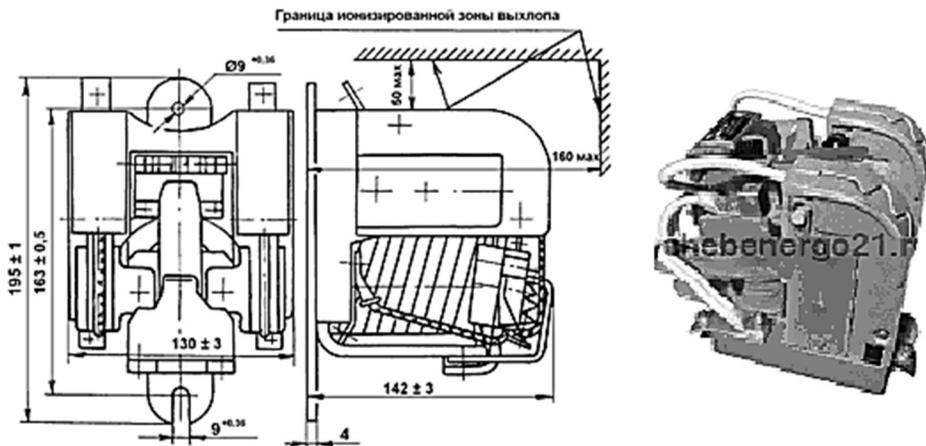


Рис. 4.1

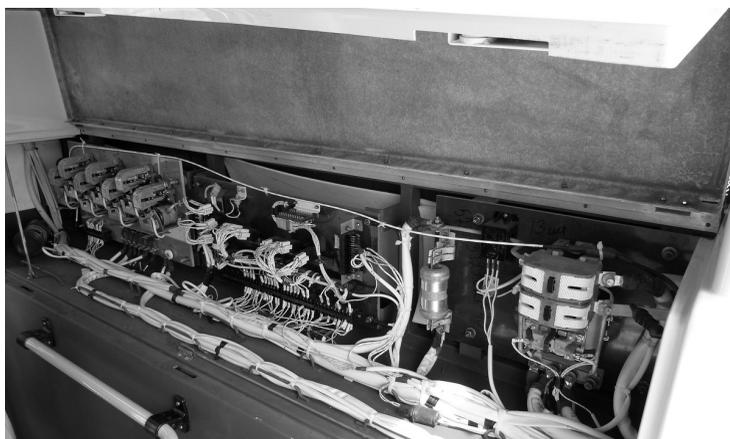


Рис. 4.2

Вариант исполнения принципиальной электрической схемы силовых цепей однодвигательного подвижного состава с машиной постоянного тока приведён на рис. 4.3 [5].

Схема включает в себя: источник энергии GB (аккумулятор); буферный конденсатор C ; тяговый электродвигатель постоянного тока M последовательного возбуждения (обмотка возбуждения L); регулятор тока заряда аккумулятора на транзисторе $VT1$; регулятор тока мотора

при пуске на транзисторе $VT2$; регулятор тормозного тока мотора на транзисторе $VT3$; регулятор ослабления поля мотора на транзисторе $VT4$ и резисторе R ; автоматический выключатель QF ; реверсор направления движения, выполненный на силовых контактах $K1...K4$; контакт $K5$ переключения режимов движения (пуск – торможение); индикаторные приборы (тока – PA и напряжения – PV). В режиме пуска замкнуты контакты $K1$ и $K3$ реверсора, в режиме торможения и движения назад – контакты $K2$ и $K4$.

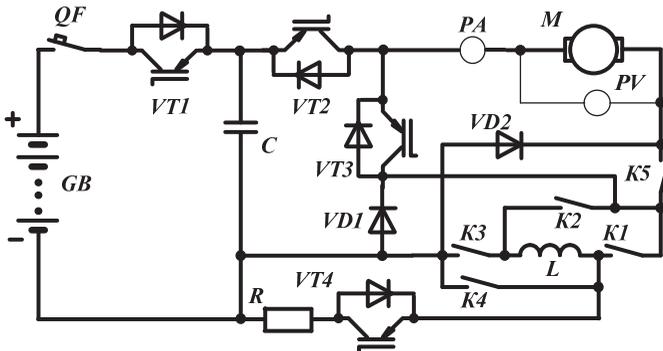


Рис. 4.3

Принцип работы схемы (рис. 4.3) в режиме пуска заключается в следующем. После замыкания контакта $K5$ и включения автоматического выключателя QF по цепи: «+» GB – диод транзистора $VT1$ – конденсатор C – «-» GB происходит заряд конденсатора до напряжения аккумулятора. После установки реверсора в положение «Вперёд» (замыкаются его контакты $K1$ и $K3$) схема готова к работе. Регулирование тока через тяговый двигатель осуществляется отпиранием транзистора $VT2$, работающего в ключевом режиме. В период проводящего состояния транзистора образуется цепь: «+» GB – диод транзистора $VT1$ – транзистор $VT2$ – якорь двигателя M – контакт $K5$ – контакт $K1$ – обмотка возбуждения L – контакт $K3$ – «-» GB . По достижении током двигателя величины тока уставки транзистор $VT2$ запирается, а ток начинает циркулировать в контуре: якорь двигателя M – контакт $K5$ – контакт $K1$ – обмотка возбуждения L – контакт $K3$ – диод $VD1$ – диод транзистора $VT3$ – якорь двигателя M , спадая до некоторого минимального значения, по достижении которого вновь отпирается транзистор $VT2$. Далее процессы в схеме повторяются.

По достижении электромобилем скорости, соответствующей выходу на характеристику полного поля двигателя (транзистор $VT2$ находится в проводящем состоянии весь период регулирования), производится ослабление поля машины посредством отпирания транзистора $VT4$, шунтирующего обмотку возбуждения резистором R . Транзистор также работает в ключевом режиме. По достижении электромобилем скорости, соответствующей характеристике максимального ослабления поля, транзистор $VT4$ проводит ток весь период регулирования.

Для перехода в режим торможения размыкается контакт $K5$. Регулирование тока якоря двигателя осуществляется изменением длительности проводящего состояния транзистора $VT3$. В проводящем состоянии ток двигателя протекает по цепи: якорь двигателя M – транзистор $VT3$ – контакт $K1$ – обмотка возбуждения L – контакт $K3$ – диод $VD2$ – якорь двигателя M . Величина тормозного тока, как и в режиме пуска, осуществляется изменением времени проводящего состояния транзистора $VT3$. В случае перехода в режим торможения на высокой скорости процесс начинается на ослабленном поле, которое, как и при пуске, осуществляется подключением резистора R параллельно обмотке возбуждения двигателя.

В интервале времени запертого состояния транзистора, который начинается по достижении током заданного значения, двигатель осуществляет заряд конденсатора C по цепи: якорь двигателя M – обратный диод транзистора $VT2$ – конденсатор C – диод $VD1$ – контакт $K1$ – обмотка возбуждения L – контакт $K3$ – диод $VD2$ – якорь двигателя M .

Поскольку напряжение на конденсаторе может достигать двойного значения по отношению к напряжению аккумулятора, то заряд последнего допустимым током осуществляется посредством транзистора $VT1$ до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не снизится до напряжения на аккумуляторе.

Использование механического коммутатора направления движения «Вперёд» – «Назад», называемого *реверсором*, исключает возможность самопроизвольного (без участия водителя) перехода из заданного режима.

Движение транспортного средства по путевой структуре должно осуществляться как в прямом, так и в обратном направлении. Для выполнения этого требования на подвижном составе, оснащённом приводом на постоянном токе, в силовой цепи также используется реверсор.

Как известно, для изменения направления вращения якоря необходимо изменить направление тока в якорной обмотке или обмотке возбуждения. Реверсоры могут быть как контактные (рис. 4.4, а, в), так и бесконтактные (рис. 4.4, б, г). Последние выполняются на полупроводниковых ключах.

В машинах переменного тока для смены направления вращения ротора следует изменить последовательность подачи питания на фазы статора, что может быть выполнено схемотехнически путём изменения схемой управления последовательности подачи отпирающих импульсов на полупроводниковые ключи фаз.

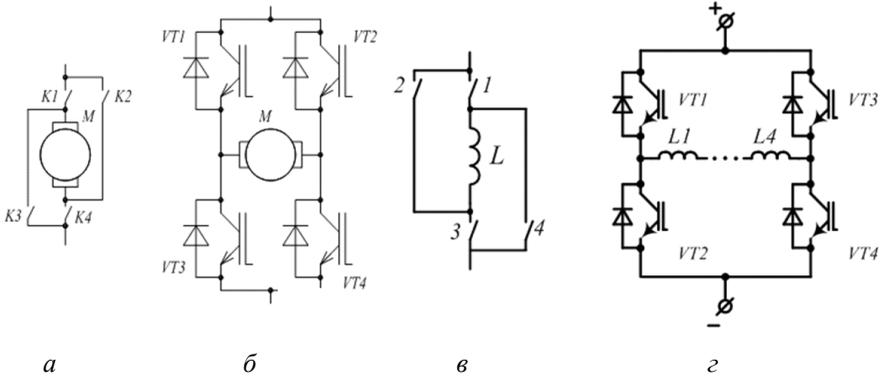


Рис. 4.4

Один из вариантов исполнения тягового привода на базе трёхфазной машины переменного тока с постоянными магнитами приведён на рис. 4.5.

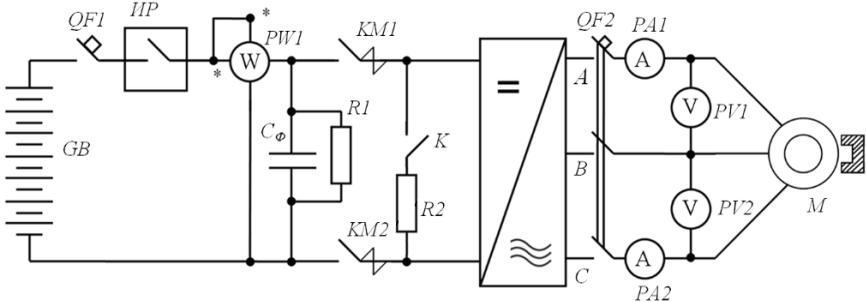


Рис. 4.5

Принцип работы схемы (рис. 4.5) заключается в следующем. При включении автоматического выключателя $QF1$ и импульсного регулятора (ИР) по цепи: $QF1$ – ИР – фильтровой конденсатор C_ϕ – аккумуляторная батарея GB просходит заряд конденсатора фильтра. После полного заряда конденсатора включаются линейные контакторы $KM1$ и $KM2$, подавая напряжение на инвертор UZ . Посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) формируется из постоянного трёхфазное переменное напряжение. После включения автоматического выключателя $QF2$ и нажатия на педаль акселератора на двигатель M подаётся питание, и двигатель начинает движение.

Электрическое торможение в такой схеме происходит либо с рекуперацией энергии, либо с помощью торможения противовключением.

Торможение противовключением осуществляется при изменении чередования двух фаз. Благодаря наличию инвертора удаётся преобразовать это чередование изменением порядка работы самих транзисторов (изменение порядка их отпирания и запираия).

Рекуперативное торможение работает по следующему принципу. Протекание тока рекуперации осуществляется по контуру: $M - QF2 - UZ - KM1 - C_\phi - KM2 - UZ - QF2 - M$. При достижении на конденсаторе фильтра большей величины напряжения, чем выдаёт батарея GB , рекуперативный ток начинает протекать по контуру: $C_\phi - ИР - QF1 - GB - C_\phi$. При больших значениях величины рекуперативного тока импульсный регулятор ИР ограничит его величину.

При замещении рекуперативного торможения реостатным в схеме замыкается контакт K , подключающий тормозной резистор $R2$.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

Источник питания. При использовании в качестве источника питания аккумуляторной батареи она должна быть рассчитана на номинальное напряжение тягового двигателя. При этом необходимо учитывать, что в режиме рекуперативного торможения с высоких скоростей движения на тяговом двигателе может возникнуть напряжение, превышающее его номинальное напряжение почти в два раза. Поэтому непосредственная рекуперация на аккумулятор невозможна, и в схеме необходимо предусмотреть, во-первых, промежуточный (буферный) накопитель энергии на такое напряжение и, во-вторых, регулятор, обеспечивающий заряд аккумулятора допустимым током. В схеме на рис. 5.1 в качестве регулятора заряда аккумуляторной батареи используется транзистор $VТ1$, а в качестве буферного накопителя – конденсатор C [2, 5].

Аналогичные соображения справедливы и для таких источников, как батареи топливных элементов и конденсаторов двойного электрического слоя (КДС), с той лишь разницей, что поскольку топливные элементы не способны накапливать энергию рекуперации, вся она сохраняется в буферном конденсаторе.

При использовании в качестве источника батареи КДС может и не быть буферного конденсатора, при этом источник напряжения должен рассчитываться на напряжение выше номинального напряжения двигателя.

При отсутствии возможности рекуперативного торможения оно должно замещаться реостатным.

Тормозной резистор. Поскольку резисторы выбираются по эффективному току, его следует рассчитывать по формуле

$$I_{эф} = \sqrt{\left[\sum I_T^2 \Delta t_T \right] n_{ц}},$$

где I_T – средние величины тока, протекающего по резистору в режиме торможения; Δt_T – время движения при торможении; $n_{ц}$ – количество циклов торможения в течение часа. Для подвижного состава трамваев и троллейбусов можно принять $n_{ц} = 100 \dots 120$ цикл/ч, а для вагонов метрополитенов – $n_{ц} = 40 \dots 60$ цикл/ч [5].

Элементы выбирают с длительным током $I_{\infty} \geq I_{\text{эф}}$. Элементы с наибольшим длительным током $I_{\text{эф}} > I_{\infty}$ соединяются параллельно.

Наиболее «тяжёлым» в плане нагрева резисторов является режим торможения с максимальной скорости. При этом реостатное торможение осуществляется до скорости 5...7 км/ч, после чего замещается механическим. Диаграмма на рис. 5.1 иллюстрирует процесс торможения.

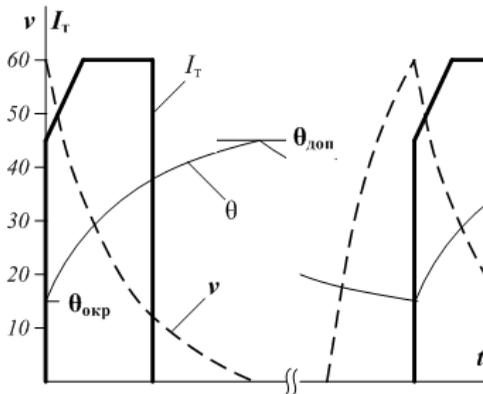


Рис. 5.1

В основу теплового расчёта реостатов при маневровом режиме принимают уравнение нагревания однородного тела

$$\theta = T_{\text{окр}} + \theta_{\text{доп}} (1 - e^{-t_{\text{торм}}/T}),$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды; $\theta_{\text{доп}} = \theta_{\text{макс}} = 350$ °С – допустимый перегрев элемента при эффективном токе I_T ; θ_0 – перегрев элемента при эффективном токе $I_{\text{эф}}$; T – постоянная времени (для фехральных элементов без обдува $T = 3 \dots 6$ мин).

Применение на подвижном составе с двигателями переменного тока реостатного торможения целесообразно при установке резистора до инвертора (см. резистор $R2$ на рис. 4.5).

Полупроводниковые приборы. Существующая в настоящее время и постоянно совершенствующаяся элементная база полупроводниковых приборов позволила существенно упростить схемы силовых цепей тяговых приводов за счёт замены контактных ключей их высоковольтными сильноточными аналогами. Кроме того, появление компактных накопителей электрической энергии позволило использовать режим безреостатного пуска и рекуперативного торможения двигателей постоянного тока, а в приводах переменного тока применять полупроводниковые инверторы, существенно снижающие энергопотребление подвижным составом.

На рис. 5.2 приведены схемы частотного (*а*) и широтного (*б*) ключей на базе *SCR*-тиристоров.

Описание принципа работы ключей подробно изложено в [6] и поэтому здесь не приводится.

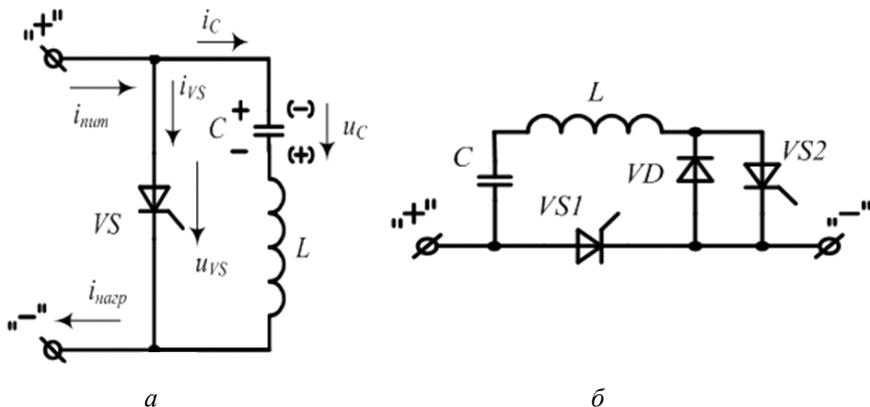


Рис. 5.2

Появление мощных высокочастотных транзисторов привело к отказу в ряде случаев от использования низкочастотных *SCR*-тиристоров в пользу транзисторов. Нужно отметить, что в отличие от раннего периода развития силовой полупроводниковой техники, когда каждый ключ изготавливался индивидуально, в настоящее время выпускаются сборки (модули), в которых объединяется по несколько сильноточных

элементов, образующих, по сути, фрагменты силовых цепей приводов. В качестве примера на рис. 5.3 приведена сборка IGBT-транзисторов, формирующая инвертор.

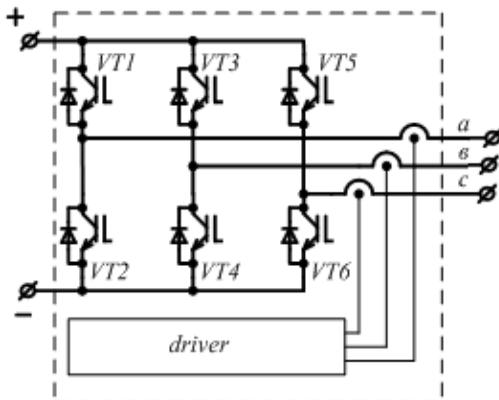


Рис. 5.3

Модуль может быть использован не только в цепях питания машин переменного тока, но и в приводах постоянного тока. Он выполняет роль регулятора тока якоря двигателя в режимах пуска и торможения, а также обеспечивает реверсирование тока в цепи обмотки возбуждения для изменения направления вращения якоря двигателя в режиме движения назад.

Схемное решение цепей привода постоянного тока представлено на рис. 5.4 [5–7].

Обмотка возбуждения двигателя $L1$ включена в диагональ моста, выполненного на транзисторах $VT1–VT4$, и ток в ней течёт в одном направлении, если, например, включены транзисторы $VT1$ и $VT4$, и в обратном, если включены транзисторы $VT2$ и $VT3$. Таким образом реализуется схема полупроводникового инвертора.

В двигательном режиме транзистор $VT5$ регулирует величину тока мотора $M1$, а в тормозном – транзистор $VT6$. При этом в течение паузы (непроводящего состояния транзистора) происходит рекуперация.

По току и напряжению инвертор выбирается таким образом, чтобы в проводящем состоянии токи транзисторов были не менее пускового тока двигателя, а в запертом состоянии выдерживали максимально допустимое напряжение, вырабатываемое электрической машиной в генераторном режиме.

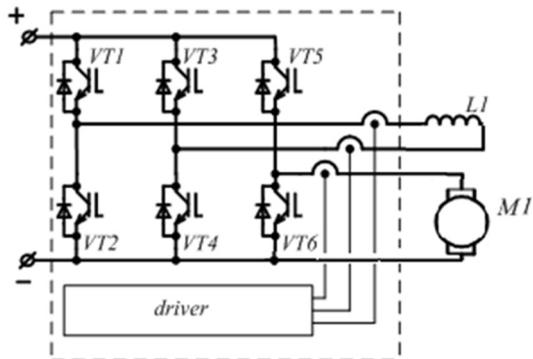


Рис. 5.4

В случае замещения рекуперативного торможения реостатным, при котором тормозной резистор подключается параллельно якорю двигателя, транзистор в цепи тормозного резистора выбирается по тем же параметрам, что и транзисторы сборки.

В настоящее время производятся модули полупроводниковых приборов, объединяющие не только транзисторы, но и диоды, и их сочетания в различных вариантах, позволяющие существенно упростить сборку силовых цепей подвижного состава.

6. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В данном разделе не рассматриваются вопросы управления вспомогательным и дополнительным оборудованием электроподвижного состава, которые довольно подробно освещены в литературе [5].

Поскольку все без исключения системы управления транспортными средствами должны содержать определённый набор функционально законченных блоков, а структура системы управления преобразователем существенно зависит от его конкретного схемного решения, разработку структурной схемы системы управления необходимо начинать с анализа режимов работы силовых цепей преобразователя и рассмотрения электромагнитных процессов, протекающих в нём.

В качестве примера рассмотрим принципы разработки структурной схемы двухфазного широтно-импульсного преобразователя с общим узлом ёмкостной коммутации на *SCR*-тиристорах, работающего на раздельную (пофазную) нагрузку (рис. 6.1). Диаграммы электромагнитных процессов в цепях преобразователя, приведённые на рисунке, отражают характер процесса перезаряда коммутирующего конденсатора *C*, изменения токов фаз и времени подачи отпирающих импульсов на управляющие электроды тиристоров [6].

Схема не содержит целого ряда электрических и электронных аппаратов, необходимых для нормального функционирования преобразователя. В частности, отсутствуют датчики тока, напряжения, температуры и другие, необходимые для сбора информации о состоянии цепей всего подвижного состава и элементов самого преобразователя. Однако при разработке структурной схемы они должны быть учтены. В целях упрощения пояснения принципов разработки структурной

схемы управления преобразователем из него исключены цепи ослабления поля электрических машин, которые могут быть дополнены студентами самостоятельно.

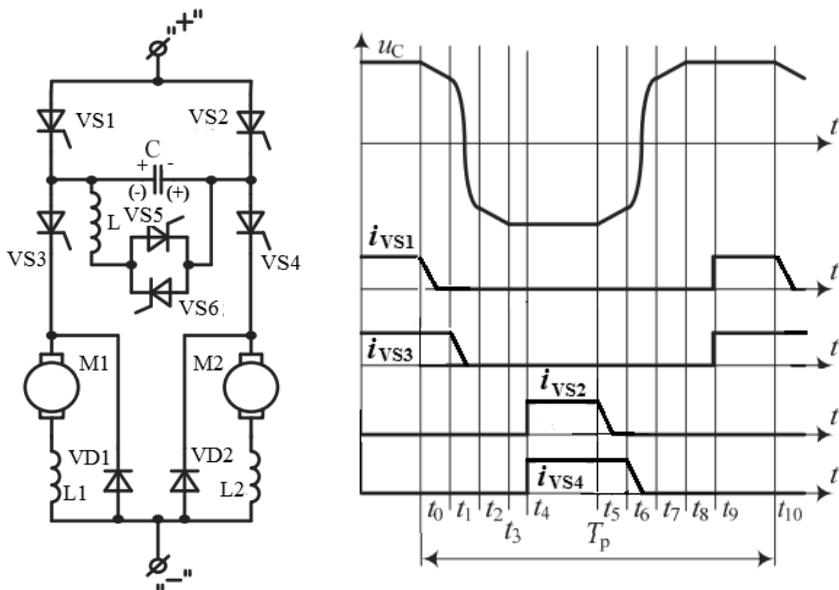


Рис. 6.1

На схеме (рис. 6.1) приведён двухфазный тиристорный широтно-импульсный преобразователь с общим узлом ёмкостной коммутации и цепью ускоренного перезаряда, включающей в себя дроссель L и соединённые встречно-параллельно тиристоры $VS5$ и $VS6$.

Анализ протекающих в преобразователе процессов целесообразно провести с описания работы схемы.

Пусть до момента времени t_0 в проводящем состоянии были тиристоры $VS1$ и $VS3$. Напряжение на коммутирующем конденсаторе C имело полярность, указанную без скобок. Ток первого двигателя протекал по цепи: «+» источника питания – тиристоры $VS1$ и $VS3$ – якорь мотора $M1$ – обмотка возбуждения $L1$ – «-» источника питания. При этом во втором двигателе ток циркулировал по цепи: якорь мотора $M2$ – обмотка возбуждения $L2$ – обратный диод $VD2$ – якорь мотора $M2$.

В момент времени t_0 (диаграмма мгновенных значений токов и напряжений на элементах схемы рис. 6.1) отпирается тиристор $VS2$, и к тиристору $VS1$ прикладывается обратной полярностью напряжение конденсатора C , что приводит к снижению на нём напряжения и запираению тиристора $VS1$. В момент времени t_1 отпирается тиристор $VS5$, подключая цепь ускоренного перезаряда коммутирующего конденсатора, состоящую из дросселя L и тиристора, что приводит к перезаряду конденсатора на полярность, указанную в скобках. В момент времени t_2 через цепь ускоренного перезаряда прекращается протекание тока, так как тиристор $VS5$ запирается из-за того, что к нему приложено напряжение обратной полярности конденсатора.

Далее происходит дозаряд конденсатора током двигателя $M1$ по цепи: «+» источника питания – тиристор $VS2$ – конденсатор C – тиристор $VS3$ – якорь мотора $M1$ – обмотка возбуждения $L1$ – «-» источника питания до момента времени t_3 , когда конденсатор зарядится до напряжения источника питания, после чего запираются тиристоры $VS2$ и $VS3$, а ток мотора начинает циркулировать по контуру: якорь $M1$ – обмотка возбуждения $L1$ – обратный диод $VD1$ – якорь $M1$.

В момент времени t_4 отпираются тиристоры $VS2$ и $VS4$, подключая двигатель $M2$ к источнику питания. В интервале времени $t_4 \dots t_5$ двигатель $M2$ потребляет энергию от источника питания. В момент времени t_5 отпирается тиристор $VS1$, и напряжение конденсатора обратной полярности прикладывается к тиристорам $VS2$, что приводит к его запираению, а ток двигателя $M2$ начинает протекать по цепи: «+» источника питания – тиристор $VS1$ – конденсатор C – тиристор $VS4$ – мотор $M2$ – обмотка возбуждения $L2$ – «-» источника питания.

В момент времени t_6 отпирается тиристор $VS6$, подключая контур ускоренного перезаряда. Ко времени t_7 перезаряд завершается, а напряжение на коммутирующем конденсаторе изменяет полярность на исходную. При этом тиристор $VS6$ запирается, так как к нему прикладывается напряжение обратной полярности, а конденсатор продолжает заряжаться током двигателя до напряжения источника питания, после чего тиристоры $VS1$ и $VS4$ переходят в непроводящее состояние.

В момент времени t_9 вновь отпираются тиристоры $VS1$ и $VS3$, подключая первый двигатель к источнику питания.

В момент времени t_{10} включается тиристор $VS2$. Далее процессы в схеме повторяются.

Основное назначение структурных схем систем управления преобразователями заключается в обозначении путей информационных каналов, поэтому связи ИП2 с блоками системы управления условно не показаны.

Работу системы управления необходимо привязать к опорному генератору временного интервала, которым в преобразователях с широтной модуляцией является длительность периода регулирования, а в частотных – диапазон изменения частоты регулирования. В качестве такого задатчика времени обычно используют генератор тактовых (прямоугольных) импульсов напряжения высокой частоты, отличающийся стабильностью. На рис. 6.2 приведена диаграмма задающего генератора (ЗГ).

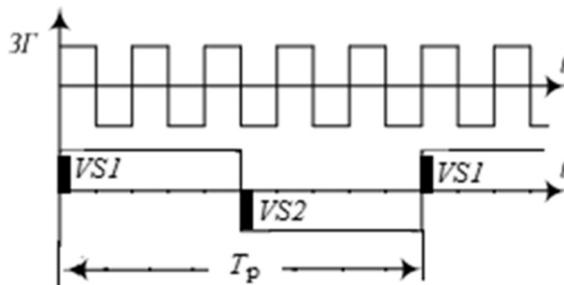


Рис. 6.2

Длительность периода регулирования T_p в широтно-импульсных преобразователях и максимальная частота в частотно-импульсных определяются параметрами силовых полупроводниковых приборов, используемых в качестве ключей силовых цепей преобразователя.

Выполнение одного из основных требований, предъявляемых к системе управления, – стабильности выходных параметров – однозначно определило элементную базу ЗГ – кварцевый резонатор. Так как частоты генерации импульсов кварцевых резонаторов лежат в пределах десятков килогерц – сотен мегагерц, а рабочая частота тиристоров не превышает $1 \dots 2$ кГц, то в ЗГ предусматривается применение делителей частоты, понижающих его выходную частоту до необходимого значения (рис. 6.3).

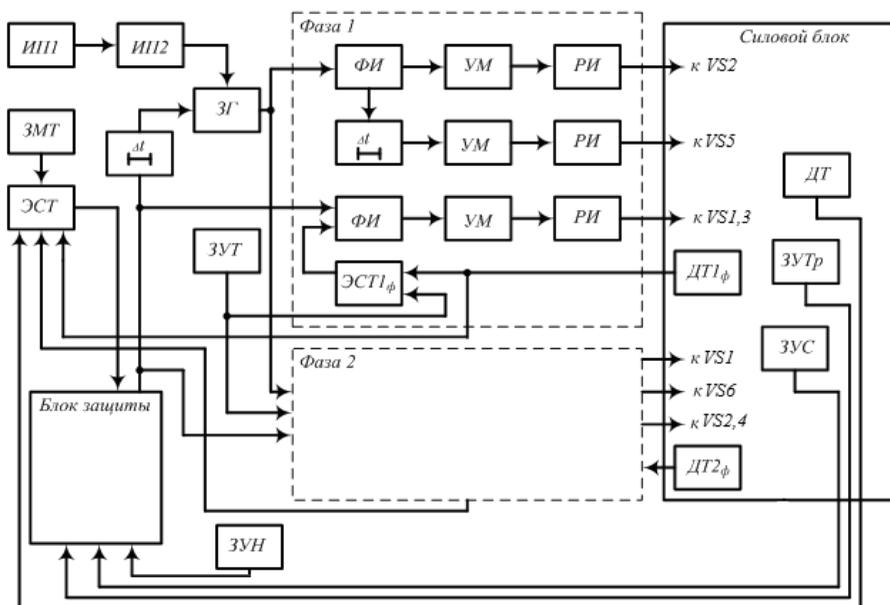


Рис. 6.3

Источником питания (ИП1) системы управления преобразователем (рис. 6.3) должен служить автономный источник, в качестве которого целесообразно использовать аккумуляторную батарею [5].

Поскольку элементы системы управления требуют в большинстве своём различные уровни питающего напряжения, то возникает необходимость согласования напряжения источника питания с их напряжением, для чего в системе управления используются маломощные преобразователи, питающие конкретных потребителей. В схеме они сведены в один блок ИП2.

Для обеспечения жёсткой фиксации периода регулирования по фазам со сдвигом относительно друг друга на 180° эл. в схеме предусмотрено формирование импульсов на гасящие тиристоры $VS2$ первой фазы и $VS1$ второй фазы по переднему и заднему фронту тактовых импульсов соответственно. При формировании переднего фронта тактового импульса сигнал поступает на формирователь импульсов (ФИ), где вырабатывается сигнал оптимальных для наилучшего отпираания тиристоров формы и длительности, откуда он поступает на усилитель мощности

(УМ) и блок задержки. Усилитель необходим для того, чтобы сформировать мощный сигнал, достаточный для отпирания нескольких тиристоров (например, при работе по системе многих единиц (СМЕ) либо при последовательном включении нескольких тиристоров).

Для обеспечения гальванической развязки низковольтных цепей системы управления и высоковольтных (преобразователя) подача отпирющих импульсов осуществляется через распределитель импульсов (РИ) на управляющие электроды тиристоров, а затем на тиристор.

Применение блока задержки вызвано необходимостью стабилизации времени импульса питающего напряжения. Для этого поступивший с формирователя импульс задерживается на период времени $\Delta t = t_{cx}$ (на диаграмме рис. 6.1 интервал $t_0 \dots t_1$), в течение которого тиристор $VS1$ предоставлено схемное время для запираания. По истечении времени задержки усиленный отпирющий импульс через распределитель поступает на управляющий электрод тиристора $VS5$ цепи ускоренного перезаряда. Если конденсатор C сохранил заряд, то с этого момента начинается принудительный его перезаряд по контуру: конденсатор C – дроссель L – тиристор $VS5$ – конденсатор C . К моменту времени t_3 процесс перезаряда заканчивается и гасящие тиристоры запираются, отключая тяговый двигатель от источника питания. Для поддержания в двигателе средней за период регулирования величины тока в момент времени t_4 отпираются тиристоры $VS1$, $VS3$. Для определения времени отпирания тиристоров в системе управления используется элемент сравнения тока первой фазы ($\text{ЭСТ}1_\phi$), называемый иногда нуль-органом. На него поступают сигналы от датчика тока фазы ($\text{ДТ}\Phi_1$) и задатчика уставки тока (ЗУТ) (контроллера водителя). В момент равенства нулю разности сигналов с датчика и задатчика (например, в момент времени t_4) с элемента сравнения поступает сигнал на формирователь импульса канала тиристоров $VS1$ и $VS3$, и он вырабатывает импульс, который после усиления через распределитель поступает на тиристоры. Увеличение тока уставки приводит к более раннему появлению импульса управления (момент времени t_4 на диаграмме рис. 6.1 сдвигается влево). Уменьшение тока уставки либо возрастание тока двигателя приводит к уменьшению периода проводящего состояния главного тиристора, т. е. к смещению момента времени t_4 на диаграмме рис. 6.1 вправо.

Аналогично устроен блок управления тиристорами второй фазы, с той лишь разницей, что сигнал на запуск формирователя второй фазы поступает не по переднему, а по заднему фронту тактового импульса ЗГ (см. рис. 6.2).

Система управления преобразователем, как известно, должна выполнять и защитные функции. Защите подлежат как элементы собственно преобразователя, так и аппараты силовых цепей подвижного состава. Поэтому в схеме предусмотрен блок защиты, на который поступают сигналы от задатчиков и датчиков контролируемых параметров (температуры элементов преобразователя, тока фаз, напряжения на двигателе и др.). Особое значение на транспорте имеет приоритетность режимов движения: в любых ситуациях режим торможения является приоритетным по отношению к пуску и выбегу. Поэтому при нажатии на педали «Пуск» и «Торможение» должна собираться только схема торможения [5]. В приведённой структурной схеме отсутствует реверсор. Студентам предоставлена возможность самостоятельного включения его как в силовую схему транспортного средства, так и в структурную, используя изложенный выше материал.

В качестве примера рассмотрим принцип построения структурной схемы системы управления преобразователем постоянного тока на *IGBT*-транзисторах с широтно-импульсным способом регулирования для тягового привода многодвигательного подвижного состава с пофазной нагрузкой, выполненного по схеме рис. 6.4.

Схема включает в себя: источник питания *GB* (аккумуляторная батарея); преобразователь (модуль 1) постоянного тока на *IGBT*-транзисторах для питания якорей тяговых двигателей $M1...M4$; преобразователь (модуль 2) постоянного тока на *IGBT*-транзисторах для питания последовательных обмоток возбуждения тяговых двигателей $L1...L4$; цепь тормозных резисторов $R3$ и $R4$, подключаемых посредством *IGBT*-транзисторов $VT13$ и $VT14$ к цепям тяговых двигателей с целью формирования контуров для протекания тормозных токов; цепь балластного резистора $R2$ и тормозных резисторов $R3$ и $R4$; автоматический выключатель $QF1$.

Система управления преобразователем должна обеспечивать его работу в режимах безреостатного пуска, рекуперативного и рекуперативно-реостатного торможения. Вариант структурной схемы системы управления силовыми преобразователями приведён на рис. 6.5.

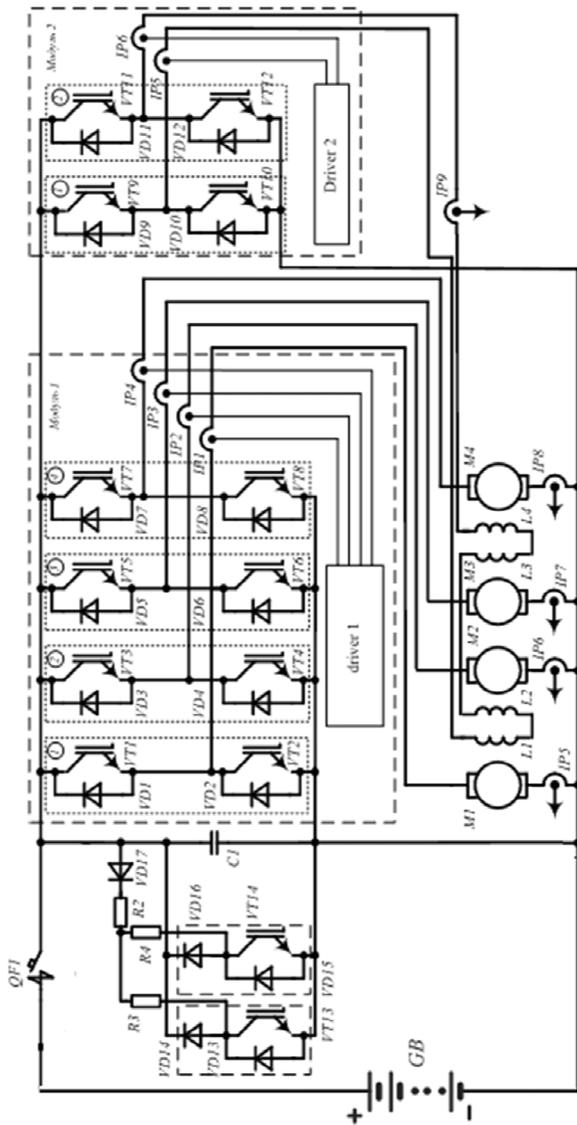


Рис. 6.4

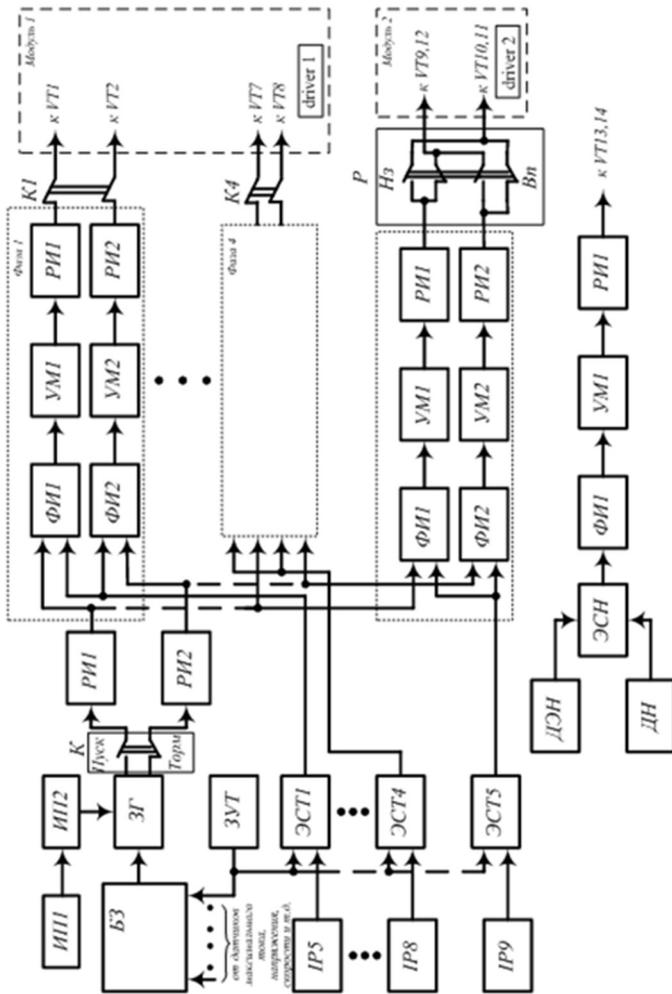


Рис. 6.5

Система управления (рис. 6.5), как и в предыдущем примере, включает в себя: источник питания (ИП1), предназначенный для преобразования напряжения контактной сети во входное напряжение питания системы управления; источник питания (ИП2), преобразующий входное напряжение питания в напряжение питания для различных цепей системы управления; задающий генератор (ЗГ), предназначенный для формирования периода регулирования; переключатели (ключ (К) и реверсор (Р)) режимов работы тягового привода «Пуск» – «Торможение» (К) и направления движения «Вперёд» – «Назад» (Р); распределители импульсов (РИ1 и РИ2), обеспечивающие сдвиг 90° эл. между импульсами управления, подаваемыми в каналы управления фаз модулей в режимах пуска и торможения; формирователи импульсов (ФИ) каналов, обеспечивающие появление управляющих импульсов необходимой длительности, которые затем усиливаются в усилителях мощности (УМ) и через РИ подаются на соответствующие транзисторы; отключатели каналов управления ($K1 \dots K4$); задатчик уставки тока (ЗУТ) (контроллер водителя); блок защиты (БЗ), предназначенный для снятия управляющих импульсов при превышении контролируемыми параметрами (токами, напряжениями и т. д.) величин уставок или эталонных значений; элементы сравнения токов (ЭСТ) якорей машин и обмоток возбуждения; датчики токов ($IP5 \dots IP9$), напряжений (на рис. 6.5 не показаны) и т. д.

Рассмотрим принцип работы системы управления в режиме пуска при движении вперёд. При установке переключателя режимов работы в положение «Пуск» выходной канал блока ЗГ подключается к РИ1. Для пояснения принципа работы воспользуемся пусковой диаграммой и диаграммами проводящего состояния транзисторов фаз преобразователя (рис. 6.6). Приведённые диаграммы состояния транзисторов соответствуют точке *a* пусковой диаграммы, в которой ток двигателя равен пусковому. Как следует из рис. 6.6, при известном периоде регулирования T_p момент начала проводящего состояния транзисторов в каждой последующей фазе отстаёт на 90° эл. от предыдущей. Для определённости полагаем, что пусковая диаграмма соответствует фазе 1.

Задающий генератор представляет собой генератор прямоугольных импульсов, по передним фронтам которых формируются импульсы управления, переводящие силовые транзисторы модулей в проводящее состояние. Для управления транзистором $VT1$ первой фазы используются импульсы 1, 5, 9 и т. д., поступающие в режиме пуска в канал

управления фазы от РИ1. Сигнал, поступивший от распределителя на вход ФИ1 канала первой фазы, способствует формированию на его выходе сигнала необходимой длительности, который затем усиливается по мощности в УМ1 и через РИ1 и контакты $K1$ подаётся на транзистор $VT1$ первой фазы модуля 1. Транзистор открывается и присоединяет якорь тягового двигателя $M1$ к источнику питания. Длительность проводящего состояния транзистора $VT1$ первой фазы модуля 1 регулируется сигналом, подаваемым в ФИ1 с выхода ЭСТ1, в котором производится сравнение сигналов, поступающих с ЗУТ (контроллера водителя) и датчика тока двигателя $M1$.

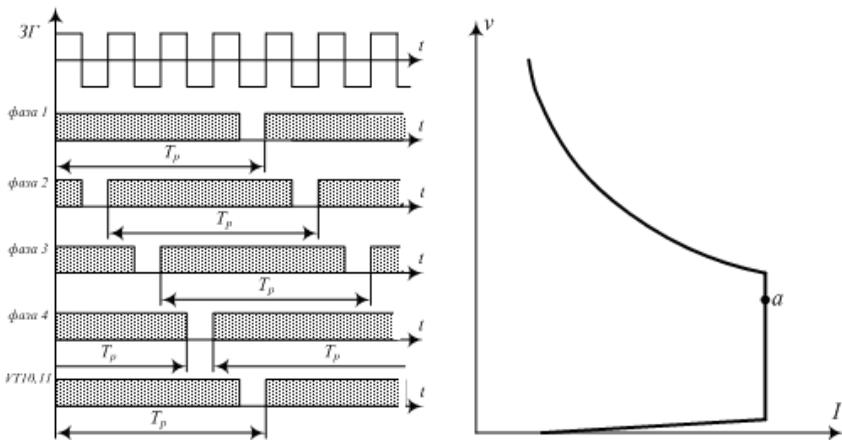


Рис. 6.6

Аналогично работает канал управления транзисторами остальных фаз, с той лишь разницей, что управление транзистором второй фазы сдвинуто во времени на $1/4$ часть периода регулирования по отношению к первой, управление транзистором третьей фазы сдвинуто во времени на $1/4$ часть периода регулирования по отношению ко второй и т. д.

Одновременно с регулированием токов якорей тяговых двигателей по каналу управления током возбуждения происходит регулирование тока возбуждения, протекающего во всех обмотках возбуждения двигателей, путём изменения длительности проводящего состояния транзисторов $VT9$ и $VT12$. Принцип работы канала управления транзисторами цепи возбуждения аналогичен принципу работы канала управления транзисторами якорной цепи и поэтому не рассматривается.

При изменении подвижным составом направления движения в канале управления транзисторами модуля 2 производится переключение реверсора (Р) из положения «Вперёд» в положение «Назад», что приводит к переходу от управления транзисторами $VT9$ и $VT12$ к управлению транзисторами $VT10$ и $VT11$.

В режиме рекуперативного торможения производится коммутация переключателя режимов работы (К) с пуска на торможение. При этом сигнал с ЗГ подаётся в каналы управления транзисторами фаз модуля 1 через РИ2, что приводит к открыванию транзистора $VT2$ первой фазы, $VT4$ второй фазы и т. д. В остальном принцип работы системы управления аналогичен её работе в режиме пуска.

Рекуперативное торможение на конденсаторе C входного фильтра при превышении напряжением допустимой величины в каждый период регулирования замещается реостатным, для чего вначале подключается цепь резистора $R3$, а если этого недостаточно, то и цепь резистора $R4$. Управление транзисторами $VT13$ и $VT14$ цепей тормозных резисторов осуществляется аналогично рассмотренному ранее.

Для защиты полупроводниковых ключей от перегрузок, а подвижного состава от нештатных режимов работы в системе управления предусматриваются устройства защиты, что нашло отражение в структурной схеме в виде блока защиты, куда поступают сигналы от различных датчиков и где они сравниваются с допустимыми значениями. При превышении контролируемыми параметрами эталонных значений производится снятие в определённой последовательности сигналов управления с транзисторов.

Структурная схема цепей управления силовыми ключами в приводах переменного тока строится аналогично. Для пояснения принципов построения этой схемы воспользуемся принципиальной электрической схемой цепей серийно выпускаемого модуля на $IGBT$ -транзисторах с подключённым к его выходу трёхфазным асинхронным тяговым двигателем (рис. 6.7).

Применение в качестве электронных ключей транзисторов позволяет осуществлять широтную модуляцию напряжения, подаваемого на двигатель, что очень важно при осуществлении частотного пуска, когда необходимо соблюдать известное соотношение между величинами питающего двигателя напряжения и его частотой [7]. Один из вариантов реализации широтно-импульсной модуляции напряжения, питающего

асинхронный двигатель, приведён на рис. 6.8. Изменением длительности импульса и момента его появления можно регулировать амплитуду и частоту выходного напряжения.

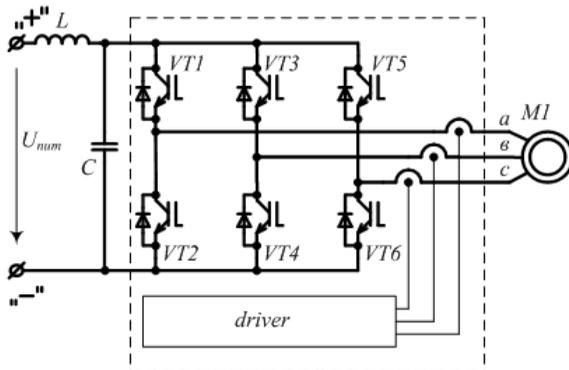


Рис. 6.7

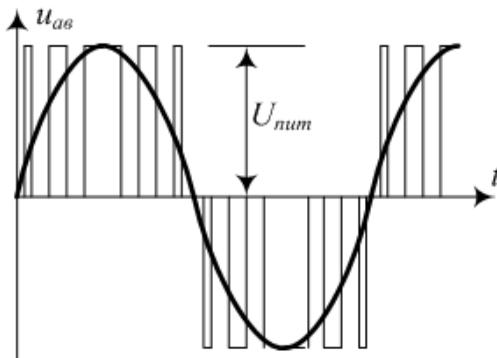


Рис. 6.8

Структурная схема системы управления преобразователем приведена на рис. 6.9. Назначение элементов системы такое же, как и в предыдущих примерах, однако ЗГ выполнен по другой схеме. Он имеет три выходных канала. Первый из них (верхний на рис. 6.9) обеспечивает подачу тактовых импульсов сначала на формирователь фазы *a*, затем – на *b*, после чего – на фазу *c* тягового электродвигателя. При осуществлении пуска такая последовательность обеспечивает вращение ротора электродвигателя в одном направлении (например, вперёд).

По среднему каналу тактовые импульсы поступают на формирователи фаз в следующей последовательности: фаза *b*, фаза *a*, фаза *c*, что обеспечивает вращение ротора в обратную сторону.

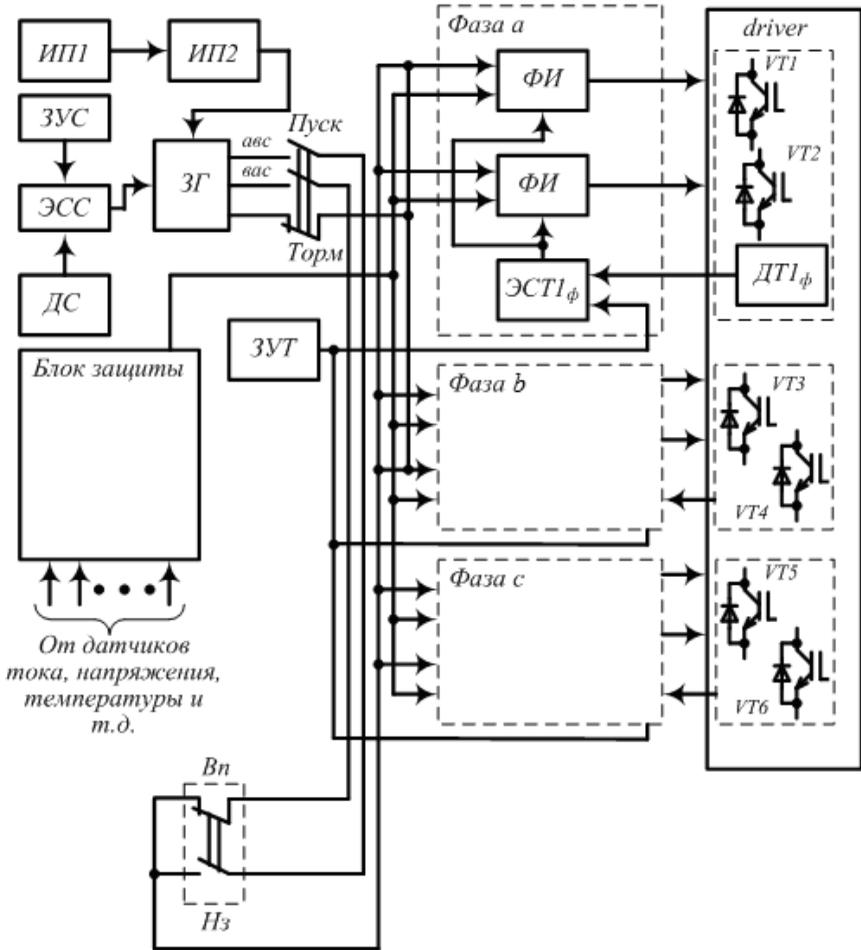


Рис. 6.9

По нижнему каналу подаются тактовые импульсы только на формирователи фаз *a* и *b*, причём только на транзисторы *VT1* и *VT4*, что обеспечивает режим электрического торможения. Запуск формирователя

импульсов, например в фазе *a*, начинается при поступлении первого тактового импульса с ЗГ. Запуск формирователя импульсов фазы *b* начинается при поступлении второго тактового импульса с ЗГ, а в фазе *c* – третьего. Причём отпирающие импульсы во всех фазах поступают на транзисторы верхних плеч инвертора, т. е. на *VT1*, *VT3* и *VT5*. Четвёртый тактовый импульс приходит на формирователь фазы *a*, что приводит к снятию управляющего импульса с транзистора *VT1* и отпиранию транзистора *VT2* этой фазы. Пятый тактовый импульс приходит на формирователь фазы *b*, что приводит к снятию управляющего импульса с транзистора *VT3* и отпиранию транзистора *VT4* этой фазы. С приходом шестого тактового импульса (на фазу *c*) запирается *VT5* и отпирается *VT6*. Седьмой тактовый импульс поступает на формирователь фазы *a*, и процессы в системе управления повторяются.

Управление работой ЗГ осуществляется по скорости, а длительность (ширина) импульсов регулируется по уровню напряжения (на рис. 6.9 не показано). При превышении токами фаз предельных величин корректировку в длительность проводящего состояния транзисторов вносит сигнал ограничения по току, например, в фазе *a* – элемент сравнения токов первой фазы (ЭСТ1ф).

При отклонении параметров контролируемых сигналов, идущих с соответствующих датчиков в блок защиты, из него поступает запрет на формирование отпирающих сигналов всех каналов.

7. ЗАДАЧИ

Задача 1. Определить мощность и тип электродвигателя транспортного средства.

Решение

Рассмотрим методику решения задачи по определению мощности тягового электродвигателя на примере однодвигательного безрельсового транспортного средства весом $G_{\text{ПС}} = 170$ кН, радиус пневмошин которого $R_{\text{кол}} = 535$ мм. При скорости движения транспортного средства $v = 60$ км/ч сила сопротивления движению составляет $w = 3,9$ кН.

Передаточное число редуктора трансмиссии

$$\begin{aligned} i_{\text{ред}} &= n_{\text{дв}} / n_{\text{кол}} = 3,6\pi n_{\text{дв}} R_{\text{кол}} / 30V_{\text{доп}} = \\ &= 3,6 \cdot 3,14 \cdot 2500 \cdot 0,535 / 30 \cdot 60 = 10,08. \end{aligned}$$

Тяговое усилие на ободу колеса (F_{T}) при пуске с ускорением $a_{\text{пуск}} = 0,5$ м/с² на скорости 60 км/ч составляет

$$\begin{aligned} F_{\text{T}} &= (1 + \gamma)m_{\text{ПС}}a_{\text{пуск}} + F_{w60} = \\ &(1 + 0,14) \cdot 170 \cdot 10^3 \cdot 0,5 / 9,81 + 3,9 \cdot 10^3 = 11,2 \text{ кН}, \end{aligned}$$

а требуемая при этом на ободу колеса мощность

$$P_{\text{T}} = F_{\text{T}}V_{\text{доп}} = 11,2 \cdot 10^3 \cdot 60 / 3,6 = 187 \text{ кВт}.$$

Тяговые двигатели постоянного тока, как известно, допускают двукратную перегрузку по току во время пуска. Тогда с учётом коэффициента

перегрузки $k_{\text{пер}}$ и потерь в приводе номинальная мощность тягового двигателя составит

$$P_{\text{дв. ном}} = P_{\text{T}} / (k_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{дв}}) = 187 \cdot 10^3 / 2 \cdot 0,95 \cdot 0,95 = 103,6 \text{ кВт},$$

где $\eta_{\text{пер}} = 0,95$ и $\eta_{\text{дв}} = 0,95$ – предварительные значения КПД механической и электрической частей привода, величины которых затем уточняются в ходе детальных расчётов двигателя и элементов передачи.

При использовании в качестве тягового двигателя машины переменного тока её номинальная мощность с учётом допустимой трёхкратной перегрузки будет определяться следующим образом:

$$P_{\text{дв. ном}} = P_{\text{T}} / (k_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{дв}}) = 187 \cdot 10^3 / 3 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = 70 \text{ кВт}.$$

Задача 2. Составить схему, определить параметры преобразователя на SCR-тиристорах для питания тягового электродвигателя постоянного тока мощностью 100 кВт.

Решение

Используемые на транспортных средствах двигатели постоянного тока, как известно, позволяют развивать крутящий момент как при полном, так и при ослабленном магнитном поле. Поэтому схема преобразователя должна содержать элементы, обеспечивающие ослабление поля машины. Кроме того, учитывая, что подвижной состав может двигаться как вперёд, так и назад, преобразователь может содержать элементы, обеспечивающие реверсирование тока в якорной обмотке либо в обмотке возбуждения. Учитывая, что изменение направления движения осуществляется из неподвижного состояния, в схеме можно использовать контактный реверсор.

При использовании тиристоров схема преобразователя может быть выполнена как на частотных, так и на широтных ключах. Наиболее подходящим в силу ряда достоинств является ключ с широтно-импульсным регулированием.

Ослабление поля машины осуществляется шунтированием обмотки возбуждения резистором, подключаемым параллельно с помощью ключа. При этом степень ослабления поля регулируется длительностью проводящего состояния ключа. Для запираания ключа в цепи ослабления поля машины целесообразно воспользоваться основным регулятором.

При подаче в момент времени t_0 отпирающего сигнала на управляющий электрод главного тиристора преобразователя $VS1$ тяговый двигатель присоединяется к источнику питания, и по его цепи начинает протекать ток, нарастая по экспоненциальному закону. Одновременно образуется контур для разряда конденсатора $C1$, состоящий из тиристора $VS1$, диода $VD1$, дросселя $L1$ и коммутирующего конденсатора.

Наличие в контуре конденсатора и дросселя обуславливает колебательный характер разряда и последующий перезаряд коммутирующего конденсатора до напряжения источника питания с полярностью, указанной в скобках, в момент времени t_1 .

Ток в цепи двигателя продолжает нарастать до момента времени t_2 , когда отпирается гасящий тиристор $VS2$. Его отпирание приводит к тому, что к главному тиристор $VS1$ прикладывается напряжение обратной полярности, и он запирается. К тяговому двигателю в этот момент прикладывается двойное напряжение (источника питания и коммутирующего конденсатора), которое начинает уменьшаться по мере перезаряда конденсатора по цепи: «+» источника питания – конденсатор $C1$ – дроссель $L1$ – тиристор $VS2$ – обмотка возбуждения L – контакт $K2$ – якорь двигателя M – контакт $K4$ – контакт $K8$ – «-» источника питания до напряжения сети с полярностью, указанной без скобок.

После перезаряда конденсатора в момент времени t_3 гасящий тиристор запирается, а ток двигателя начинает циркулировать по контуру: обмотка возбуждения L – контакт $K2$ – якорь двигателя M – контакт $K4$ – контакт $K8$ – обратный диод $VD1$ – контакт $K7$ – обмотка возбуждения L до момента времени t_4 , спадая по экспоненциальному закону.

В момент времени t_4 вновь отпирается главный тиристор, и процессы в схеме повторяются.

Изменяя время подачи управляющего сигнала на гасящий тиристор, регулируют величину тока двигателя.

После выхода на автоматическую характеристику полного поля осуществляют ослабление магнитного поля машины, для чего отпирают тиристор $VS3$ цепи ослабления поля во временном интервале $t_0 \dots t_2$. При этом происходит шунтирование обмотки возбуждения двигателя резистором R . Более раннее отпирание тиристора приводит к большей степени ослабления поля.

В режиме рекуперативного торможения электрическая схема собирается путём замыкания контактов $K1$, $K3$, $K6$ и $K9$. Замыкание контакта $K1$ приводит к изменению направления протекания тока в цепи якоря по отношению к его направлению в обмотке возбуждения, что обеспечивает процесс электрического торможения.

Рассмотрим процессы, протекающие в схеме в режиме торможения (рис. 7.1, в). В момент времени t_0 конденсатор заряжен с полярностью, указанной без скобок. При отпирании главного тиристора под действием ЭДС ток E_M в цепи двигателя начинает протекать по цепи: якорь M – контакт $K3$ – диод $VD2$ – тиристор $VS1$ – обмотка возбуждения L – контакт $K1$ – якорь двигателя M , возрастая по экспоненциальному закону до момента времени t_3 , когда происходит запираание главного тиристора. Для его запираания в момент времени t_2 отпирается гасящий тиристор, что, как описывалось выше, приводит к перезаряду коммутирующего конденсатора и последующему запираанию главного тиристора.

За счёт накопленной двигателем в предыдущем временном интервале электромагнитной энергии его ток начинает циркулировать по цепи: якорь двигателя M – контакт $K3$ – диод $VD2$ – диод $VD4$ – «+» источника питания – «-» источника питания – контакт $K9$ – диод $VD3$ – обмотка возбуждения L – контакт $K1$ – якорь двигателя M , спадая по экспоненциальному закону до момента времени t_4 , когда происходит новое отпирание главного тиристора. Далее процессы в схеме повторяются.

Ослабление поля, как и при пуске, осуществляется отпиранием тиристора $VS1$ в интервале времени $t_0 \dots t_2$.

Исходными данными для определения параметров элементов схемы служат диаграммы электромагнитных процессов, согласно которым напряжение, прикладываемое к тиристорам и диодам, за исключением диода $VD2$, не превышает максимальной величины напряжения источника питания. У диода оно достигает двойного значения. С учётом неблагоприятного сочетания различных факторов при выборе класса полупроводниковых приборов вводится коэффициент запаса, принимаемый обычно $k_{\text{зап}} = 1,15 \dots 1,2$.

Токовая нагрузка полупроводниковых приборов определяется пусковыми токами электрической машины с учётом коэффициента запаса.

Рабочая частота силовых полупроводниковых приборов должна приниматься не ниже той, на которой работает преобразователь.

Величина ёмкости коммутирующего конденсатора рассчитывается исходя из требования предоставления необходимого времени для восстановления запирающих свойств тиристором с учётом коэффициента запаса.

Величина индуктивности дросселя контура перезаряда коммутирующего конденсатора выбирается из расчёта ограничения амплитуды тока перезаряда исходя из его термического воздействия на $p-n$ -переход главного тиристора.

В табл. 7.1 приведены величины приложенных к полупроводниковым приборам схемы напряжений и протекающих по ним токов в режимах пуска и торможения, которыми следует руководствоваться при выборе элементной базы.

Таблица 7.1

Прибор Параметр	$V S1$	$V S2$	$V S3$	$V D1$	$V D2$	$V D3$	$V D4$
Напряжение	$U_{ИП}$	$2U_{ИП}$	$U_{ИП}$	$U_{ИП}$	$2U_{ИП}$	$U_{ИП}$	$U_{ИП}$
Ток	$I_{пуск}$	*	$(1 - \alpha)I_{пуск}$ **	***	$I_{пуск}$	$I_{торм}$	$I_{торм}$

* Токовая нагрузка определяется величиной действующего тока при перезаряде конденсатора.

** α – коэффициент ослабления магнитного поля машины.

*** Токовая нагрузка определяется величиной ударного тока при перезаряде конденсатора.

В табл. 7.1 величина напряжения источника питания принята равной его максимальному значению: $U_{ИП} = U_{ИП\max}$.

Величины пускового и тормозного токов тягового двигателя различаются на 5...7 %, поэтому в расчётах можно выбирать полупроводниковые приборы по пусковому току (как и по классу напряжения) с учётом коэффициента запаса, принимаемого обычно $k_{зап} = 1,20 \dots 1,25$.

Величина ёмкости коммутирующего конденсатора C определяется по известному выражению

$$I_{пуск} \cdot \Delta t = C \cdot \Delta U,$$

где $\Delta t = k_{зап} \cdot t_{выкл}$ – время, предоставляемое схемой для восстановления запирающих свойств тиристора с учётом коэффициента запаса; $\Delta U = U_{ИП\min}$ – минимальное напряжение источника питания.

Величина индуктивности дросселя узла коммутации определяется допустимой величиной ударного тока $I_{уд}$ диода $VD1$ либо действующим значением тока тиристора $VS1$ на основании соотношения

$$C \cdot U_{ИП\max}^2 / 2 = L \cdot I_{уд}^2 / 2 .$$

В качестве примера в табл. 7.2 приведены результаты расчёта параметров полупроводниковых приборов регулятора транспортного средства, оснащённого тяговым двигателем мощностью $P_{ном} = 100$ кВт на напряжение $U_{дв} = 550$ В. Максимальная и минимальная величины питающего напряжения составляют $U_{ИП\max} = 700$ В и $U_{ИП\min} = 400$ В. Пусковой (тормозной) ток рассчитывается по выражению

$$I_{пуск} = 2I_{ном} = 2P_{ном} / U_{дв} = 2 \cdot 100 \cdot 10^3 / 550 = 364 \text{ А} .$$

Величина коэффициента ослабления магнитного поля машины $\alpha = 0,35$.

Т а б л и ц а 7.2

Прибор Параметр	$VS1$	$VS2$	$VS3$	$VD1$	$VD2$	$VD3$	$VD4$
Напряжение, В	900	1800	900	900	1800	900	900
Ток, А	364	26	237	*	364	364	364

* Токовая нагрузка определяется величиной ударного тока при перезаряде конденсатора.

Действующее значение тока тиристора $VS2$ с допустимой для инженерных расчётов погрешностью можно принять равным среднему его значению за период регулирования (частота регулирования принята равной $f_{рег} = 1$ кГц, а время восстановления запирающих свойств тиристора $t_{выкл} = \Delta t = 30 \cdot 10^{-6}$ с):

$$\begin{aligned} I_{VS2} &= I_{пуск} \cdot t_{пер} / T_{рег} = I_{пуск} \cdot 2\Delta t / T_{рег} = \\ &= 364 \cdot 2 \cdot 1,25 \cdot 30 \cdot 10^{-6} / 10^{-3} = 26 \text{ А} . \end{aligned}$$

Величина ёмкости коммутирующего конденсатора

$$C = I_{\text{пуск}} \cdot \Delta t / U_{\text{ИП мин}} = 364 \cdot 1,25 \cdot 30 \cdot 10^{-6} / 400 = 34 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Полагая длительность половины периода колебательного LC -контура равной Δt , на основании известного соотношения

$$T_{LC} = 2\pi\sqrt{LC}$$

определяем его индуктивность

$$L = \Delta t^2 / \pi^2 C = (1,25 \cdot 30 \cdot 10^{-6})^2 / 3,14^2 \cdot 34 \cdot 10^{-6} = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Тогда величина амплитуды тока, протекающего по диоду, равна

$$I_{\text{уд}} = U_{\text{ИП макс}} \sqrt{C/L} = 700 \sqrt{34/4,2} \approx 2 \text{ кА.}$$

По величине этого тока по справочнику подбирается тип диода.

Задача 3. Рассчитать параметры электрических аппаратов силовой цепи транспортного средства.

Решение

Принципиальная электрическая схема силовых цепей подвижного состава должна содержать:

- аппараты для подключения схемы к источнику питания (токоприёмники);
- аппараты для подачи напряжения на схему (линейные контакторы);
- регуляторы подводимой к двигателю энергии (резисторы, полупроводниковые преобразователи);
- аппараты для переключения мотора из режима тяги в режим электрического торможения (реверсоры);
- тяговый двигатель (двигатели);
- аппараты защиты (от пониженного и повышенного напряжения, чрезмерных токов, токов короткого замыкания, перенапряжений, превышения температуры);
- элементы цепи и т. д.

Наибольший интерес представляет схема силовых цепей многодвигательного подвижного состава. Принципиальная электрическая схема силовых цепей трамвайного вагона с тиристорными ключами частотного управления (рис. 7.2) включает в себя: автоматический выключатель $QF1$; контактор $KM1$; разрядник FV ; буферный конденсатор $C1$;

разрядный резистор $R1$; четыре фазы тиристорно-импульсного регулятора (1...4), выполненные на базе SCR -тиристора $VS1$, диодов $VD1$ и $VD2$, контура ёмкостной коммутации ($C2$ и $L5$); тяговые электродвигатели $M1...M4$; датчики тока силовой цепи ($TA1$) и цепи возбуждения ($TA2$); реверсор, выполненный на тиристорах $VS2...VS5$ последовательных обмоток возбуждения двигателей ($L1...L4$); цепь ослабления поля машин, состоящая из шунтирующего резистора $R2$ и включённых встречно-параллельно тиристорам $VS6$ и $VS7$; узел ёмкостной коммутации тиристорам $VS3$ и $VS5$, содержащий конденсатор $C3$ и тиристоры $VS8$ и $VS9$. Кроме того, для визуального контроля потребляемого тока и напряжения источника питания в силовую цепь включены индикаторы $PA1$ и $PV1$.

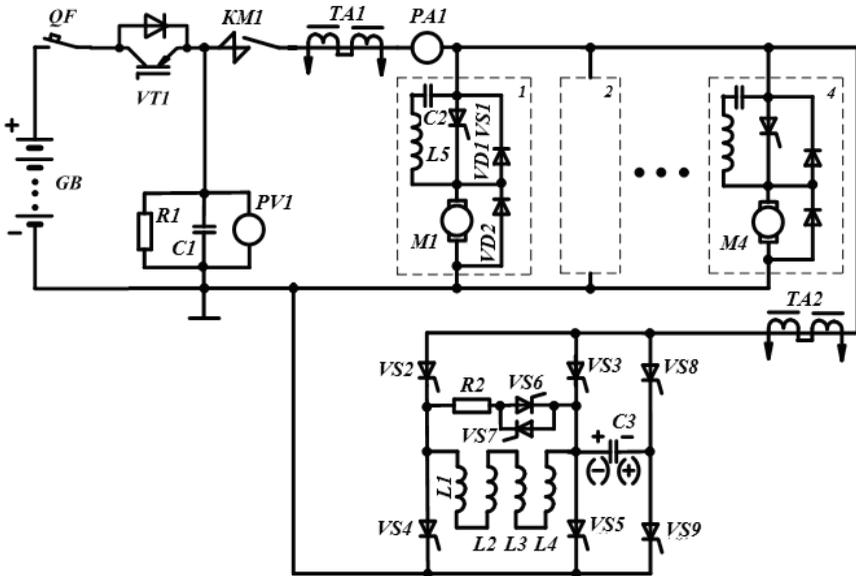


Рис. 7.2

В схему (рис. 7.2) не включены устройства защиты полупроводниковых приборов от перенапряжений, поскольку внешние воздействия на них исключены вследствие независимости схемы от централизованных источников питания.

Принцип работы схемы заключается в следующем. После поднятия токоприёмника и включения автоматического выключателя по цепи:

«+» источника питания – токоприёмник – замкнутые контакты автоматического выключателя – дроссель входного фильтра – конденсатор фильтра – «-» источника питания происходит заряд конденсатора до напряжения источника питания. После включения питание подаётся на преобразователи фаз и реверсор. При этом происходит автоматический заряд конденсаторов $C2$ фаз регулятора до напряжения источника питания.

Для подготовки к работе реверсора отпиранием тиристоров $V5$ и $V8$ производится предварительный заряд конденсатора $C3$ до напряжения источника питания с полярностью, указанной без скобок. Схема готова к работе. Далее производится пуск.

Для движения вперёд в начале периода регулирования подаются отпирающие импульсы на тиристор $V1$ всех четырех фаз и тиристоры $V3$ и $V4$. Принцип работы частотного ключа рассмотрен в [6] и поэтому здесь не приводится. Отличие заключается только в том, что подача импульсов на каждую следующую фазу регулятора производится со сдвигом на $1/4$ периода регулирования, чем обеспечивается четырёхкратное повышение частоты работы схемы.

За время выключения тиристора $\Delta t = t_{\text{выкл}}$ до окончания периода регулирования отпирается тиристор $V8$, что приводит к запираению тиристора $V4$ и перезаряду конденсатора $C3$ до напряжения источника питания с полярностью, указанной в скобках. По окончании перезаряда отпирается тиристор $V6$, образуя контур для циркуляции тока в обмотках возбуждения двигателей.

С началом нового периода регулирования процессы в схеме повторяются.

Для изменения направления движения производится реверсирование направления тока в обмотках возбуждения, для чего вместо тиристоров $V3$ и $V4$ отпираются тиристоры $V2$ и $V5$. Запирание тиристора $V5$ происходит при отпирании тиристора $V9$, подключающего конденсатор $C3$, предварительно заряженный до напряжения источника питания с полярностью, указанной в скобках. Предварительный заряд происходит при включении тиристоров $V3$ и $V9$ перед началом регулирования.

Плавное ослабление поля машин достигается включением тиристора $V6$ либо $V7$ (в зависимости от направления протекания тока в обмотках).

Определение параметров аппаратов силовой цепи

1. Автоматический выключатель $QF1$ должен быть рассчитан на максимальное напряжение источника питания с учётом коэффициента

запаса. Величина протекающего по его контактам тока I_{QF} определяется максимальным током силовой цепи, зависящим от количества $m_{дв}$ и электрических параметров тяговых двигателей, и может быть рассчитана по формуле

$$I_{QF} = m_{дв} k_{зап} I_{пуск},$$

где $I_{пуск} = (1,8 \dots 2) P_{ном} / U_{ном}$ – пусковой ток двигателя, $P_{ном}$ и $U_{ном}$ – номинальные величины мощности и напряжения двигателя соответственно.

При невозможности подобрать по току необходимый выключатель следует изменить схему силовой цепи, сгруппировав фазы преобразователя в блоки с меньшим количеством параллельных цепей (рис. 7.3).

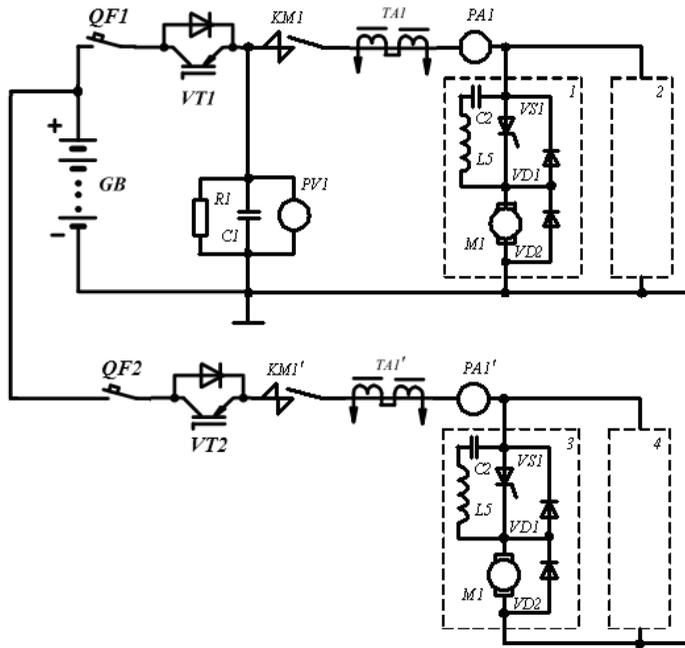


Рис. 7.3

2. Индикаторы напряжения $PV1$ и тока $PA1$ выбираются по максимальным величинам измеряемых параметров. Как правило, принимается

четвертый класс приборов. Корпусная изоляция должна быть рассчитана на 1000 В.

3. Контакттор должен быть рассчитан так же, как и автоматический выключатель. При невозможности подбора контактора на такой ток следует изменить схему силовой цепи, включив подходящий контактор в каждую фазу регулятора (рис. 7.3).

Дозаряд буферного конденсатора C_1 , а следовательно, и величина перенапряжения зависят от величины его ёмкости.

4. Датчики тока, в качестве которых в схеме приведены трансформаторы постоянного тока, должны подбираться с учётом требуемых для схемы управления параметров снимаемых с них сигналов. В схемах силовых цепей подвижного состава последних выпусков используются датчики, работающие на эффекте Холла.

Задача 4. Разработать принципиальную электрическую схему силовых цепей тягового привода электромобиля с регулятором на полупроводниковых приборах. В качестве источника энергии принять аккумуляторную батарею.

Решение

Снижение расхода энергии на движение современного транспортного средства достигается, как известно, при использовании для регулирования её подачи в тяговый двигатель полупроводниковых преобразователей. Сравнение характеристик полупроводниковой элементной базы преобразователей показывает, что на современных транспортных средствах в тяговых электроприводах целесообразно применять транзисторы. Поэтому построение схемы будет основано на использовании *IGBT*-транзисторов.

Ранее было показано, что использование в качестве источника энергии на электромобиле аккумулятора приводит к необходимости включения в электрические цепи накопителя энергии конденсаторного типа. Поэтому в качестве буферного источника параллельно аккумулятору следует подключить конденсатор. С учётом предъявляемых требований разработана принципиальная электрическая схема силовых цепей электробуса (рис. 7.4), которая включает в себя: источник энергии ТЭ; буферный конденсатор $C_{\text{буф}}$; тяговый электродвигатель постоянного тока M смешанного возбуждения (серийная обмотка возбуждения L и шунтовая $L_{\text{ш}}$); регулятор тока заряда аккумулятора на транзисторе $VT1$; регулятор тока мотора на транзисторе $VT2$;

регулятор ослабления поля мотора на транзисторе $VT3$ и резисторе $R_{ш}$; автоматические выключатели $QF1$ и $QF2$; реверсор направления движения, выполненный на силовых контактах $B1...H2$ (вперёд – назад); токоограничивающие дроссели $L1, L2$. В режиме пуска замкнут контактор T , в режиме торможения он разомкнут. При движении вперёд замкнуты контакты реверсора $B1$ и $B2$, в режиме торможения – $H1$ и $H2$. На начальной стадии торможения включается контактор Ш для ускорения процесса возбуждения.

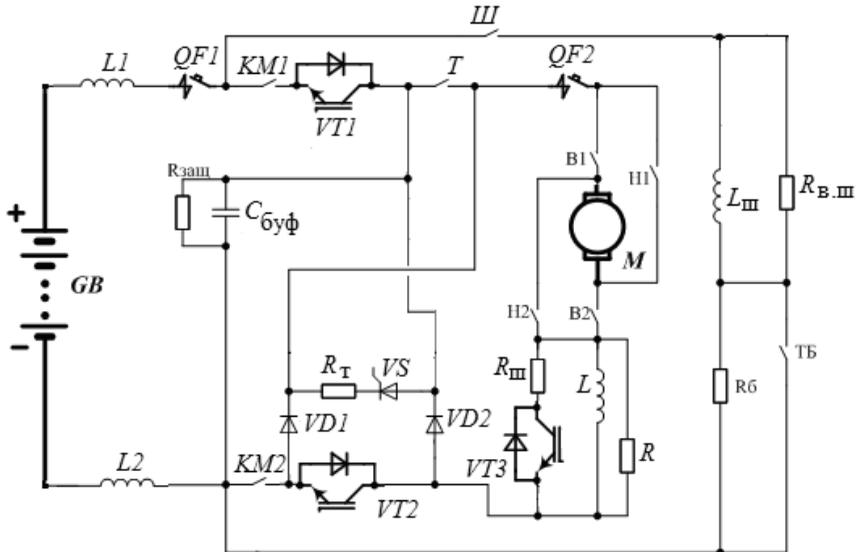


Рис. 7.4

Принцип работы схемы в режиме пуска «Вперёд» (замкнуты контакты $B1$ и $B2$ реверсора) заключается в следующем. После замыкания контактов аппаратов $QF1, QF2, KM1, KM2, \text{Ш}$ (подключающего шунтовую обмотку двигателя к источнику питания), T и включения $IGBT$ -транзистора $VT2$ по цепи: «+» GB – дроссель $L3$ – $QF1$ – $KM1$ – диод транзистора $VT1$ – T – контакт $B1$ реверсора – якорь M – контакт $B2$ реверсора – серияльная обмотка возбуждения L – транзистор $VT2$ – $KM2$ – дроссель $L4$ – «-» GB начинает протекать ток, величина которого регулируется транзистором $VT2$, работающим в ключевом режиме. По достижении током двигателя величины тока уставки

транзистор $VT2$ запирается, а ток начинает циркулировать в контуре: якорь двигателя M – контакт $B2$ реверсора – серийная обмотка возбуждения двигателя L – диод $VD2$ – T – контакт $B1$ реверсора – якорь двигателя M , спадая до некоторого минимального значения. По достижении этого значения вновь отпирается транзистор $VT2$. Далее процессы в схеме повторяются.

По достижении электробусом скорости, соответствующей выходу на характеристику полного поля двигателя (транзистор $VT2$ находится в проводящем состоянии весь период регулирования), производится ослабление поля машины посредством отпираания транзистора $VT3$, шунтирующего обмотку возбуждения резистором $R_{ш}$. Транзистор также работает в ключевом режиме. По достижении электромобилем скорости, соответствующей характеристике максимального ослабления поля, транзистор $VT4$ проводит ток весь период регулирования.

При движении в режиме «Назад» замыкаются контакты $H1$ и $H2$ реверсора, что приводит к изменению направления тока в якорной обмотке двигателя. Процессы в схеме протекают аналогично режиму пуска «Вперёд». Топливный элемент при этом покрывает расход энергии, подзаряжая аккумулятор.

В режиме торможения размыкается контактор T , замкнутые контакты реверсора $B1$ и $B2$ размыкаются, а контакты $H1$ и $H2$ замыкаются, шунтовая обмотка двигателя $L_{ш}$ получает питание от источника, усиливая остаточный поток в машине. Регулирование тока якоря двигателя осуществляется изменением длительности проводящего состояния транзистора $VT2$. В проводящем состоянии ток двигателя протекает по цепи: якорь двигателя M – контакт $H2$ – обмотка возбуждения L – транзистор $VT2$ – диод $VD1$ – $QF2$ – контакт $H1$ – якорь двигателя M . Величина тормозного тока, как и в режиме пуска, достигается изменением времени проводящего состояния транзистора $VT2$. В случае перехода в режим торможения на высокой скорости процесс начинается на ослабленном поле, которое, как и при пуске, обеспечивается подключением параллельно обмотке возбуждения двигателя резистора $R_{ш}$.

В интервале времени запертого состояния транзистора, который начинается по достижении током заданного значения тормозного тока, двигатель осуществляет заряд конденсатора $C_{буф}$ регулируемым током по цепи: якорь двигателя M – контакт $H2$ реверсора – обмотка возбуждения L – диод $VD2$ – конденсатор $C_{буф}$ – $KM2$ – диод $VD1$ – $QF2$ – контакт $H1$ – якорь двигателя M .

После снижения током величины уставки вновь отпирается транзистор $VT2$ и процессы в схеме повторяются.

Поскольку напряжение на конденсаторе может достигать двойного значения по отношению к напряжению аккумулятора, то заряд последнего допустимым током осуществляется посредством транзистора $VT1$ до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не снизится до напряжения на аккумуляторе.

Использование механического коммутатора направления движения «Вперёд» – «Назад» исключает возможность самопроизвольного (без участия водителя) перехода из заданного режима.

***Задача 5.** Определить параметры энергетической установки электробуса массой $m_{ПС} = 10$ т, состоящей из аккумулятора и конденсатора. Принять длину маршрута $l_{марш} = 10$ км, возврат энергии при рекуперации – 15 %.*

Решение

На параметры энергоустановки в значительной мере влияют такие факторы, как род используемого тока, номинальное напряжение тягового электродвигателя, расстояние между остановочными пунктами, способ и периодичность зарядки аккумулятора и т. д.

Для определённости полагаем, что тяговый электродвигатель постоянного тока рассчитан на номинальное напряжение $U_{ном} = 110$ В, расстояние между остановочными пунктами равно длине стандартного перегона $l_{пер} = 350$ м, в качестве аккумуляторов приняты литий-полимерные (допускающие ток заряда равным току разряда), заряд аккумулятора производится после окончания работы на линии.

Для ориентировочного расчёта параметров энергоустановки воспользуемся известным из [8] удельным расходом электрической энергии при перевозке пассажиров троллейбусом (без рекуперации): $A_{уд} = 140$ Вт·ч/т·км. Тогда расход энергии на перегоне составит

$$A_{пер} = A_{уд} \cdot M \cdot l_{пер} = 140 \cdot 10 \cdot 0,35 = 490 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Поскольку в конце движения по перегону происходит заряд аккумулятора в процессе рекуперативного торможения, то реальный расход энергии достигает величины

$$A_{пер,р} = 0,85 A_{пер} = 0,85 \cdot 490 = 416,5 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

Расход энергии при поездке по всему маршруту от исходной точки до конечной остановки составит

$$A_{\text{марш}} = (A_{\text{пер.р}} \cdot l_{\text{марш}}) / l_{\text{пер}} = (416,5 \cdot 10) / 0,35 = 11,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Общий расход энергии при работе электробуса на линии в течение смены $t_{\text{см}} = 8$ ч может быть определён исходя из эксплуатационной скорости движения, которую (согласно известным данным) можно принять равной $v_{\text{экс}} = 25$ км/ч. Тогда количество пусков, совершённых за время работы на линии, составит

$$n = (v_{\text{экс}} \cdot t_{\text{см}}) / l_{\text{марш}} = (25 \cdot 8) / 10 = 20,$$

а расход энергии за всё время работы

$$A_{\text{раб}} = A_{\text{марш}} \cdot n = 11,9 \cdot 10^3 \cdot 20 = 238 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Расчёт величины ёмкости аккумулятора следует произвести таким образом, чтобы в конце рабочего дня он был полностью разряжен, т. е. напряжение на его зажимах достигло минимально допустимой по условиям эксплуатации величины.

В качестве аккумуляторов применяем литий-полимерные, номинальное напряжение на которых равно $U_{\text{ном}} = 3,7$ В, а минимальное – $U_{\text{мин}} = 3,2$ В.

В процессе работы величина питающего напряжения изменяется от $U_{\text{макс}}$ до $U_{\text{мин}}$. При отсутствии подзаряда аккумуляторной батареи (АБ) рабочая зона зависимости $U_{\text{АБ}}(I_{\text{АБ}})$ лежит в пределах заштрихованной на рис. 7.5 области. Таким образом, величина ёмкости аккумулятора, выражаемая на практике в ампер-часах, может быть рассчитана по формуле

$$A_{\text{АБ}} = U_{\text{АБ}} Q_{\text{АБ}},$$

откуда
$$Q_{\text{АБ}} = \frac{A_{\text{раб}}}{U_{\text{АБ}}} = \frac{238 \cdot 10^3}{110} = 2,2 \text{ кА} \cdot \text{ч.}$$

При расчёте не учитывались увеличение расхода энергии на совершение маневровой работы, а также на выезд и заезд с маршрута и мешающее влияние на траекторию движения попутного транспорта.

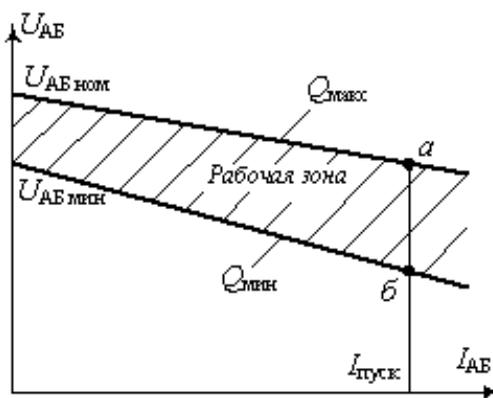


Рис. 7.5

Дополнительный расход энергии потребует некоторого увеличения ёмкости аккумулятора, которое можно принять равным 10 % от расчётной величины. Тогда окончательное значение величины ёмкости составит 2,5 кА · ч.

Необходимость включения конденсатора в схему обусловлена тем, что на высоких скоростях движения при переходе в режим торможения напряжение на зажимах тягового электродвигателя может достигать двукратной величины по отношению к номинальному значению. Поэтому прямая рекуперация на аккумулятор недопустима. В этом случае в схему силовых цепей включается конденсатор, рассчитанный на двойное напряжение источника питания. Вариант исполнения такого решения для случая использования двигателя последовательного возбуждения приведён на рис. 7.6. Принцип работы схемы заключается в следующем. В режиме пуска регулирование тока нагрузки осуществляется транзистором $VT2$ путём изменения длительности его проводящего состояния от нуля до периода регулирования. В процессе рекуперативного торможения регулирование тока нагрузки осуществляется транзистором $VT3$. В интервале скоростей от максимального значения до скорости, соответствующей номинальной частоте вращения тягового двигателя, происходит заряд конденсатора C по цепи: двигатель M – диод транзистора $VT2$ – конденсатор C – обмотка последовательного возбуждения L – якорь двигателя M . Напряжение на конденсаторе при этом может достигать (в зависимости от скорости

начала торможения) двукратной величины по отношению к напряжению аккумулятора. Величина тока заряда конденсатора при этом регулируется транзистором $VT1$.

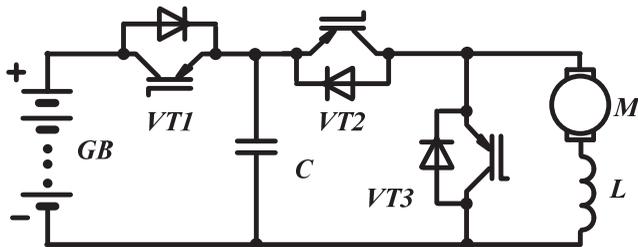


Рис. 7.6

Для определения величины ёмкости конденсатора воспользуемся исходными данными, согласно которым энергия рекуперации составляет 15 % от затраченной при движении по перегону. Тогда ёмкость конденсатора для принятия энергии рекуперации

$$C = 0,15 \frac{A_{\text{пер}}}{U_{\text{м}}^2} = 0,15 \frac{2 \cdot 490 \cdot 10^3 \cdot 3600}{110^2} = 43,8 \text{ Ф} .$$

С учётом того, что к моменту начала рекуперации конденсатор был заряжен до 110 В и в нём была накоплена энергия

$$A_{\text{нач}} = \frac{CU_{\text{м}}^2}{2} = \frac{43,8 \cdot 110^2}{2} = 530 \text{ кДж} ,$$

значение ёмкости буферного конденсатора составит

$$C = \frac{2(0,15A_{\text{пер}} + A_{\text{нач}})}{U_{\text{м}}^2} = \frac{2(0,15 \cdot 490 \cdot 10^3 \cdot 3600 + 530 \cdot 10^3)}{110^2} = 132 \text{ Ф} .$$

Так как ёмкость конденсатора больше ранее принятой, к моменту начала рекуперации конденсатор был заряжен до 110 В и в нём была накоплена энергия

$$A_{\text{нач}} = \frac{CU_{\text{м}}^2}{2} = \frac{132 \cdot 110^2}{2} = 798,6 \text{ кДж} ,$$

уточнённое значение ёмкости буферного конденсатора составит $C = 176 \text{ Ф}$.

Задача 6. По исходным данным задачи 5 определить величину ёмкости конденсатора при замене им аккумуляторной батареи.

Решение

Прежде чем проводить сопоставление массогабаритных показателей источников, необходимо рассмотреть вопрос влияния величины напряжения источника энергии на её расход в процессе движения. Из теории электрической тяги известно, что при уменьшении напряжения на двигателе падают развиваемые им мощность и скорость и возрастает энергопотребление. Графическое изображение этого влияния на примере тягового двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведено на рис. 7.7.

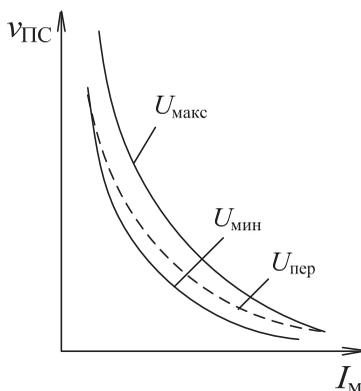


Рис. 7.7

При изменении величины питающего напряжения в процессе движения с $U_{макс}$ до $U_{мин}$ нарастание скорости подвижного состава происходит по кривой $U_{пер}$. Такая кривая характерна для случая использования аккумулятора, поскольку в процессе разряда напряжение на нём изменяется в пределах заштрихованной зоны, отражающей изменение величины накопленного в нём заряда и уменьшение в связи с этим величины выходного напряжения (рис. 7.7).

При использовании конденсатора кривая $U_{пер}$, начавшись с точки максимального напряжения $U_{макс}$, в конечной точке будет иметь меньшее значение скорости. Для того чтобы «поднять» характеристику

до совпадения её с кривой аккумуляторного источника, необходимо увеличить ёмкость конденсатора, т. е. в конечном итоге увеличить его массу.

Для того чтобы оценить в процентном отношении увеличение ёмкости, а следовательно, и массы конденсатора с целью достижения совпадения характеристик, воспользуемся следующими соотношениями:

1) энергия, расходуемая на движение транспортного средства с аккумулятором, равна

$$A = U_{AB \text{ ном}} Q_{\text{макс}} - U_{AB \text{ мин}} Q_{\text{мин}} = (1 - k_U k_Q) U_{AB \text{ ном}} Q_{\text{макс}} = \\ = (1 - 0,85 \cdot 0,25) U_{AB \text{ ном}} Q_{\text{макс}} = 0,7875 U_{AB \text{ ном}} Q_{\text{макс}},$$

где $k_U = U_{AB \text{ мин}} / U_{AB \text{ ном}}$ – коэффициент падения напряжения (обычно $k_U = 0,85 \dots 0,87$; $k_Q = Q_{\text{мин}} / Q_{\text{макс}}$ (обычно $Q_{\text{мин}} = 0,25 Q_{\text{макс}}$);

2) величина энергии конденсатора, расходуемой на движение транспортного средства, равна

$$A = \frac{C_{\text{конд}} U_{AB \text{ ном}}^2}{2} - \frac{C_{\text{конд}} U_{AB \text{ мин}}^2}{2} = 0,7875 U_{AB \text{ ном}} Q_{\text{макс}},$$

откуда

$$C_{\text{конд}} = \frac{5,67 Q_{\text{макс}}}{U_{AB \text{ ном}}}.$$

При использовании полной энергии конденсатора (разряд до нуля) требуемая величина его ёмкости

$$C'_{\text{конд}} = \frac{2A}{U_{AB \text{ ном}}^2} = \frac{2Q_{\text{макс}}}{U_{AB \text{ ном}}} = 72 \text{ 000 } \Phi.$$

Таким образом, для обеспечения работы привода с конденсаторным источником энергии по характеристикам, идентичным аккумуляторному, требуется увеличение ёмкости конденсатора:

$$C_{\text{конд}} / C'_{\text{конд}} = \frac{5,67 Q_{\text{макс}}}{U_{AB \text{ ном}}} / \frac{2Q_{\text{макс}}}{U_{AB \text{ ном}}} = 2,84 \text{ раза},$$

или $C_{\text{конд}} = 204 \text{ 470 } \Phi.$

Задача 7. Определить максимальную величину напряжения на буферном конденсаторе схемы задачи 5 при использовании в ней тягового двигателя ДК 211Б.

Решение

Характеристика тягового двигателя приведена в табл. 7.3.

Т а б л и ц а 7.3

Характеристика	Значение
Напряжение номинальное $U_{ном}$	550 В
Мощность часового режима $P_ч$	150 кВт
Частота вращения номинальная $n_{ном}$	1860 1/мин
Частота вращения максимальная $n_{макс}$	3900 1/мин
Ток часового режима $I_ч$	300 А
Ток длительный I_{∞}	255 А
Количество коллекторных пластин K	210
Количество витков обмотки последовательного возбуждения w_b	30
Сопrotивление обмотки якоря $R_я$ при 100 °С	0,044 Ом
Сопrotивление обмотки возбуждения R_b при 100 °С	0,054 Ом
Сопrotивление обмотки дополнительных полюсов $R_{д.п}$ при 100 °С	0,018 Ом

Максимально допустимое напряжение на ТЭД в генераторном режиме, ограниченное потенциальными условиями на коллекторе, определяется по формуле

$$U_{доп} = \frac{e_{ср} K}{2p},$$

где $e_{ср} = \frac{\alpha_i e_{макс}}{1 + 0,45 \frac{F_{р.я}}{F_b}}$ – среднее напряжение между коллекторными пла-

стинами, $\alpha_i = 0,67$ – коэффициент полюсного перекрытия, $e_{макс} = 42$ В –

величина допустимого межламельного напряжения между коллекторными пластинами, $F_{p.я} = \frac{NI_{я}}{8ap}$ – реакция якоря, $F_{в} = I_{я}w_{в}$ – намагничивающая сила обмотки возбуждения. Тогда

$$e_{cp} = \frac{0,67 \cdot 42}{1 + 0,45 \frac{420}{8 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 30}} = 20,19 \text{ В} \text{ и } U_{доп} = \frac{e_{cp} K}{2p} = \frac{20,19 \cdot 210}{2 \cdot 2} = 1060 \text{ В} .$$

Таким образом, буферный конденсатор должен быть рассчитан на напряжение не ниже максимального напряжения на транзисторах VT2 и VT3, т. е. $U_{т макс} = 1100 \text{ В}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные примеры решения задач могут быть использованы студентами при выполнении расчётно-графических и выпускных квалификационных работ.

Оформленная РГР должна включать в себя:

- титульный лист;
- бланк (или лист) задания с исходными данными;
- реферат объёмом в одну страницу (содержит характеристику работы, ключевые слова и краткое пояснение сути работы);
- оглавление (включает введение, главы или параграфы основной части, заключение, список литературы, приложение – если таковое необходимо).

Во введении отражаются суть проблемы и задачи разработки.

В основной части анализируются достигнутые на текущий момент результаты в данной области, выявляются нерешённые задачи, приводятся разработка и обоснование принимаемых схемных решений и т. д. Как при анализе, так и при принятии решений обязательна ссылка на источники информации, которых должно быть в работе не менее 7–10. В списке литературы могут быть учебные и учебно-методические пособия, научные статьи и монографии, тезисы докладов конференций, интернет-ресурсы и т. д., оформленные по существующим требованиям [9].

Объём РГР не должен превышать 25 страниц машинописного текста (включая рисунки, схемы, таблицы), набранного 14 кеглем через полтора интервала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ефремов И. С.* Теория городских пассажирских перевозок : учеб. пособие для вузов / И. С. Ефремов, В. М. Кобозев, В. А. Юдин. – Москва : Высшая школа, 1980. – 535 с. : ил.
2. *Бирюков В. В.* Автономный электрический транспорт : учебник / В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – 302 с. : ил. (Серия «Учебники НГТУ»).
3. *Бирюков В. В.* Конструкция и расчёт механического оборудования электроподвижного состава : учебник / В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – 492 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
4. *Бирюков В. В.* Энергетические аспекты функционирования транспортных систем : монография / В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – 264 с. (Серия «Монографии НГТУ»).
5. *Бирюков В. В.* Конструкция и расчёт электрического оборудования электроподвижного состава : учебник / В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 328 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
6. *Бирюков В. В.* Импульсное управление транспортными средствами : учебник : в 2 ч. Ч. 1 / В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 212 с.
7. *Бирюков В. В.* Импульсное управление транспортными средствами : учебник : в 2 ч. Ч. 2 / В. В. Бирюков. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 208 с.
8. *Розенфельд В. Е.* Теория электрической тяги : учебник для вузов ж.-д. трансп. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 1983. – 328 с.
9. ГОСТ Р 7.0.100–2018. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 66 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
1. Варианты заданий для выполнения расчётно-графической работы	7
2. Выбор источника энергии подвижного состава.....	9
3. Определение типа тягового двигателя и его мощности	23
4. Разработка принципиальной электрической схемы силовых цепей	27
5. Определение параметров элементов силовых цепей электрических схем ...	33
6. Разработка системы управления электрооборудованием подвижного состава.....	38
7. Задачи.....	53
Заключение.....	75
Библиографический список	76

Бирюков Валерий Викторович

**АВТОНОМНЫЕ ВИДЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Учебное пособие

Редактор *Е.М. Федяева*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семёнова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 17.06.2021. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.
Уч.-изд. л. 4,65. Печ. л. 5,0. Изд. № 39. Заказ № 620. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20