

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет путей сообщения»
МГУПС (МИИТ)

На правах рукописи

Ко Ко Хтет

ИМПУЛЬСНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ В РЕЖИМАХ ТЯГИ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

диссертация на соискание ученой степени кандидата

технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

Феоктистов Валерий Павлович

Москва - 2014

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Аналитический обзор по тяговым электроприводам постоянного тока с импульсным регулированием и постановка задачи..	9
1. 1. Сферы применения импульсного регулирования в тяговых электроприводах постоянного тока	9
1. 2. Аналитический обзор по электропоездам с импульсным регулированием	14
1. 3. Реализация электрического торможения при импульсном регулировании	21
1. 4. Использование избыточной энергии рекуперации в пригородном сообщении.....	24
1. 5. Цель исследования и постановка задачи.....	30
Глава 2. Модель тягового электродвигателя для расчета систем импульсного регулирования.....	33
2. 1. Аппроксимация нелинейностей тягового двигателя для выполнения расчетов систем импульсного регулирования	33
2. 2. Обобщенная модель тягового электродвигателя постоянного тока ..	36
2. 3. Эквивалентная схема замещения тягового электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения для расчета электромагнитных процессов при импульсном регулировании	44
Глава 3. Развитие систем импульсного регулирования электродвигателей постоянного тока	56
3. 1. Регулировочные возможности коллекторных электродвигателей постоянного тока и развитие систем импульсного регулирования	56

3. 2. Обоснование структуры импульсного преобразователя электроэнергии в системе тягового электропривода (тяговый режим)	58
3. 3. Рекуперативное торможение	65
3. 4. Реостатное торможение	78
3. 5. Особенности тяговых электроприводов с накопителями электроэнергии (НЭ).....	83
3. 6. Характеристики тягового электропривода при импульсном управлении.....	84

**Глава 4. Математическая модель для расчета квазистационарных
процессов импульсного регулирования 97**

4. 1. Двухзонное регулирование тяговых электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения	97
4. 2. Математическая модель для расчета процесса импульсного регулирования тяговых электродвигателей в зоне 1	100
4. 3. Модель квазистационарного режима при импульсном регулировании процесса ослабления возбуждения (зона 2)	108
4. 4. Усовершенствование системы импульсного регулирования возбуждения с целью снижения пульсаций тока.....	114

**Глава 5. Автоматизация тяговых электроприводов с импульсным
регулированием и рекомендации по практическому использованию... 119**

5. 1.Обобщенная структура комплексной автоматизации.....	119
5. 2. Пример реализации двухконтурной системы автоматического регулирования электропоезда с импульсным преобразователем	122
5. 3. Устойчивость рекуперативного торможения в тяговом электроприводе с импульсным регулированием	128

5. 4. Эффективность модернизации эксплуатируемых мотор-вагонных электропоездов постоянного тока	133
Заключение.....	138
Список литературы	140

Введение

Основная сфера применения мотор-вагонной электрической тяги постоянного тока – это пригородные сообщения на базе электропоездов, состоящих из моторных и прицепных вагонов, метро и наземный городской транспорт (трамвай, троллейбус, в перспективе электромобили). Эта сфера характеризуется сравнительно низким напряжением питания тяговых двигателей от контактной сети (3 или 1,5 кВ на железной дороге, 600-850 В на метро и наземном транспорте). Соответственно применяют тяговый электропривод (*ТЭП*) с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения. Привод в традиционном исполнении обычно регулируется пусковым реостатом в сочетании с переключением группировок двигателей. Обычно предусматривают также реостатное торможение, а часто и рекуперативно-реостатное торможение. Однако, реостатно-контакторное регулирование функционально плохо соответствует требованиям частых пусков и остановок транспортного привода. Значительны потери энергии в реостате, весьма существенен износ контакторных групп.

Известно и применяется бесконтактное регулирование тяговых электроприводов на базе импульсных преобразователей, которые могут быть выполнены на силовых тиристорах или на транзисторах, например типа *IGBT*. При этом обеспечивается плавное, бесконтактное регулирование *ТЭП*, исключаются реостатные потери (экономия электроэнергии 10-16%), существенно упрощается процесс регулирования *ТЭП* за счет исключения ступенчатого регулирования снижается износ механической части поезда.

Схемы импульсного регулирования практически хорошо отработаны и надежны в эксплуатации, но теоретическая часть задачи перехода на импульсное регулирование требует обобщенного решения, в частности в связи с применением новой элементной базы (транзисторы *IGBT*).

Актуальность проблемы связана с массовостью систем пассажирского электротранспорта, необходимостью обеспечения его энергоэкономичности, надежности *ТЭП* и соответственно безопасностью перевозок пассажиров. Переход от ступенчатого контакторного реостатного регулирования к плавному бесконтактному существенно расширяет возможности автоматизации процесса ведения поезда. Плавное регулирование существенно снижает шум *ТЭП* и способствует снижению износа сцепных устройств, колесно-моторного блока и пути.

Мотор-вагонные поезда с тяговыми двигателями постоянного тока являются наиболее выгодным вариантом пригородного и внутригородского транспорта при пассажиропотоке 8-12 тыс. пассажиров в час. По сравнению с поездами, имеющими асинхронные тяговые приводы, электрооборудование предлагаемого поезда с двигателями постоянного тока и импульсным регулированием является более дешевым и простым в обслуживании, требует в системе техобслуживания менее квалифицированного персонала.

Такие поезда наиболее пригодны для городов Юго-Восточной Азии, где требуется надежный и дешевый городской транспорт. Наземный рельсовый транспорт требует минимум уличной площади и создает минимум помех движению других видов транспорта и пешеходов. Еще более существенные преимущества имеют метрополитен и подземный трамвай.

Поэтому практические выводы по данной диссертации могут быть использованы на этапе проектирования систем городского рельсового транспорта, в том числе наземного метро облегченного типа и скоростного трамвая, но они требуют более высоких капитальных и эксплуатационных расходов.

Научная новизна работы заключается в разработке теоретической модели и универсального метода расчета систем широтно-импульсного регулирования тяговых электроприводов постоянного тока. Метод учитывает

реальные параметры тягового электродвигателя с нелинейностями и вихревыми токами. По единой методике рассмотрены все три возможных рабочих режима: тяга, рекуперативное и реостатное торможение. Универсальные расчетные формулы сведены в общую таблицу. Универсальность решения обеспечивается введением допущения о линейности изменения тока двигателя в функции времени в течение характерных интервалов периода импульсного регулирования. Это допущение обосновано профессором Феоктистовым В. П. совместно с к. т. н. Чаусовым О. Г. при разработке первых импульсных преобразователей.

Цель диссертационной работы заключается в обобщении известных методов расчета импульсных электромеханических систем и формулировании на этой основе унифицированного метода для анализа квазистационарных процессов в электромеханической системе тягового электропривода с двигателем постоянного тока последовательного возбуждения.

Методы исследования базируются на алгебраизации обыкновенных дифференциальных уравнений, что позволяет свести их к системе линейных алгебраических уравнений и получить в явном виде аналитические выражения для регулировочных и пульсационных характеристик. Такие характеристики получены для зоны регулирования силовой части тягового привода при полном возбуждении двигателей ($\beta = 1$) и для зоны ослабления возбуждения ($\beta < 1$).

Достоверность научных положений и рекомендаций определяется корректностью применения методов решения обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, согласно основным положениям высшей математики.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенный расчетно-аналитический аппарат может быть использован на этапе эскизного

проектирования тягового электропривода (оценка амплитуды и частоты пульсаций тока тягового электродвигателя, регулировочная характеристика электропривода, быстродействие регулятора, возможность работы с различными уставками пускового или тормозного тока и т.д.).

Личный вклад соискателя заключается в уточнении и отработке математической модели тягового электропривода с импульсным преобразователем, обосновании базового допущения о характере изменения тока в характерных пределах цикла импульсного регулирования, в выполнении проверочных расчетов для тягового привода моторного вагона с двигателями постоянного тока мощностью 150 кВт при нескольких частотах, в том числе при рабочей частоте 400 Гц.

Реализация результатов работы выполнена путем включения основных ее положений в научные отчеты кафедры «Электрическая тяга» МИИТа по плану НИР, выполненных для ОЭК «Динамо» и Демиховского машиностроительного завода (ДМЗ).

Апробация работы выполнена путем испытаний основных тяговых и тормозных режимов на стенде в лаборатории автоматизации ЭПС постоянного тока кафедры «Электрическая тяга» МИИТа, путем докладов основных ее положений на XII, XIII и XIV научно-практических конференциях «Безопасность движения поездов» в МИИТе и на научно-техническом семинаре кафедры «Электропоезда и локомотивы» МИИТа, а также путем публикации статей в журналах «Электроника и электрооборудование транспорта» и «Вестник МИИТа».

Глава 1. Аналитический обзор по тяговым электроприводам постоянного тока с импульсным регулированием и постановка задачи

1.1. Сферы применения импульсного регулирования в тяговых электроприводах постоянного тока

Импульсное регулирование заменяет традиционное контакторно-реостатное управление электродвигателями постоянного тока, обеспечивая при этом следующие преимущества:

- исключение пусковых реостатных потерь при разгоне электропривода, особенно при инерционных нагрузках; тяговый электропривод является такой системой, поскольку функцию нагрузки выполняет масса поезда;
- замена контакторного регулирования (силовой контроллер) бесконтактным, что позволяет использовать более совершенные системы плавного автоматического управления, в том числе на базе микропроцессоров и микроконтроллеров;
- возможно применение функционально более развитых и надежных систем рекуперативного, реостатного и рекуперативно-реостатного торможения (с существенным расширением диапазона скоростей, в котором можно применять электрическое торможение).

Импульсное регулирование реализуется импульсными преобразователями, выполненными на тиристорах (однооперационных или запираемых *GTO*) или на силовых транзисторах *IGBT*. Процесс импульсного регулирования сопровождается пульсациями тока двигателя, причём на двигатель действуют импульсы напряжения прямоугольной формы U_d с амплитудой, равной напряжению источника U . Упрощенная схема системы импульсного регулирования (рисунок. 1.1) содержит тиристорный или транзисторный импульсный преобразователь *ТИП*, работающий на

постоянной частоте $f = \mathit{const}$ и обратный диод $ОД$. Импульсный режим вызывает пульсации тока в тяговых двигателях $ТЭД$, т.е. $I_{\mathit{вых}}$, а также пульсации тока I_1 в цепи источника U . Для сглаживания этих пульсаций предусмотрены фильтры: входной индуктивно-емкостной $L_\phi C_\phi$ и выходной индуктивный L_ϕ , выполняющий функции сглаживающего реактора $СР$.

Сглаживание I_1 необходимо с точки зрения обеспечения электромагнитной совместимости. Сглаживание $I_{\mathit{вых}}$ необходимо также для обеспечения нормальной коммутации на коллекторах $ТЭД$. Возможные способы генерации и сглаживания пульсаций сведены в схему в таблице 1. 1. На рисунке 1. 2. представлена диаграмма электромагнитных процессов при импульсном регулировании. Ввиду специфики этих процессов для их расчетов необходимы регулировочные и пульсационные характеристики, т. е. $U_{ТЭД}(k)$ и $\Delta I_{ТЭД}(k)$. Эти расчеты выполнены на основе универсальной математической модели, обоснованной в главе 4.

Процесс импульсного регулирования характеризуется частотой f модуляции входного напряжения U , периодом $T = 1/f$ модуляции и коэффициентом заполнения импульсного цикла k , причем длительность импульса на выходе $ТИП$ равна

$$\tau = kT = k/f. \quad (0 \leq k \leq 1)$$

В теории импульсного регулирования рассматривают основные способы импульсного регулирования:

- широтно-импульсное $f = \mathit{const}$, $\tau = \mathit{var}$ ($ШИИР$);
- частотно-импульсное $f = \mathit{var}$, $\tau = \mathit{const}$ ($ЧИИР$);
- комбинированное $f = \mathit{var}$, $k = \mathit{var}$.

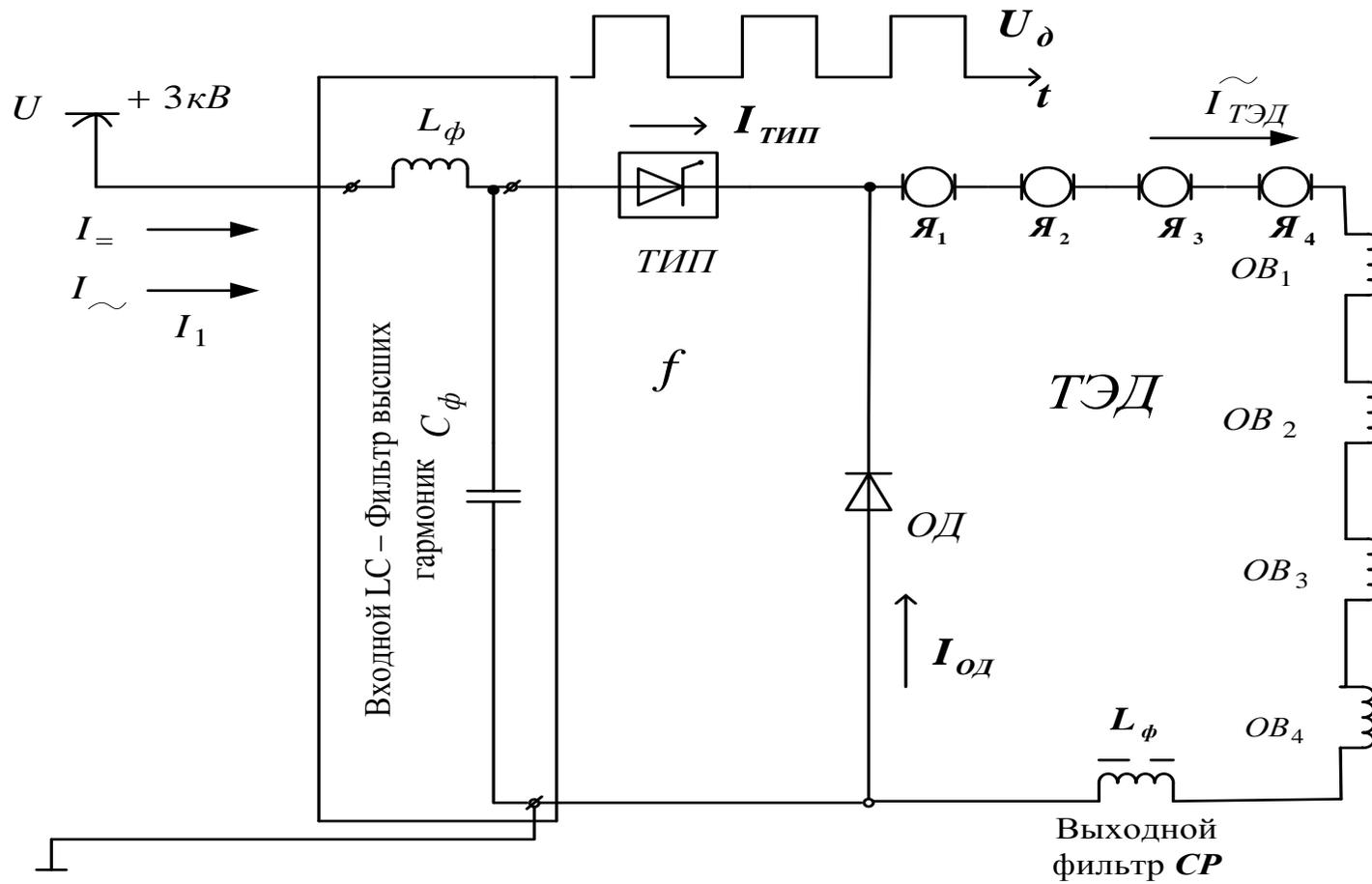


Рисунок. 1. 1. упрощенная схема моторного вагона с импульсным регулированием

Таблица 1. 1. Сглаживание пульсаций входного (первичного) и выходного тока в системе импульсного регулирования

Способы сглаживания пульсаций тока \tilde{I}_1 и $\tilde{I}_{ТЭД}$		
Повышение частоты f за счет использования быстродействующих тиристоров ($ТБ$, $ТЧ$) или транзисторов $IGBT$	Усиление входного фильтра $L_\phi - C_\phi$	Усиление выходного фильтра $L_\phi (CP)$
	Применение входного активного (управляемого) фильтра	Увеличение индуктивности $ТЭД$ (на этапе его проектирования)

По условиям электромагнитной совместимости в тяговых электроприводах используют только широтно-импульсное регулирование (ШИР). Рабочую частоту f стабилизируют на уровне, определяемом из следующих условий:

- для сглаживания пульсации первичного тока I_1 , и тока двигателя $I_{од}$ следует повышать f ;
- повышение f ограничено частотными свойствами $ТИП$, т. е. его быстродействием;
- частота f должна удовлетворять требованиям электромагнитной совместимости тягового электропривода с устройствами ж. д. автоматики и связи.

При реализации $ТИП$ на тиристорах обычно принимают $f = 400 \text{ Гц}$ (электропоезд ЭР12 с преобразователями $ТИП-1320/3$) или при двухфазной схеме повышают частоту $f = 2 \times 400 \text{ Гц}$ (электропоезд ЭР30). Если использовать силовые транзисторы $IGBT$, то частоту можно повысить до 2 кГц . Это существенно облегчает сглаживание пульсаций.

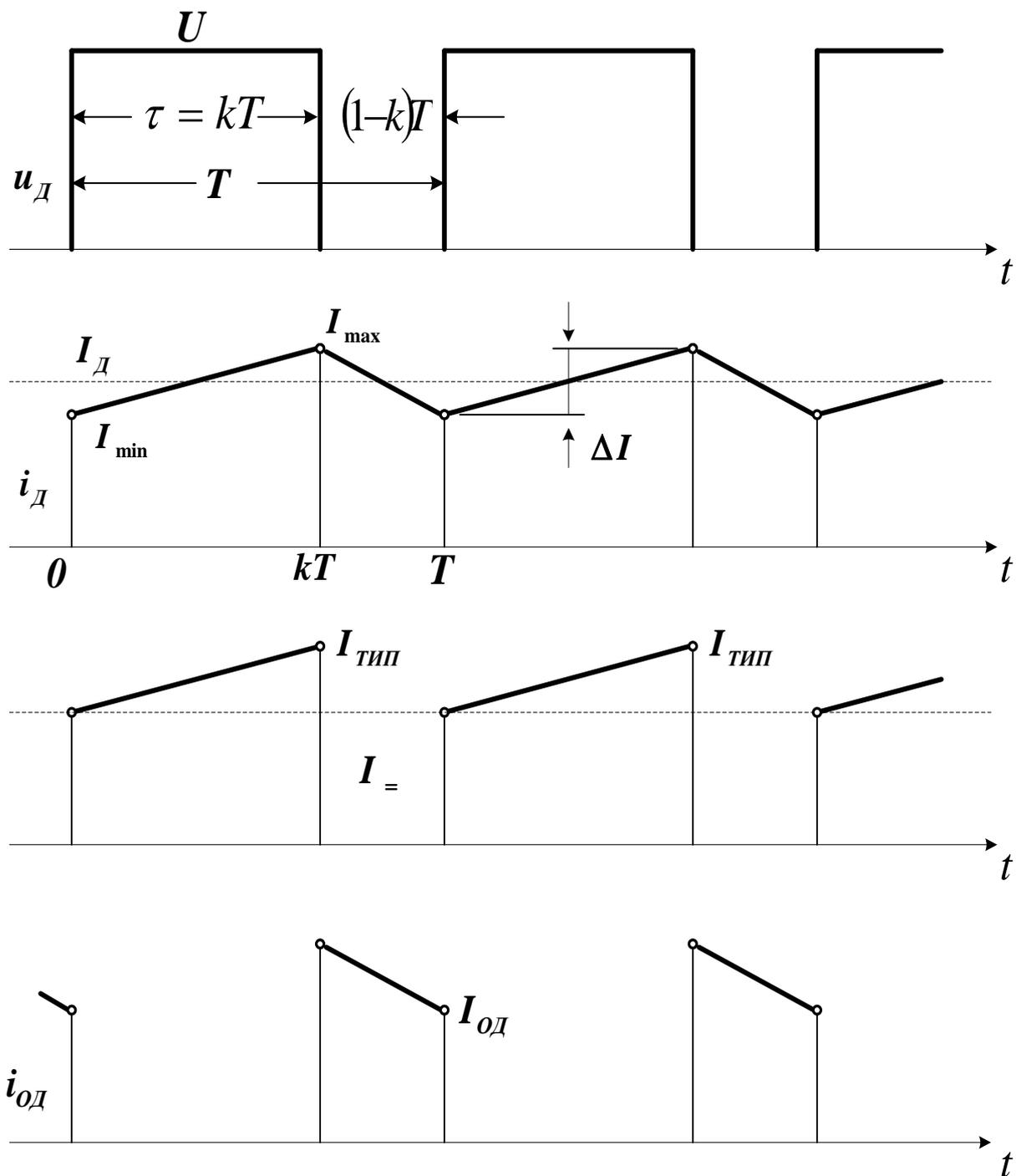


Рисунок. 1. 2. Импульсная диаграмма электромагнитных процессов в тяговом электроприводе по рисунку 1. 1.

Таким образом, применение импульсного регулирования целесообразно для электроприводов поездов пригородного сообщения при питании от контактной сети постоянного тока 3 кВ и для городского электротранспорта (метро, трамвай, троллейбус).

В частности, целесообразно выполнить модернизацию электропоездов типов ЭР, ЭТ и ЭД с установкой импульсных преобразователей. Это обеспечит существенную экономию электроэнергии при сравнительно небольших затратах на модернизацию. Одновременно появляется возможность использовать системы плавного автоматического регулирования тяговых электроприводов в двигательном и тормозном режимах. Обеспечивается повышение надежности электрооборудования поезда, что определяется надежностью современной элементной базы силовой электроники и микропроцессорных систем управления.

1. 2. Аналитический обзор по электропоездам с импульсным регулированием

Значительные резервы экономии энергии имеются в пригородном сообщении, метро и на наземном городском электротранспорте. Это связано с тем, что существующий мотор-вагонный подвижной состав имеет значительные пусковые и тормозные потери. На электропоездах постоянного тока, обслуживающих 90 % общего объема пригородных и городских перевозок, применяется реостатный пуск и у значительного количества электропоездов отсутствует рекуперативное торможение. Указанные потери являются весьма ощутимыми, поскольку они достигают 25 – 28 % общего потребления электроэнергии в пригородном и городском сообщении.

Энергетически эта проблема может быть решена применением системы тиристорного или транзисторного импульсного регулирования. Это позволяет не только исключить пусковые и тормозные потери, но и обеспечивает возможность качественного улучшения тягово-энергетических показателей электропоездов за счет использования более совершенных систем автоматики, плавного регулирования силы тяги, эффективной защиты от боксования и повышения жесткости тяговых характеристик. Существенно облегчается протекание переходных процессов в силовой цепи, создаются более благоприятные условия для работы тяговых двигателей. Поэтому

применение систем импульсного регулирования тяговых электроприводов не сводится только к замене пускового реостата импульсным преобразователем, а предполагает проектирование электропоездов на принципиально новой основе плавного быстродействующего бесконтактного регулирования с применением систем автоматики (в перспективе на базе микропроцессоров).

Применение импульсного регулирования накладывает специфические особенности на выполнение всех элементов электрооборудования моторных вагонов. Структурная схема всех аспектов комплексной проблемы импульсного регулирования электропоездов представлена на рисунке 1. 3. При этом предполагается решение как комплексных, так и частных вопросов, касающихся отдельных элементов оборудования электропоезда (преобразователь, защитные фильтры, переключатели, тяговый электродвигатель, устройства защиты и т.д.). Комплексные вопросы проектирования тяговых электроприводов предполагают исследования указанных элементов во взаимодействии, что обеспечивает решение проблемы на более высоком уровне.

К настоящему времени проблема импульсного регулирования исследована в теоретическом плане достаточно полно, особенно в части изучения электромагнитных процессов в силовых цепях, синтеза схем преобразователей, взаимодействия системы импульсного регулирования с питающей сетью. Основные работы в этой области для электропоездов выполнены на кафедре «Электрический транспорт» МЭИ, в отделении электрификации железных дорог ГУП «ВНИИЖТ», на кафедрах «Электропоезда и локомотивы», «Электрические машины» и «Электротехника, метрология и электроэнергетика» МИИТа, «Электрическая тяга» ПГУПСа, «Электрическая тяга» ДИИТа, в Рижском филиале ВНИИВ (РФ ВНИИВ), лаборатории надежности электропоездов бывшей Прибалтийской железной дороги (наименования организаций даны по 1991г.).

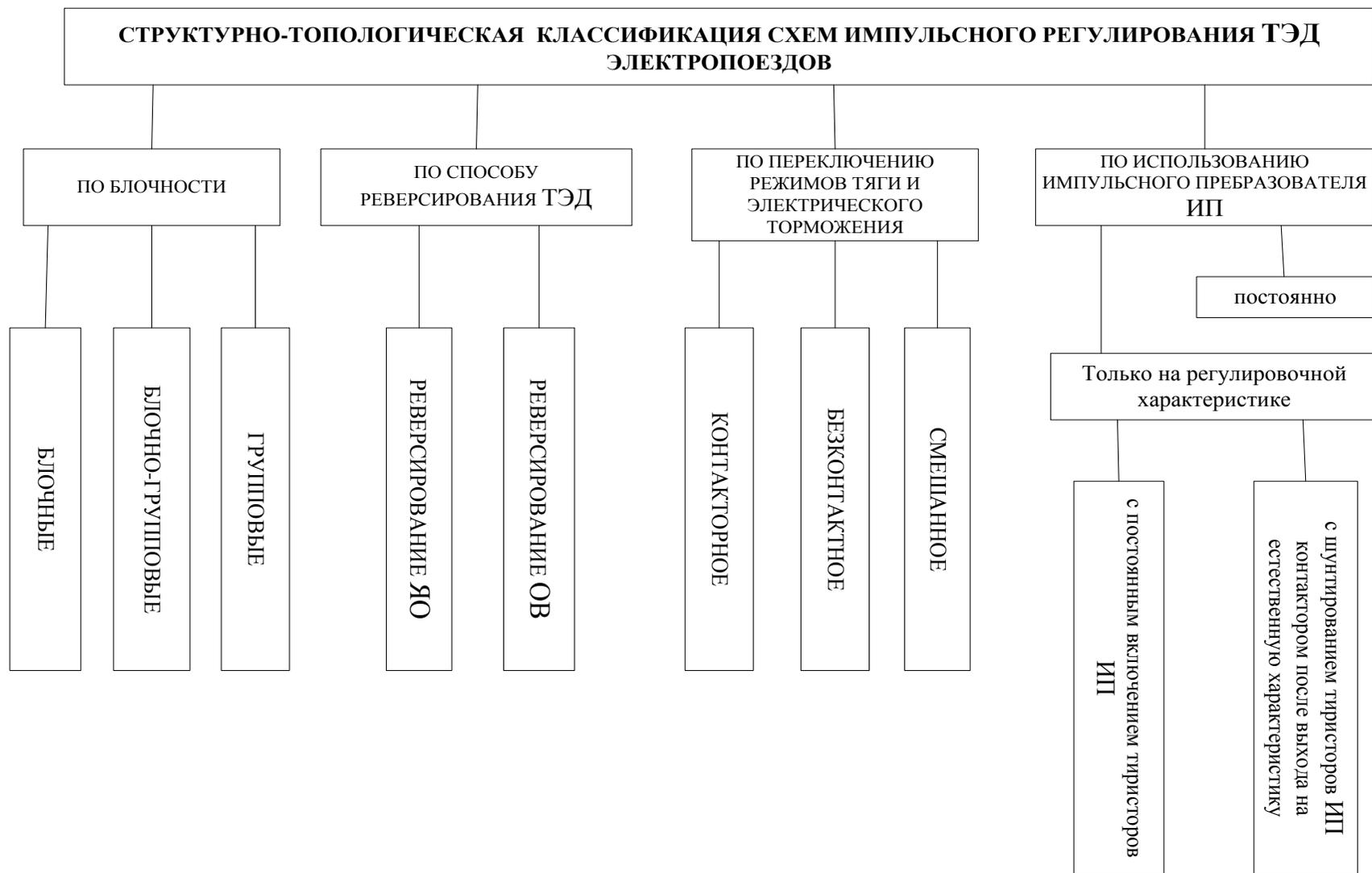


Рисунок. 1. 3. Варианты выполнения силовых цепей электропоездов с импульсными преобразователями

Благодаря указанным работам ученых обеспечены модернизация поезда ЭР2И, выпуск электрооборудования для опытной партии электропоездов ЭР12 и ЭР30. Ведутся работы по выпуску электропоездов ЭД4, ЭД4М и ЭД6 на Демиковском машиностроительном заводе. Серийные электропоезда ЭР2 проходят капитальный ремонт с продлением срока службы (КРП) модернизируются в электропоезда ЭМ2И.

Уровень разработки электроподвижного состава постоянного тока с импульсными преобразователями за рубежом для железных дорог и метро может быть оценен как переход от опытных партий к серийному производству. Сюда можно отнести поезда напряжением 750 В Берлинской городской ж. д. и др. Они находятся в эксплуатации более 20 лет.

Достигнутый уровень электроподвижного состава с импульсными преобразователями может быть в целом оценен как создание систем регулирования, которые по показателям надежности, энергоэкономичности и критерию электромагнитной совместимости удовлетворяют комплексу требований современной эксплуатационной практики. Именно на решение указанной задачи были направлены основные теоретические и экспериментальные работы. При этом, в основном решены проблемы комплексного расчета электромагнитных процессов в силовой части электропоезда с учетом конечных параметров питающей сети, разработана методика проектирования импульсных преобразователей и оценки их энергетических показателей.

Очередная задача состоит в том, чтобы разработать теорию комплексного расчета систем с импульсными преобразователями, учитывая при этом процессы в системах регулирования и управления, а также учесть специфические ограничения электроподвижного состава, например по сцеплению. Это позволит выполнять комплексное проектирование систем импульсного регулирования по критерию достижения наилучших показателей работы электропоездов — т.е. минимуму расхода энергии при

заданной технической скорости. Таким образом, проблема разработки теории регулирования режимов работы электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями должна быть решена на базе учета требований по существенному улучшению тягово-энергетических показателей перспективных электропоездов. Конкретные направления возможных решений иллюстрируются на рисунке 1.4.

Цель данной работы состоит в разработке метода определения потенциально возможной экономии энергозатрат в пригородном сообщении при использовании достижений современной техники регулирования электроприводов постоянного тока. При этом предполагается учесть как возможности средств полупроводниковой преобразовательной техники, так и возможности автоматики, обеспечивающие в режиме пуска и остановочного торможения регулирование тяговых электромашин по пределу фактических ограничений по нагрузочной и коммутационной способности.

Кроме того, результаты работы имеют практическое значение, так как по ней могут быть обоснованы рекомендации по реализации повышенного возврата электроэнергии в системах рекуперативного торможения пригородных электропоездов, уточнены расчетные методики для определения возврата энергии и даны рекомендации по выполнению систем рекуперативного торможения перспективных электропоездов.

Применение импульсного регулирования целесообразно в первую очередь на модернизируемых электропоездах с двигателями постоянного тока. При этом обеспечивается самый дешевый вариант модернизации электропоездов с энергосбережением и с продлением ресурса. Однако, перспективные разработки следует вести по тяговым электроприводам с АТД. Такая концепция заложена в типаже электропоездов, утвержденном НТС МПС РФ в 2002г, а также в Стратегической программе развития ОАО «РЖД».



Рисунок. 1. 4. Структура проблемы импульсного регулирования электропоездов постоянного тока

Таблица 1. 2. Этапы развития тяговых электроприводов электропоездов постоянного тока пригородного сообщения и городского электротранспорта

Развитие тяговых электроприводов постоянного тока		
<u>Этап I</u>	<u>Этап II</u>	<u>Этап III</u>
Коллекторный ТЭД постоянного тока последовательного возбуждения (мощность 100-250 кВт)		Асинхронный тяговый двигатель АТД (мощность 150-450 кВт)
<u>Регулирование:</u> 1. Реостат R. 2. Переключение группировок ТЭД (С-П). 3. Ослабление возбуждения ТЭД.	<u>Регулирование:</u> 1. ТИП-РН для регулирования напряжения на ТЭД. 2. ТИП-ОВ для ослабления возбуждения.	<u>Регулирование:</u> Частотное с одновременным изменением напряжения и частоты, например по закону академика М. П. Костенко.
Рекомендация по использованию технического решения по этапам I, II, III		
Продолжить эксплуатацию электропоездов до капитального ремонта	Использовать при капитальном ремонте электропоездов с установкой ТИП-РН и ТИП-ОВ	Использовать при проектировании и производстве новых электропоездов

В теории и практике разработки и эксплуатации тяговых электроприводов принято выделять три основных этапа (таблица 1. 2). Большинство эксплуатируемых электропоездов соответствует этапу **I**. Имеются на Московской ж. д. электропоезда ЭМ2И, а в метро вагоны серий Еи и И с импульсным регулированием (этап **II**). Аналогичная ситуация характерна и для наземного городского электротранспорта (трамвай и троллейбус).

Импульсное регулирование целесообразно для модернизации эксплуатируемых электропоездов; при этом сохраняется основное оборудование (тяговые двигатели и вся механическая часть моторной тележки), демонтируется основная часть наименее надежного электрооборудования (силовые контроллеры и другая контакторная аппаратура). В результате может быть продлен ресурс электропоезда (обычно на 15 лет).

К этапу **III** относятся опытные электропоезда ЭТ2А и ЭДб железных дорог и поезда типа РУСИЧ метро. Здесь нужно отметить простую конструкцию асинхронного тягового двигателя (*АТД*); но существенно усложняется электронная аппаратура. Это затрудняет переход к массовому серийному производству этих поездов, хотя для метро проблема решена и поезда РУСИЧ массово вводят в эксплуатацию.

1. 3. Реализация электрического торможения при импульсном регулировании

Электрическое торможение всегда применяют на современном электроподвижном составе (*ЭПС*). На *ЭПС* постоянного тока наиболее эффективно электрическое торможение с импульсным регулированием. Это регулирование может быть реализовано при помощи низковольтных и высоковольтных импульсных преобразователей (*НВ-ИП* и *ВВ-ИП*), которые функционируют в цепях соответственно обмоток возбуждения или якорных обмоток.

Конкретно вариант *НВ-ИП* использован на *ЭПС* следующих типов:

- электровазы ВЛ10, ВЛ11, ВЛ15 имеют импульсный преобразователь для регулирования тока в обмотке возбуждения машинного преобразователя, который питает обмотки возбуждения тяговых электромашин в режиме рекуперации;
- электровазы ЧС7, электропоезда ЭР200, вагоны метро типа Е имеют реостатный тормоз с питанием обмоток возбуждения тяговых электромашин через *НВ-ИП* от секции тормозного реостата.

Достоинство схем с *НВ-ИП* заключается в их простоте, надежности, малых габаритах и массе. Поэтому такие схемы широко применяют на серийном *ЭПС*; они хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации.

Но наиболее полно функциональные возможности импульсного регулирования проявляются при совместном использовании *ВВ-ИП* и *НВ-ИП*. Это позволяет использовать электрический тормоз во всем диапазоне скоростей:

- в зоне высоких скоростей тормозной (генераторный) режим регулируют при помощи *НВ-ИП*; изменяя коэффициент ослабления возбуждения β в пределах от β_{\min} до $\beta = 1$;
- в зоне низких скоростей, т. е. при $\beta = 1$ и ЭДС $\sum E < U$, регулируют режим рекуперации только при помощи *ВВ-ИП*;
- в зоне сверхнизких скоростей $V < (6 \div 8 \text{ км/ч})$ можно использовать торможение противовключением, сохраняя тормозной момент двигателя и тормозную силу моторного вагона до остановки.

Электрический тормоз с совместным использованием *НВ-ИП* и *ВВ-ИП* реализован на вагонах метро типов Еи, И, на пригородных электропоездах ЭР30, ЭМ2И, а также на зарубежных электропоездах (ЕС и Япония), при напряжении 750 или 1500 В. Импульсное регулирование тормозной силы

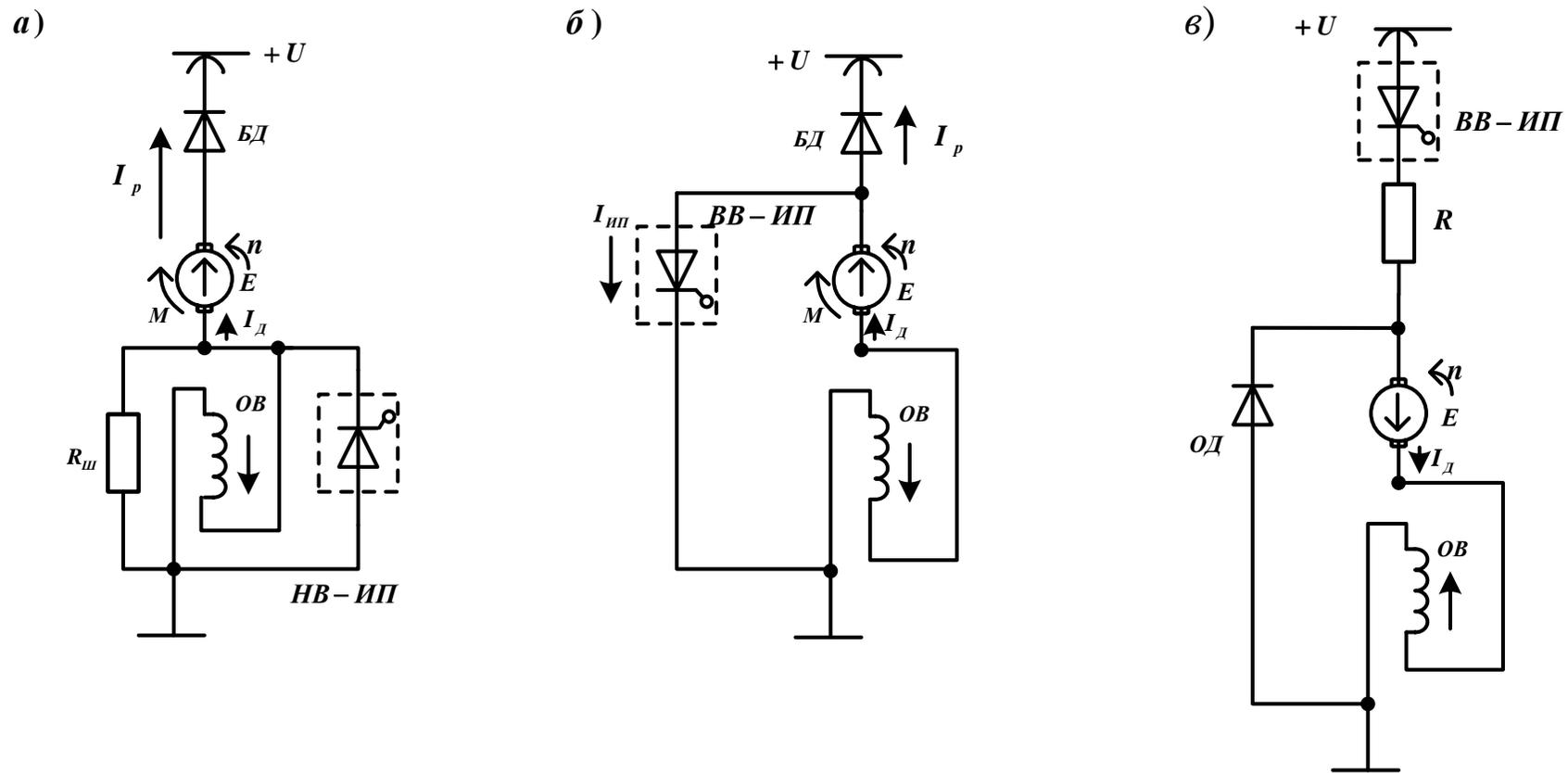


Рисунок. 1. 5. Варианты электрического торможения при импульсном регулировании

а) зона высоких скоростей $E > U$

б) зона средних скоростей $E < U$

в) зона низких скоростей $|E| \ll U$

реализуют с высоким быстродействием. Это даёт возможность предусматривать эффективную защиту от избыточного проскальзывания колесных пар и соответственно повысить реализуемые значения коэффициента сцепления.

Рассмотренные варианты электрического торможения показаны в упрощенном виде на рисунке 1. 5. При этом рекуперативный тормоз по рисунку 1. 5, *а*, *б*. обычно дополняют реостатным, подключая реостат параллельно обмоткам двигателя. Это связано с тем, что в тяговой сети U может отсутствовать приемник рекуперированной энергии, т. е. другой поезд, работающий в тяговом режиме. Однако, новые технологии позволяют использовать более эффективные решения, что рассмотрено в следующем разделе.

Противовозбуждение (противовключение *ТЭД*) по рисунку 1. 5, *в* используют редко, так как оно не обеспечивает режим стояночного тормоза, т. е. сохранения тормозной силы при $V = 0$.

1. 4. Использование избыточной энергии рекуперации в пригородном сообщении

В системе тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ переменный ток высокого напряжения, например 110 кВ , потребляемый из Единой энергосистемы *ЕЭС*, преобразуется на тяговых подстанциях в постоянный ток напряжением 3 кВ . Аналогичную ситуацию имеем на городском электротранспорте при напряжении в тяговой сети $600\text{-}850 \text{ В}$. Данная система обеспечивает передачу энергии от тяговой подстанции к электропоезду, но в ней обычно не предусмотрено использование энергии рекуперации, кроме как другими поездами в данной фидерной зоне. Таким образом, возникает проблема использования избыточной энергии, не расходуемой на тягу (см. рисунок. 1. 6). Обычно эту проблему решают при помощи инвертора на тяговой подстанции.

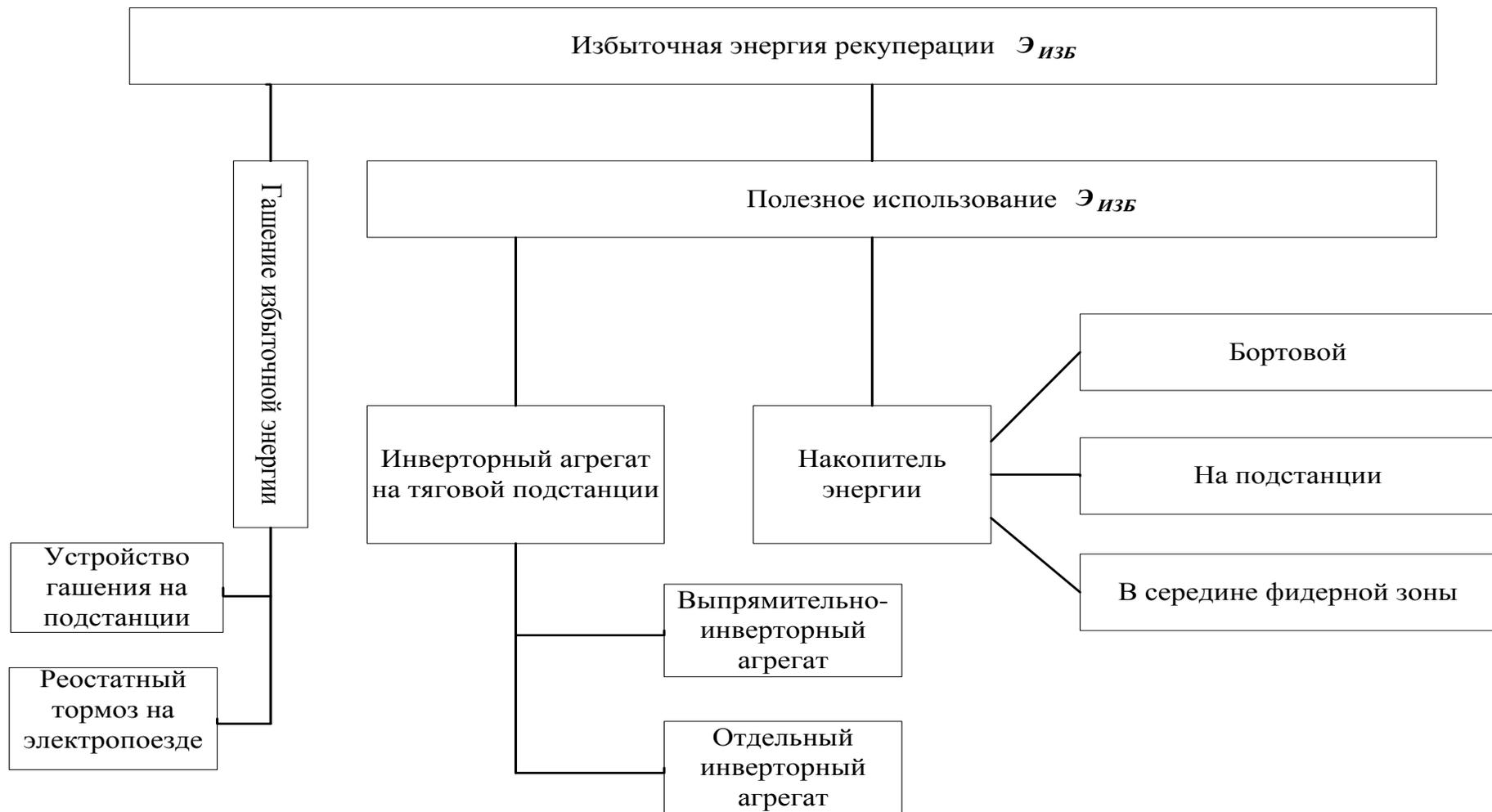


Рисунок. 1. 6. Схема возможных вариантов использования избыточной энергии рекуперации

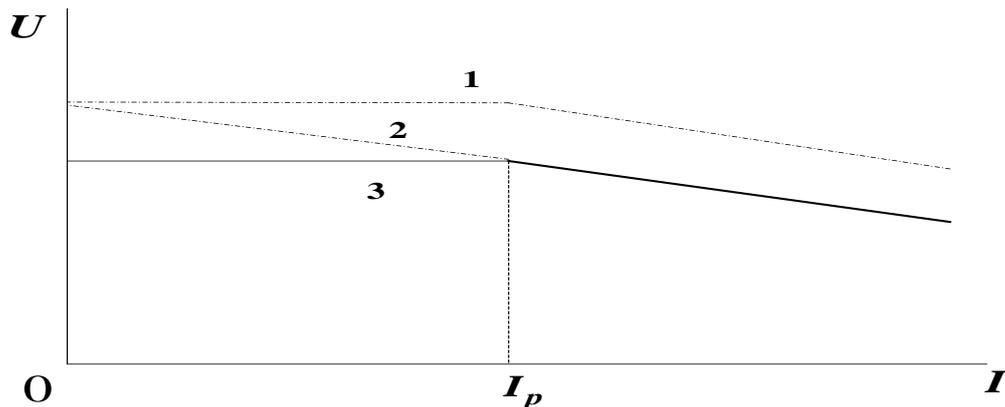


Рисунок. 1.7. Зависимость напряжения U на выходе выпрямителя тяговой подстанции от тока нагрузки I : **1** - регулятор DCVR; **2** - диодный выпрямитель; **3** - тиристорный выпрямитель.

В связи с тем, что возможность применения рекуперативного торможения при наличии инвертора на подстанции зависит от уровня напряжения в контактной сети, обеспечить реализацию рекуперативного торможения можно регулированием этого напряжения. Понизить напряжение в контактной сети можно, сменив выводы трансформатора, от которых получает питание выпрямитель. Однако, при этом приходится выполнять переключения под большими нагрузками. Можно с такой же целью использовать тиристорный выпрямитель, который позволяет поддерживать напряжение постоянным и более низким по сравнению с напряжением при диодном выпрямителе до тока I_p (100 % нагрузки) и равное ему при большей нагрузке (рисунок. 1. 7). Еще один метод – применение комбинированного выпрямителя, имеющего и тиристорное, и диодное устройства. В этом случае можно применять тиристоры небольшой мощности, так как основная доля рекуперированной энергии будет потребляться другим ЭПС в данной фидерной зоне.

Был предложен также новый метод, обеспечивающий постоянство питающего напряжения, - это совместное использование регулятора DC

variable regulator DCVR (регулятора питающего напряжения постоянного тока) и полупроводникового выпрямителя. Регулятор DCVR обеспечивает более высокое напряжение и может быть использован для компенсации падения напряжения питания на тупиковой ветви пригородной линии.

Как правило, в существующих системах тягового электроснабжения постоянного тока отсутствуют устройства, необходимые для приема избыточной энергии рекуперации. Снижение стоимости тиристоров позволяет повсеместно осуществлять регулирование и инвертирование постоянного напряжения в контактной сети. Основное оборудование, требующееся для этого, приведено в таблице 1. 3.

Представляется, что выбор соответствующего электрооборудования для системы тягового электроснабжения в основном определяется экономическими соображениями.

Таблица 1. 3. Оборудование, обеспечивающее возможность применения рекуперативного торможения на электропоездах

Пригородный участок	Профиль участка	Оборудование на тяговой подстанции
Пригородное движение совместно с дальним пассажирским и грузовым	Горизонтальный	Тиристорный выпрямитель
		Тиристорный инвертор
	С уклонами	Тиристорный инвертор
		Резисторы
Только пригородное движение (или городской транспорт)	Горизонтальный	Регулятор DCVR и диодный выпрямитель
		Специальное оборудование не требуется
	С уклонами	Реостатное торможение
		Резисторы

Поставленные цели - экономия электроэнергии и уменьшение износа тормозных колодок - требуют определенных капиталовложений на мероприятия, связанные с внедрением рекуперативного или реостатного торможения. Применительно к тиристорному выпрямителю они определяются как разность стоимостей тиристорного выпрямителя и диодного. В случае комплексного применения регулятора DCVR и диодного выпрямителя необходимы дополнительные затраты, определяемые только стоимостью регулятора.

При тиристорном инверторе и резисторах капиталовложения равны суммарной стоимости этих устройств.

Представляется, что на магистральных линиях применение тиристорного выпрямителя является наиболее целесообразным с точки зрения эффективности капиталовложений, экономии энергии и т.д. Такой выпрямитель лучше выполнять не чисто тиристорным, а включать в него и диодное устройство, так как стоимость тиристоров выше стоимости диодов. Соотношение мощностей диодных и тиристорных устройств может составлять от 1:1 до 8:6; предпочтение стоит отдавать устройству меньшей стоимости, но производить проверку в отношении высших гармоник. Можно предположить, что в будущем удастся обеспечить незначительное содержание высших гармоник при соотношении мощностей диодных и тиристорных устройств 1:1.

В случае большого числа тиристорных выпрямителей и регулировании напряжения на тяговой подстанции в незначительных пределах следует добиться равенства нагрузок выпрямителей. Например, можно применить метод «управляющий — управляемый», при котором ток на выходе управляемой стороны отслеживает ток на выходе управляющей.

Регулятор DCVR по существу представляет собой тот же тиристорный выпрямитель, но он более эффективен. Однако, для размещения регулятора

необходимо большее пространство в помещении тяговой подстанции. Полная стоимость потребляемой энергии не может быть возвращена, даже если вся рекуперлируемая энергия была передана обратно в систему внешнего электроснабжения (счетчики электроэнергии оборудованы механизмом предотвращения реверсирования). С этой точки зрения применение тиристорного инвертора будет неэффективным. Однако, такой инвертор целесообразно использовать на участках с затяжными уклонами, на которых недопустимы отказы рекуперативного торможения, а также на участках с большими распределенными нагрузками, т.е. с высокой плотностью движения электроподвижного состава. Кроме того, в этом случае, при меньшей нагрузке целесообразным может оказаться применение резисторов или накопителей энергии.

Мощность тиристорного инвертора зависит от пиковой нагрузки. Необходимо учитывать, что мощность питающего трансформатора определяется средней нагрузкой. На тиристорный инвертор обычно действует мгновенная пиковая нагрузка, однако принято, что его средняя нагрузка меньше чем $1/10$ пиковой.

Питающее напряжение на участках, где электроподвижной состав работает только в тяговом режиме, задавалось предельно высоким. Однако, после введения в эксплуатацию электропоездов с рекуперативным торможением предпочтительно задавать более низкое питающее напряжение. Идеальным является регулирование постоянного напряжения с помощью тиристорного выпрямителя или регулятора DCVR. Как правило, питающее напряжение устанавливают выше в часы пик и ниже в остальное время, поскольку вероятность того, что рекуперлируемая энергия используется электропоездами в часы пик, велика и незначительна в остальное время, когда на линии не может быть поездов, работающих в тяговом режиме.

В случае нахождения на линии нескольких поездов регулирование напряжения производится с учетом предполагаемого местонахождения

каждого из них и создаваемой ими нагрузки на линию. Однако при большем числе поездов на линии достаточно трудно учесть все это при регулировании напряжения, так как условия работы этих поездов различны. Целесообразно было бы устанавливать среднее значение напряжения.

Расхождения напряжений необходимо сводить к минимуму, чтобы по возможности выровнять нагрузку соседних подстанций. Если напряжение в контактной сети изменяют переключением выводов (отпаек) трансформатора тяговой подстанции, то желательно иметь достаточно большое число таких выводов, что облегчает задание соответствующего напряжения.

Исследования, выполненные японскими учеными для системы постоянного тока $1,5 \text{ кВ}$, показали эффективность применения как тиристорного выпрямителя, так и регулятора DCVR для регулирования напряжения в контактной сети постоянного тока при эксплуатации электроподвижного состава с рекуперативным торможением. Рекуперативно-реостатное торможение целесообразно применять на всех видах моторвагонного ЭПС, что реализовано на большинстве эксплуатируемых электропоездов ОАО «РЖД».

1. 5. Цель исследования и постановка задачи

Основу парка ЭПС постоянного тока на железных дорогах $U=3 \text{ кВ}$ и на городском электротранспорте $U=600-850 \text{ В}$ составляют электровозы и электропоезда с тяговыми электроприводами постоянного тока. Хотя для железных дорог разработаны опытные образцы ЭПС с АД (электровозы ЭП10 и электропоезда ЭД6), но продолжается серийное производство ЭПС с коллекторными двигателями, в частности электропоездов ЭД4М, ЭД4МК, ЭМ2, ЭТ2. Парк ЭПС метро пополняется только вагонами нового поколения типа РУСИЧ, но большинство вагонов эксплуатируемого парка имеют двигатели постоянного тока с реостатным или импульсным регулированием.

Реостатное регулирование тяговых двигателей на мотор-вагонном ЭПС сопряжено со значительными пусковыми потерями энергии (12-16% в пригородном сообщении, около 20% в метро, 25-30% у трамвая и троллейбуса). Новые электропоезда пригородного сообщения имеют рекуперативно-реостатное торможение, но при замедлении поезда возврат энергии в тяговую сеть возможен только до скорости 36-42 км/ч. Импульсное регулирование позволяет снизить этот предел до 6-8 км/ч, увеличивая долю возврата энергии. Таким образом, основная цель применения импульсного регулирования или более сложных преобразовательных систем для ЭПС с АТД – это экономия электроэнергии в электрической тяге постоянного тока.

Уже сейчас имеется возможность выполнять преобразователи ВВ-ИП и НВ-ИП на транзисторах IGBT, которые можно считать идеальными ключевыми элементами. Они не имеют контуров емкостной коммутации, что облегчает расчет их внешних и регулировочных характеристик.

Постановка задачи может быть сведена к разработке универсальной методики расчета квазистационарных процессов на базе единого методического подхода к решению задачи анализа электромагнитных процессов для режимов пуска и электрического торможения электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения. Отличие от ранее разработанных методик заключается в том, что учтено отсутствие устройств искусственной коммутации, а повышение рабочей частоты ключевых элементов на транзисторах IGBT позволяет упростить схему замещения тягового электродвигателя.

Цель исследования состоит в обосновании универсальной математической модели, учитывающей специфику импульсных прерывателей, выполненных на транзисторах IGBT. На базе этой модели предполагается найти аналитические выражения для регулировочных и пульсационных характеристик, а также координаты их экстремумов.

Результаты будут представлены в форме обобщающей таблицы с аналитическими выражениями для указанных выше характеристик для всех режимов тяги и электрического торможения. Цель исследования состоит также в обосновании структуры системы автоматического регулирования для электропривода с импульсным регулированием.

На основе этого будут выполнены технико-экономические расчеты и обоснованы рекомендации по практическому использованию тяговых электроприводов с импульсным регулированием. Эти рекомендации будут сформулированы для ЭПС постоянного тока пригородного сообщения, метро и наземного электротранспорта.

Глава 2. Модель тягового электродвигателя для расчета систем импульсного регулирования

2. 1. Аппроксимация нелинейностей тягового двигателя для выполнения расчетов систем импульсного регулирования

Все характеристики тягового двигателя постоянного тока при последовательном, независимом или смешанном возбуждении нелинейны. Это объясняется нелинейностью характеристики намагничивания $c\Phi(I_B)$, причем эту нелинейность необходимо при решении всех задач по регулированию тяговых электроприводов аппроксимировать, т. е. представить удобными для выполнения расчетов аналитическими выражениями. Эта проблема многократно рассмотрена в специальной литературе, так что все способы аппроксимации можно классифицировать согласно в таблице 2. 1.

Кусочно-линейная аппроксимация по способу 1 является наиболее простой; при этом кривая $c\Phi(I)$ представляется двумя прямолинейными отрезками Oa и ab , которые пересекаются в зоне насыщения магнитной (рисунок. 2. 1). Недостаток способа 1 состоит в том, что в нем не учитывается колено перегиба, т. е. плавный переход от Oa к ab .

Этот недостаток устранен в способе 2, когда указанное колено перегиба аппроксимируют дугой окружности D . Ее центр находится в точке Π , сопряженной с прямыми Oa и ab в точках c и d . Конечно, этот способ позволяет исключить ошибку при переходе от ненасыщенной части I магнитной характеристики к насыщенной ее части II . Но для практического использования он слишком сложен, даже в условиях компьютерного моделирования.

Таблица 2. 1. Способы аппроксимации магнитной характеристики $c\Phi(I)$

Аппроксимация характеристики $c\Phi(I)$		
1. Кусочно-линейная аппроксимация (двумя прямыми)	2. Смешанная кусочная линейно - нелинейная аппроксимация (два прямолинейных отрезка, сопрягаемых дугой окружности)	3. Аппроксимация всей характеристики одним аналитическим выражением (arctg или гипербола)

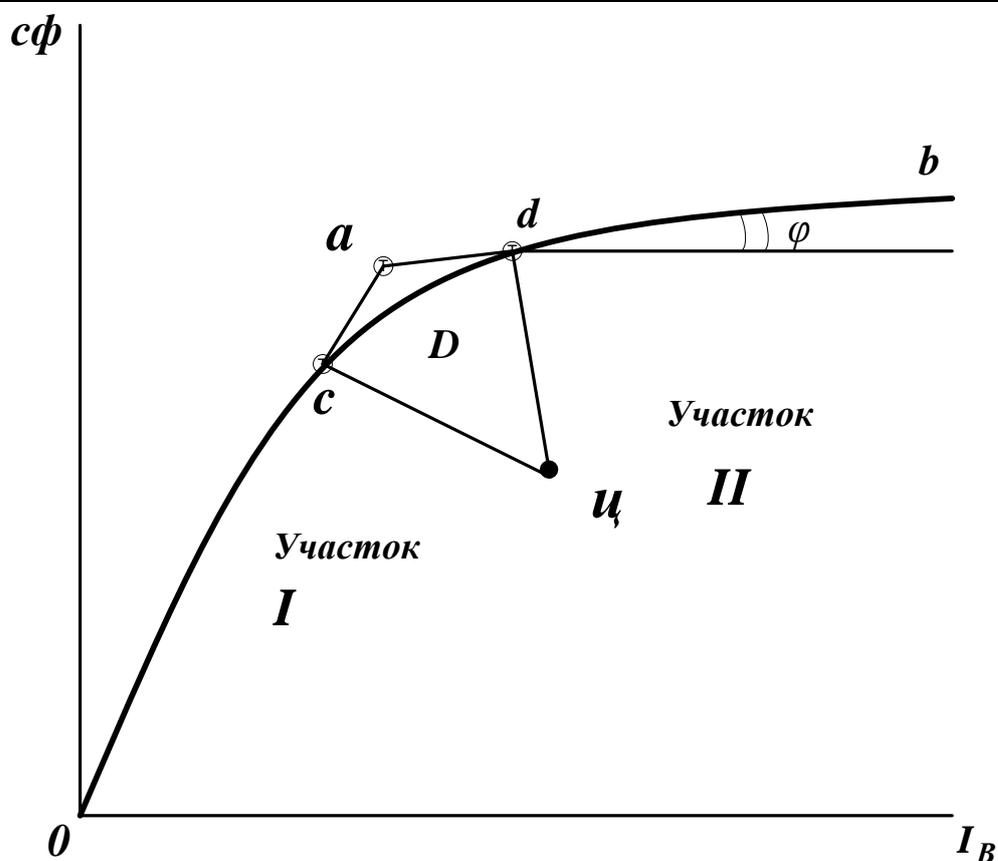


Рисунок. 2. 1. Пояснение к аппроксимации магнитной характеристики

В этих условиях существенными преимуществами обладает способ 3, который можно назвать интегральной аппроксимацией, потому что вся характеристика $c\Phi(I)$ может быть представлена одним аналитическим выражением. Из многочисленных предложений и рекомендаций по этому поводу целесообразно выделить следующие:

1) аппроксимация арктангенциальной функцией

$$c\Phi(I) = c_1 \operatorname{arctg}(c_2 I_B), \quad (2.1)$$

которая предложена профессором Архангельским А. В. и уточнена профессором Исаевым И. П.

2) аппроксимация гиперболической функцией вида

$$c\Phi = \frac{I}{AI + B}, \quad (2.2)$$

что обосновано профессором Йенского университета (Германия) Е. Филипповым, причем большинство исследователей считают целесообразной именно эту форму интегральной аппроксимации, из-за ее простоты и возможности варьировать два параметра A и B .

Применительно к данной диссертационной работе можно сделать следующие выводы по вопросу аппроксимации $c\Phi(I)$:

- если проводится расчет переходного процесса в системе импульсного регулирования при изменении тягового тока от нулевого до максимального значения, т. е. с переходом через зону насыщения, то целесообразно пользоваться гиперболической аппроксимацией по профессору Е. Филиппову, поскольку соответствующее выражение достаточно просто дифференцируется и интегрируется, например при вычислении передаточной функции;
- если решается задача расчета квазистационарного процесса, то обычно соответствующая стабилизация тягового тока в установившемся режиме осуществляется в зоне сильного насыщения магнитной системы тягового двигателя и поэтому можно принять аппроксимацию по прямой db на рисунке 2. 1, т. е. в этом случае можно принять индуктивность цепи тягового двигателя постоянной и равной $L = c(d\phi/dI)$, что соответствует тангенсу угла φ .

Магнитный поток двигателя существенно влияет на индуктивность цепи двигателя. Это влияние в переходных режимах, а также при пульсирующем токе связано с действием вихревых токов. Такой эффект требует специального анализа, что выполнено в классических работах по тяговым электродвигателям постоянного тока (Алексеев А. Е., Находкин М. Д., Захарченко Д. Д., Ротанов Н. А., Горчаков Е. В., Винокуров В. А., Жиц М. З. и др.) и обобщено в разделе 2. 3.

2. 2. Обобщенная модель тягового электродвигателя постоянного тока

Современный электрический тяговый подвижной состав выполняют с двухконтурной системой авторегулирования. Она обеспечивает стабилизацию тока i тягового электродвигателя ($TЭД$) во внутреннем контуре и стабилизацию скорости поезда V во внешнем контуре. На рисунке 2.2, а показан контур стабилизации тока на заданном уровне (I_3). В его состав входят:

- $TЭД$ с якорной обмоткой $Я$ и обмоткой возбуждения $ОВ$;
- силовые исполнительные элементы: импульсный преобразователь $ИП$ с входным LC -фильтром и преобразователь β для ослабления возбуждения;
- типовые слаботочные микросхемы: элемент сравнения $ЭС$ и пропорционально-интегральный регулятор $ПИР$;
- обратная связь $ОС$ с датчиком тока $ДТ$.

В этом контуре реализуется двухзонное регулирование тока i , обычно по принципу его стабилизации (рисунок 2. 2, б), т.е. $i = const$ за исключением начального участка при трогании поезда с постепенным нарастанием i от момента включения $TЭД$. Тогда при $t = 0$ имеем $i = i_0$ естественным образом и далее осуществляется переход к режиму стабилизации $i = I_3$.

ТЭД является электрической машиной предельного исполнения по габаритам размещения и по электрическим нагрузкам. Поэтому весьма важно исключение нештатных режимов в процессе регулирования при всех внешних возмущениях. Для расчета контура стабилизации тока по рисунку 2.2, а. необходимо представить *ТЭД* как звено типовой замкнутой системы авторегулирования по отклонению. Это звено с точки зрения классической теории автоматики представляет собой нелинейное интегрирующее звено с двумя входными величинами ($U = U_1 k$ и β) и с выходной величиной – ток i . Здесь k - коэффициент заполнения *ИП* ($0 \leq k \leq 1$), β – коэффициент ослабления возбуждения *ТЭД*.

Для построения расчетной модели этого звена целесообразно воспользоваться представлением магнитной характеристики *ТЭД* в аналитической форме, называемой также формулой Фролиша:

$$c\phi = \frac{\beta i}{A\beta i + B}, \quad (2.3)$$

где ϕ – магнитный поток;

c – постоянная;

A, B – коэффициенты аппроксимации, которая выполняется методом выравнивания .

Подставив (2.3) в уравнение электрического равновесия *ТЭД*

$$i = \frac{u - c\phi n}{r}, \quad (2.4)$$

где r – сопротивление обмоток;

n – частота вращения;

$c\phi n$ – э. д. с. *ТЭД*;

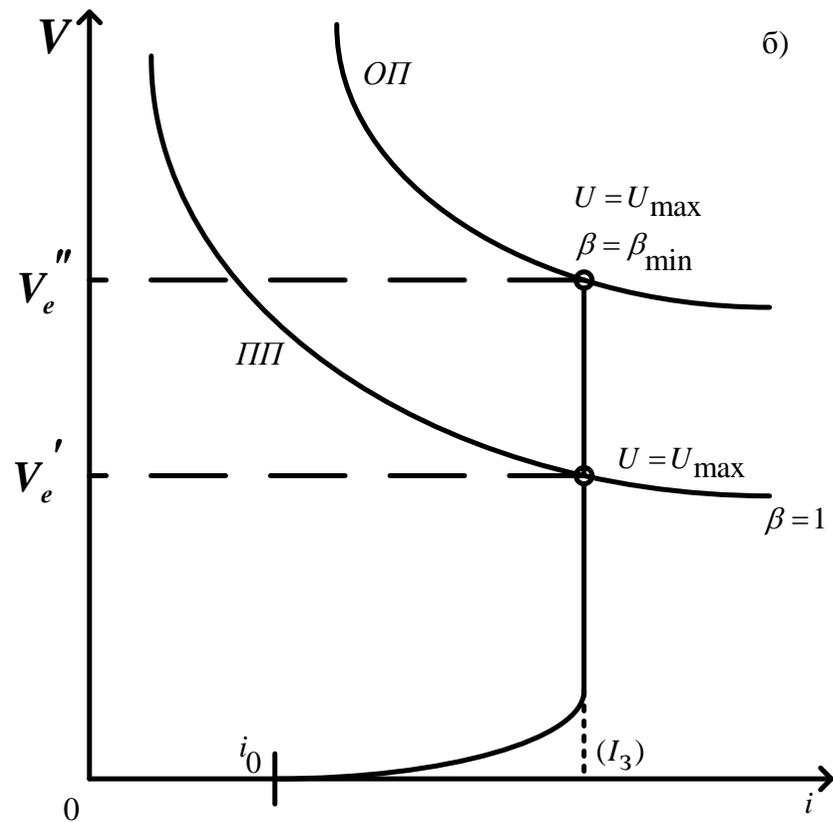
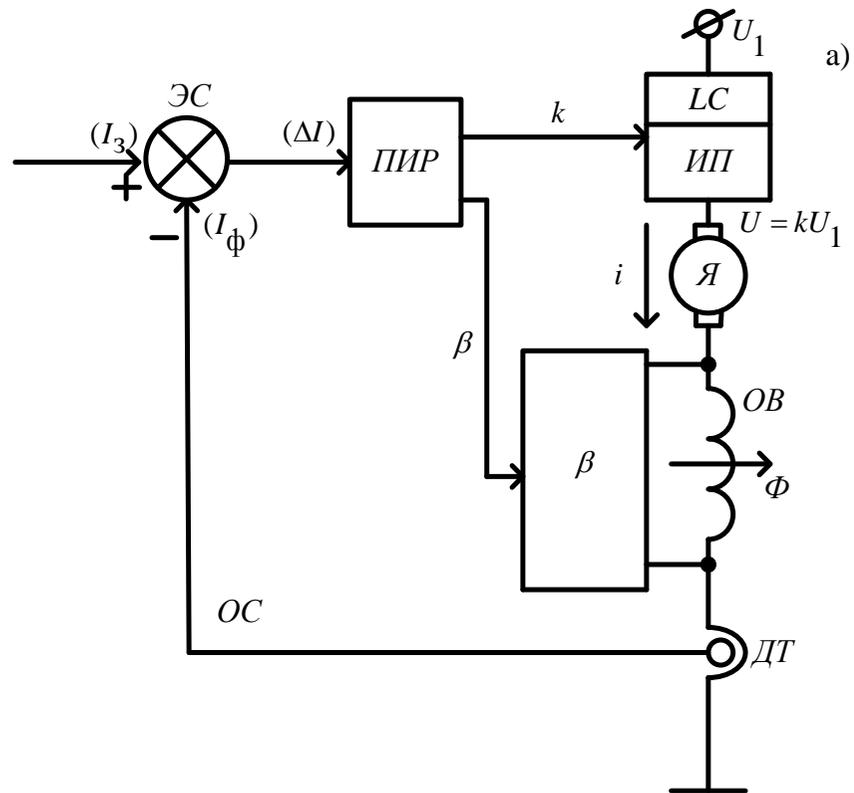


Рисунок. 2. 2. Функциональная схема регулирования тока ТЭД (а) и диаграмма ее работы (б)

Получим выражение для регулируемой величины, а точнее аналитическую запись статической характеристики регулирования двигателя в неявном виде

$$i = \frac{u}{r} - \frac{\beta n}{(A\beta i + B)r}. \quad (2.5)$$

Переходя к явной форме записи функции $i = i(u, \beta)$ и решая полученное квадратное алгебраическое уравнение, будем иметь выражение

$$i = \frac{Br + \beta(n - Au) \pm \sqrt{[Br + \beta(n - Au)]^2 + 4A\beta ruB}}{2A\beta r}, \quad (2.6)$$

где аргументами являются u при $n < n_e$ и β при $n > n_e$ (n_e – частота вращения, соответствующая точке выхода на естественную характеристику полного поля).

Выражения для коэффициентов усиления рассматриваемого звена можно получить дифференцированием (2.6) отдельно по u и по β .

Однако, соответствующие частные производные проще найти дифференцированием (2.5) как неявной функции. В результате для коэффициента усиления в зоне регулирования по напряжению будем иметь:

$$k_u = \frac{\partial i}{\partial u} = \left[r + \frac{nB\beta}{(A\beta i + B)^2} \right]^{-1}, \quad (2.7)$$

и в зоне регулирования поля –

$$k_\beta = \frac{\partial i}{\partial \beta} = -i \frac{(iA\beta + B)^2 \frac{dr}{d\beta} + Bn}{(iA\beta + B)^2 r + Bn\beta}, \quad (2.8)$$

Причем, поскольку обычно $\frac{dr}{d\beta} = r_B$, то:

$$k_\beta = -i \frac{(iA\beta + B)^2 r_B + Bn}{(iA\beta + B)^2 r + Bn\beta}. \quad (2.9)$$

Полученные выражения (2.7) и (2.9) могут быть использованы для записи линеаризованной модели тягового двигателя в виде передаточной функции. При практических расчетах целесообразно по этим выражениям предварительно рассчитать и построить графически все поле возможных значений k_u и k_β . По этим графикам для конкретных значений параметров, характеризующих рабочую точку двигателя, принимают соответствующие постоянные значения коэффициентов k_u и k_β . При этом вводим допущение, что регулирование осуществляется в зоне небольших изменений i .

Простейшая линеаризованная модель тягового двигателя получается на основе введенных коэффициентов, если считать его инерционным звеном первого порядка, описываемым дифференциальным уравнением:

$$ir + \frac{d\psi(i)}{dt} = u - c\phi(i)n, \quad (2.10)$$

где ψ – потокосцепление.

Зависимости $c\phi(i)$ и $\psi(i)$ существенно нелинейны, причем:

$$\frac{d\psi(i)}{dt} = \frac{d}{dt}[iL(i)] = \left[L(i) + i \frac{dL(i)}{di} \right] \frac{di}{dt} = L^*(i) \frac{di}{dt}, \quad (2.11)$$

где $L(i), \psi(i)$ – динамическая индуктивность и потокосцепление тягового двигателя.

Однако, при исследовании устойчивости систем регулирования «в малом», т.е. при небольшом диапазоне изменения i допустима линеаризация этих зависимостей, что позволяет на основе классической теории авторегулирования ввести для двигателя передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{k_{u,\beta}}{T_p + 1}, \quad (2.12)$$

$$T = \frac{L^*}{\frac{nB\beta}{(A\beta i + B)^2} + r}, \quad (2.13)$$

т.е. постоянная времени T также существенно зависит от n, i, β , как коэффициенты усиления (2. 7) и (2. 9).

Рассмотренной простейшей модели соответствует обобщенная структурная схема тягового двигателя последовательного возбуждения по рисунку 2. 3, *а*. Аналогичным образом может быть получена структурная схема $TЭД$ в режиме независимого возбуждения (рисунок 2. 3, *б*). Этими схемами удобно пользоваться при моделировании процессов пуска и электрического торможения $TЭД$ в составе регулятора по рисунку 2. 2, *а*. При этом может быть учтено действие всех возмущений, например по напряжению тяговой сети.

Эта методика позволяет выполнить расчет контура регулирования тока по рисунку 2. 2, *а*, т. е. определить параметры основного звена в этом контуре, т.е. $ПИР$. Этот расчет выполняется по критерию исключения колебаний при переходных процессах. Любой переходный процесс, например при скачкообразном изменении U или (I_s) должен соответствовать экспоненте $i(t)$, что исключает ударные нагрузки в тяговом электроприводе.

При моделировании тягового электропривода в случае небольших изменений тока i вполне возможно непосредственное использование аналитических выражений (2.12) и (2.13) при подстановке в них конкретных значений параметров, характеризующих рабочую точку. Конкретно в качестве примера для $TЭД$ типа ДК-106 рассчитаны значения k_u и k_β ; они показаны на рисунке 2.4.

Аналогичным образом можно усовершенствовать структурную схему по рисунку 2. 3, *а* для учета вихревых токов по схеме замещения $TЭД$ (рисунок. 2. 5, *а*). Эта структурная схема показана на рисунке 2. 5, *б*.

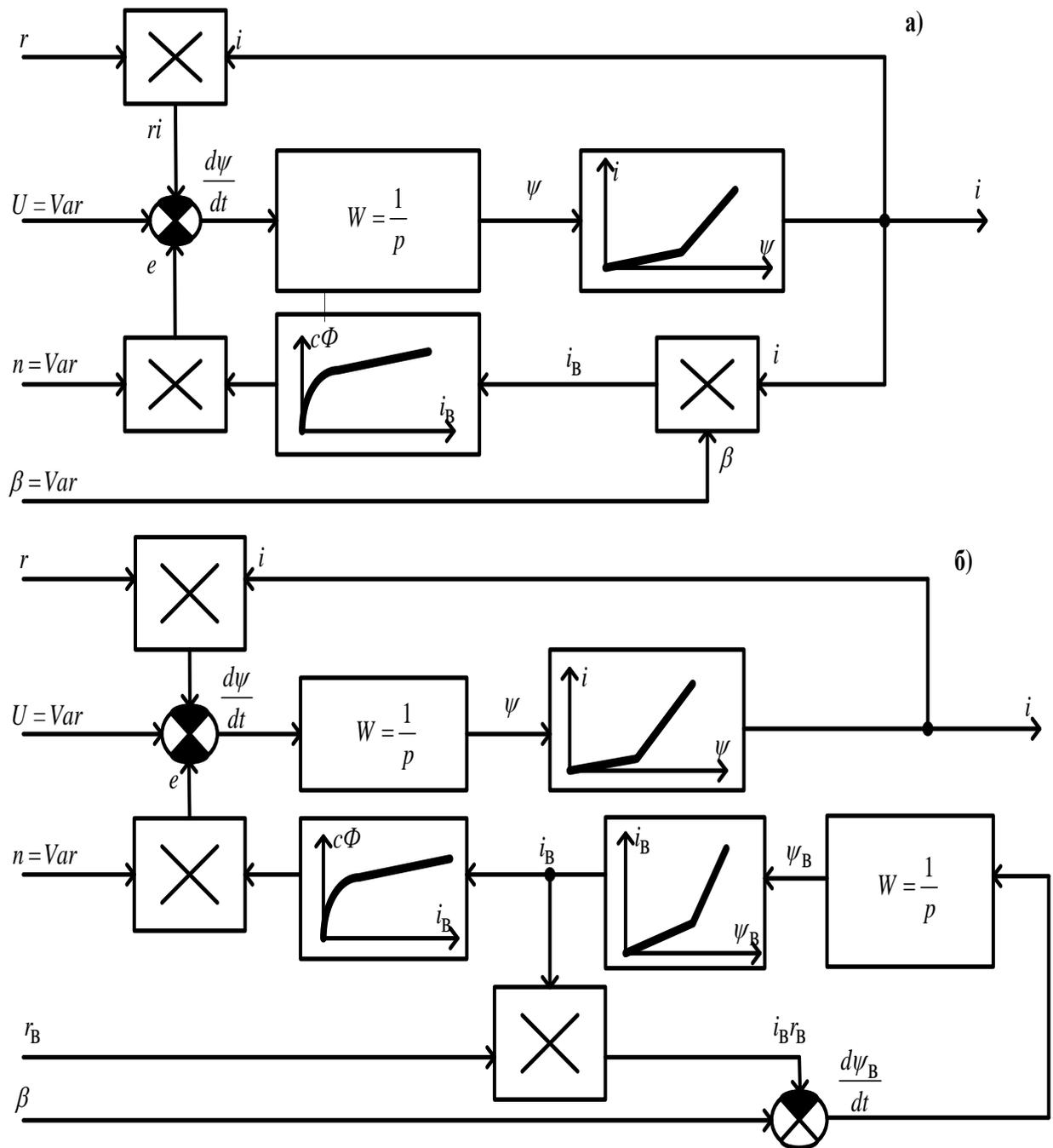


Рисунок. 2. 3. Структурная схема тягового электродвигателя как элемента

САР; а – при последовательном возбуждении,

б – при независимом возбуждении

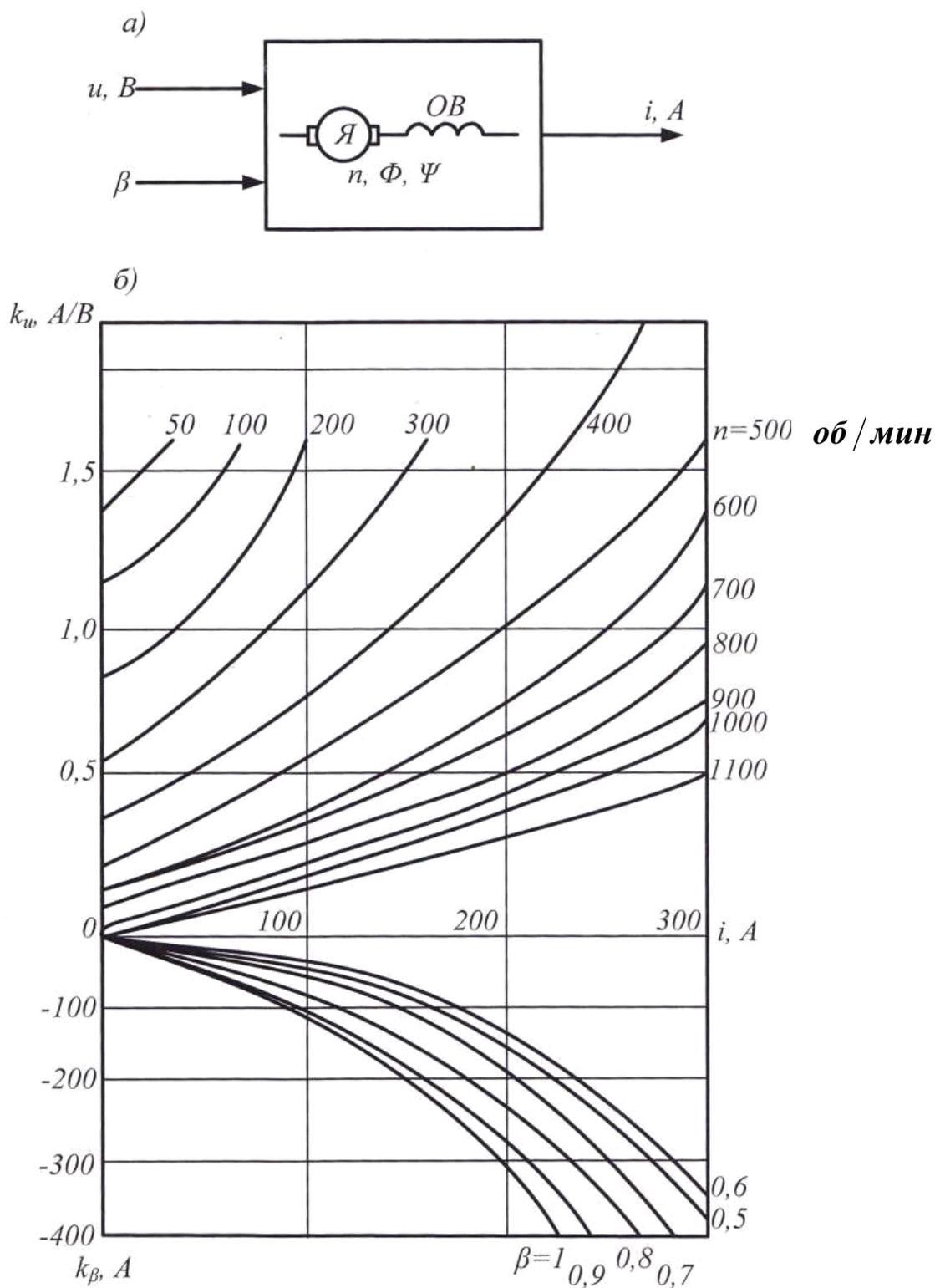


Рисунок. 2. 4. Тяговый двигатель типа ДК-106 (а) и характеристики его коэффициентов усиления (б) для разных частот вращения n и разных значений коэффициентов ослабления возбуждения β

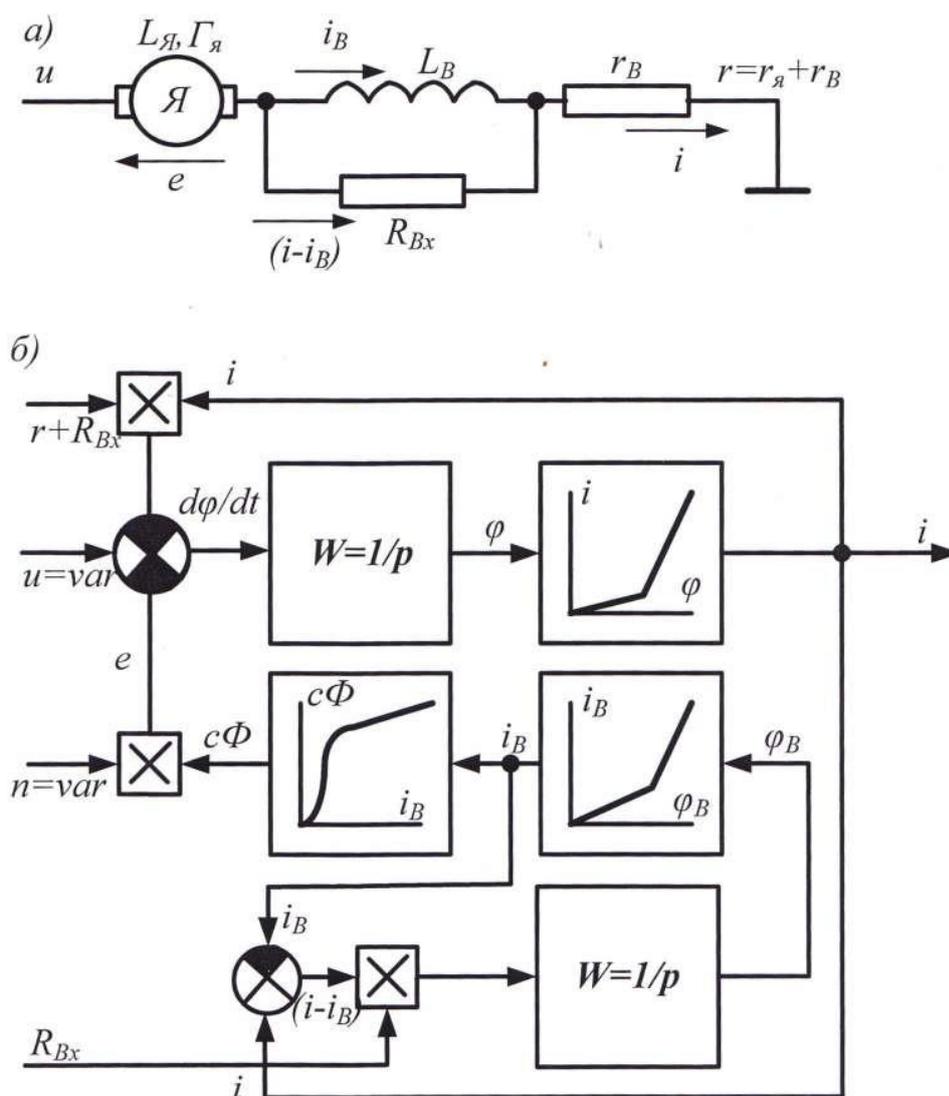


Рисунок. 2. 5. Упрощенная схема замещения тягового электродвигателя при учете вихревых токов (а) и соответствующая ей структурная схема (б)

2. 3. Эквивалентная схема замещения тягового электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения для расчета электромагнитных процессов при импульсном регулировании

Тяговый электродвигатель (ТЭД) постоянного тока представляет сложную нелинейную систему, электромагнитные параметры которой имеют существенное значение при анализе систем автоматики, а также при расчете пульсационных режимов. В данной диссертации процесс авторегулирования ТЭД и импульсного преобразования энергии в цепи электропитания

рассматриваются совместно, что требует детального учета параметров двигателя, особенно при быстродействующих процессах. Известна формула для расчета амплитуды пульсаций тока в цепи двигателя

$$\Delta I = \frac{U\gamma(1+\gamma)}{Lf}, \quad (2.14)$$

где U – постоянное напряжение источника электропитания;

f, γ – частота и коэффициент заполнения импульсного преобразователя ($\gamma = 0 \div 1$);

L – индуктивность цепи ТЭД, включая сглаживающий реактор.

Выражение (2.14) имеет максимум при $\gamma = 0,5$

$$\Delta I_{max} = \frac{U}{4Lf}, \quad (2.15)$$

но эти выражения требуют более детального рассмотрения индуктивности L с целью учета вихревых токов и насыщения магнитной системы ТЭД. Ниже рассмотрены эти особенности.

Цепь ТЭД может быть заменена в импульсном режиме электропитания схемой замещения, изображенной на рисунке 2. 6, а. Здесь S – ключ, имитирующий полупроводниковый коммутатор; R_0 – активное сопротивление цепи обмоток; L_0 – суммарная индуктивность обмоток этой цепи, определяемая магнитными потоками рассеяния остова и якоря тягового двигателя; L_μ – магнитная индуктивность системы главных полюсов; $R_{вк}$ – приведенное сопротивление условного вихретокового контура массивных частей ТЭД; e – мгновенное значение ЭДС якорной обмотки; i_μ – намагничивающий ток; $i_{вк}$ – приведенный вихревой ток в условном контуре с $R_{вк}$.

Индуктивность цепи ТЭД при расчетах систем импульсного регулирования, т. е. при $f \geq 400 \text{ Гц}$, должна быть уменьшена за счет шунтирующего действия сопротивления вихретокового контура. Активные пульсационные потери мощности при этом определяются как пульсацией тока i_n в цепи сопротивления R_0 , так и действующим значением приведенного вихревого тока в цепи условного сопротивления $R_{вк}$

$$\Delta P_n = I_{вк}^2 R_{вк} + \frac{1}{T} \int_0^T i_n^2 R_0 dt - I_n^2 R_0, \quad (2.16)$$

где $I_{вк}$ – действующее значение приведенного вихревого тока;

$T = 1/f$ – период переключений коммутатора S .

В схеме замещения основная часть переменной составляющей тока i_n замыкается через условное сопротивление $R_{вк}$. Поэтому амплитуда переменной составляющей i_μ тока невелика (рисунок. 2. 6, б). Поскольку среднее значение напряжения на индуктивности L_μ равно нулю, то и среднее значение вихревого тока за каждый период T тоже равно нулю, т.е. вихревой ток протекает в двух направлениях: $i_{вк} > 0$ и $i_{вк} < 0$.

Как видно, в демпфировании пульсаций тока i_n из-за $R_{вк}$ участвует только часть индуктивности L_μ . При этом эффективность демпфирующего действия зависит от сопротивления $R_{вк}$, соотношения L_0/L_μ и от частоты f . С целью определения эффективности демпфирующего действия вихревых токов следует рассчитать в схеме (рисунок. 2. 6, а) квазистационарный электромагнитный процесс при $f = \text{const}$ и $\gamma = \text{const}$.

Электромагнитный процесс в данной схеме рассматривается при следующих допущениях:

- Принимаем мгновенное значение противо-ЭДС e ТЭД равным его среднему значению E . Такое допущение возможно с учетом небольшого диапазона пульсации намагничивающего тока i_μ , определяющего значения ЭДС, а также с учетом сглаживающего действия вихревых токов.
- Принимаем все параметры элементов схемы замещения неизменными в течение периода переключений T .
- Поскольку падение напряжения на активном сопротивлении R_0 весьма мало, заменяем его постоянной величиной $I_n R_0$.

Последнее допущение вполне возможно при определении эквивалентной индуктивности, т.е. для учета демпфирующего действия на L_μ . Однако при расчете пульсационных потерь энергии в ТЭД такое допущение вызывает погрешность, поскольку не учитывается влияние R_0 на характер изменения тока i_n в течение времени его нарастания или спада.

Электромагнитный процесс при этом описывается следующими дифференциальными уравнениями:

– для интервала времени $0 < t < \gamma T$ (интервал A на рисунок. 2.6, б)

$$U_1 = L_0 \frac{di_{nA}}{dt} + L_\mu \frac{di_{\mu A}}{dt} + i_{nA} R_0 + E ; \quad (2.17)$$

$$i_{nA} = i_{вкA} + i_{\mu A} ; \quad (2.18)$$

$$L_\mu \frac{di_{\mu A}}{dt} = i_{вкA} R_{вк} ; \quad (2.19)$$

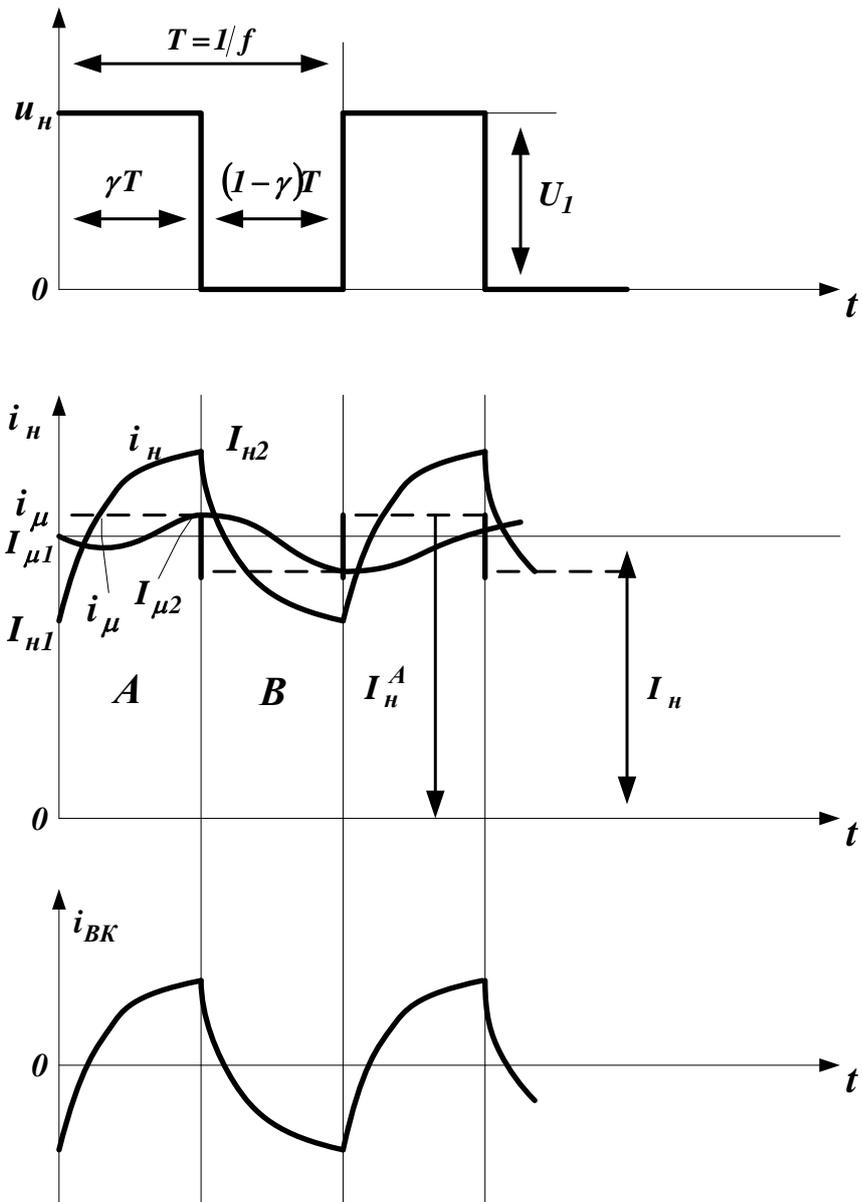
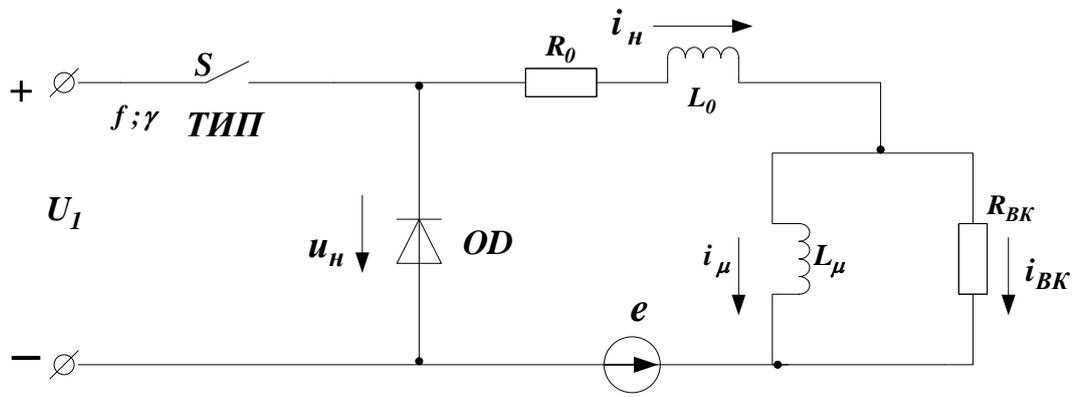


Рисунок. 2. 6. Схема замещения тягового двигателя в системе импульсного регулирования (а) и диаграммы напряжений и токов (б)

– для интервала времени $\gamma T \leq t \leq T$ (интервал *B*)

$$L_0 \frac{di_{нB}}{dt} + L_\mu \frac{di_{\mu B}}{dt} + i_{нB} R_0 + E = 0 ; \quad (2.20)$$

$$i_{нB} = i_{вкB} + i_{\mu B} ; \quad (2.21)$$

$$L_\mu \frac{di_{\mu B}}{dt} = i_{вкB} R_{вк} . \quad (2.22)$$

Решение этих уравнений с учетом начальных условий в обоих интервалах времени (рисунок. 2. 6, б) имеет следующий вид:

При $0 \leq t \leq \gamma T$ (интервал *A*) имеем

$$i_{\mu A} = I_{\mu 1} + \frac{U_1(1-\gamma)}{L_0 + L_\mu} t - (1 - e^{rt}) \frac{U_1(1-\gamma)\tau_B L_0 - L_0(L_0 + L_\mu)(I_{н1} - I_{\mu 1})}{(L_0 + L_\mu)^2} ; \quad (2.23)$$

$$i_{нA} = I_{\mu 1} + \frac{U_1(1-\gamma)}{L_0 + L_\mu} t - (1 - e^{rt}) \frac{U_1(1-\gamma)L_\mu\tau_B}{(L_0 + L_\mu)^2} + (I_{н1} - I_{\mu 1}) \frac{L_\mu e^{rt} + L_0}{L_\mu + L_0} ; \quad (2.24)$$

$$i_{вкA} = \frac{U_1(1-\gamma)\tau_B}{L_0 + L_\mu} (1 - e^{rt}) + (I_{н1} - I_{\mu 1}) e^{rt} ; \quad (2.25)$$

При $\gamma T \leq t \leq T$ (интервал *B*) имеем

$$i_{\mu B} = I_{\mu 2} - \frac{\gamma U_1}{L_0 + L_\mu} (t - \gamma T) + [1 - e^{r(t-\gamma T)}] \times \\ \times \frac{\gamma U_1 \tau_B L_0 + L_0(L_0 + L_\mu)(I_{н2} - I_{\mu 2})}{(L_0 + L_\mu)^2} ; \quad (2.26)$$

$$i_{нB} = I_{\mu 2} - \frac{\gamma U_1}{L_0 + L_\mu} (t - \gamma T) + \frac{\gamma U_1 \tau_B L_\mu}{(L_0 + L_\mu)^2} \times \\ \times [1 - e^{r(t-\gamma T)}] + (I_{н2} - I_{\mu 2}) \frac{L_0 + L_\mu e^{r(t-\gamma T)}}{L_0 + L_\mu} ; \quad (2.27)$$

$$i_{\text{вкВ}} = -\frac{\gamma U_1 \tau_B}{L_0 + L_\mu} (1 - e^{r(t-\gamma T)}) + (I_{\mu 2} - I_{\mu 2}) e^{r(t-\gamma T)}. \quad (2.28)$$

В этих выражениях введены обозначения

$$\tau_B = -\frac{L_\mu}{R_{\text{вк}}}; \quad (2.29)$$

$$r = -\frac{L_0 + L_\mu}{L_0 \tau_B}. \quad (2.30)$$

Как очевидно из приведенных формул, действие вихревых токов выражается в отставании по фазе изменений тока i_μ (соответственно магнитного потока ТЭД) от изменений тока i_n согласно выражению

$$i_n = i_\mu + \tau_B \frac{di_\mu}{dt}, \quad (2.31)$$

полученному из приведенных выше уравнений (2.18) и (2.19).

Так, при включении коммутатора S в начальной момент $i_n < i_\mu$ намагничивающий ток продолжает убывать ($di_\mu/dt < 0$). В момент выключения коммутатора $i_n > i_\mu$ намагничивающий ток продолжает возрастать ($di_\mu/dt > 0$). При экстремальных значениях намагничивающего тока ($di_\mu/dt = 0$) токи i_n и $i_{\text{вк}}$ равны (рисунок. 2. 6, б).

В начальный момент включения коммутатора S вихревой ток имеет отрицательный знак; поэтому падение напряжения $R_{\text{вк}}$ способствует ускоренному росту тока нагрузки. После изменения полярности тока $i_{\text{вк}}$ падение напряжения на $R_{\text{вк}}$ также меняет знак и препятствует росту тока i_n .

Таким образом, в начале включенного состояния коммутатора S ток i_n возрастает ускоренно, а впоследствии - замедленно. При выключенном

состоянии коммутатора ток i_n вначале убывает ускоренно, а потом скорость убывания уменьшается (рисунок. 2. 6, б). Как видно из выражений (2.24) и (2.27), ток i_n не изменяется по чисто экспоненциальному закону в импульсе и паузе, как это условно принято во многих исследованиях.

Пульсации тока тягового двигателя в общем случае при известной эквивалентной индуктивности L_0 цепи двигателя могут быть определены по выражению (2.14). Однако из-за действия вихревых токов значение L_n может изменяться в сравнительно широком диапазоне в зависимости от частоты f и среднего значения тока I_n . Поэтому найдем выражение для определения ΔI_n по эквивалентной схеме замещения (рисунок. 2. 6, а) и сравнением полученного значения ΔI_n с определенным по выражению (2.14) найдем L_n как функцию параметров L_0 , L_μ , $R_{вк}$ и f .

Полный размах пульсации ΔI_n может быть определен из выражения (2.17) интегрированием в пределах интервала A , т. е. $t = 0 \dots \gamma T$ с учетом того, что при $t = 0$, $i_n = I_{n1}$, $i_\mu = I_{\mu1}$. Поэтому для интервала A имеем

$$L_0 \Delta I_n + I_n^A R_0 \gamma T + L_\mu (I_{\mu2} - I_{\mu1}) = \gamma T (U_1 - E). \quad (2.32)$$

где I_n^A – среднее значение тока i_n в интервале времени $0 \leq t \leq \gamma T$ (интервал A). Оно определяется как

$$I_n^A = \frac{1}{\gamma T} \int_0^{\gamma T} i_{nA} dt. \quad (2.33)$$

Из анализа выражения (2.32), учитывая, что составляющая $I_n^A R_0 \gamma T$ незначительно влияет на соотношения других членов этого выражения, может быть принято допущение $I_n^A R_0 \gamma T \approx I_n R_0 \gamma T$, откуда следует, что $U_1 - E - I_n R_0 = U_1 (1 - \gamma)$, получаем

$$\Delta I_n = \frac{U_1 \gamma (1 - \gamma) T - L_\mu (I_{\mu 2} - I_{\mu 1})}{L_0}, \quad (2.34)$$

или

$$\Delta I_n = \frac{U_1 \gamma (1 - \gamma) T}{L_0 + L_\mu \frac{I_{\mu 2} - I_{\mu 1}}{\Delta I_n}}. \quad (2.35)$$

Как видно, степень влияния индуктивности L_μ на значение эквивалентной индуктивности цепи двигателя зависит от соотношения $(I_{\mu 2} - I_{\mu 1}) / \Delta I_n$ которое можно назвать коэффициентом демпфирования намагничивающего тока

$$k_D = \frac{I_{\mu 2} - I_{\mu 1}}{\Delta I_n}, \quad (2.36)$$

и тогда

$$L_n = L_0 + k_D L_\mu. \quad (2.37)$$

Решая совместно выражения (2.23) и (2.26), получаем

$$I_{\mu 2} - I_{\mu 1} = \frac{U_1 \gamma (1 - \gamma) T (2 - e^a - e^b) - \tau_B U_1 \frac{L_0}{L_0 + L_\mu} (1 - e^a) (1 - e^b)}{(L_0 + L_\mu) (2 - e^a - e^b) - L_0 (1 - e^a) (1 - e^b)} - \frac{\Delta I_n L_0 (1 - e^a) (1 - e^b)}{(L_0 + L_\mu) (2 - e^a - e^b) - L_0 (1 - e^a) (1 - e^b)}, \quad (2.38)$$

где

$$a = r \gamma T; \quad (2.39)$$

$$b = r (1 - \gamma) T. \quad (2.40)$$

Подставляя выражение (2.38) в (2.34), находим

$$\Delta I_{\mu} = \frac{U_1 \gamma (1 - \gamma) \Gamma}{L_0 + L_{\mu}} + \tau_B \frac{U_1 L_{\mu} (1 - e^a) (1 - e^b)}{(L_0 + L_{\mu})^2 (1 - e^{\delta})}, \quad (2.41)$$

где $\delta = rT$.

Тогда коэффициент демпфирования намагничивающего тока равен

$$k_D = \frac{\gamma (1 - \gamma) \Gamma (L_0 + L_{\mu}) (1 - e^{\delta}) - \tau_B L_0 (1 - e^a) (1 - e^b)}{\gamma (1 - \gamma) \Gamma (L_0 + L_{\mu}) (1 - e^{\delta}) + \tau_B L_{\mu} (1 - e^a) (1 - e^b)}. \quad (2.42)$$

Значение k_D зависит от постоянной времени τ_B вихревого контура, соотношения L_0/L_{μ} , относительной продолжительности включения и частоты переключений f коммутатора S .

Как показали расчеты, зависимость k_D от γ незначительна, поэтому приближенно можно считать k_D не зависящим от γ . На рисунке 2. 7. изображены рассчитанные по выражению (2.42) зависимости $k_D = \varphi(f)$ при $\gamma = 0,5$ и при различных значениях соотношения L_0/L_{μ} . Расшифровка обозначений дана в таблице 2. 2. Как видно, при увеличении частоты f значения k_D существенно уменьшаются, причем они меньше для больших значений $\tau_B = L_{\mu}/R_{вк}$ и соотношений L_0/L_{μ} .

Таким образом, в большинстве случаев имеет $\tau_B \approx 0,005$ с и уже при $f = 400$ Гц в демпфировании пульсации тока нагрузки участвует только малая часть индуктивности L_{μ} , т. е. индуктивность цепи ТЭД становится примерно равной индуктивности L_0 . Особенно это явно выражено при токах тягового двигателя, равных пусковым значениям, когда магнитная система максимально насыщена и значение L_0 мало.

Таблица 2. 2. Расшифровка расчётных зависимостей по рисунку. 2. 7

Варианты постоянной времени контура вихревых токов τ_B		Варианты соотношения L_0/L_μ	
Семейство кривых $k_D = \varphi(f)$	$\tau_B, мс$	Кривая в каждом семействе $k_D = \varphi(f)$	L_0/L_μ
I	1	1	0,2
II	2	2	0,3
III	3	3	0,4
IV	5	4	0,5
V	10	5	0,6

В перспективе при переходе на силовые транзисторы *IGBT* возможно повышение рабочей частоты ключа *S* до **2-3 кГц**, что также свидетельствует в пользу упрощенной схемы замещения, в которой действие вихревых токов в *ТЭД* целесообразно учесть уменьшением индуктивности L_μ по рисунку 2. 6, что достаточно просто выполнить опытным путем. Из упрощенной схемы замещения исключаем $R_{вк}$ и в качестве компенсации уменьшаем L_μ , принимая общую индуктивность цепи тягового двигателя по формуле (2. 37), а коэффициент демпфирования нужно принимать по рисунку 2. 7. С увеличением частоты f свыше **500 Гц** коэффициент демпфирования снижается, но экспериментальные данные отсутствуют.

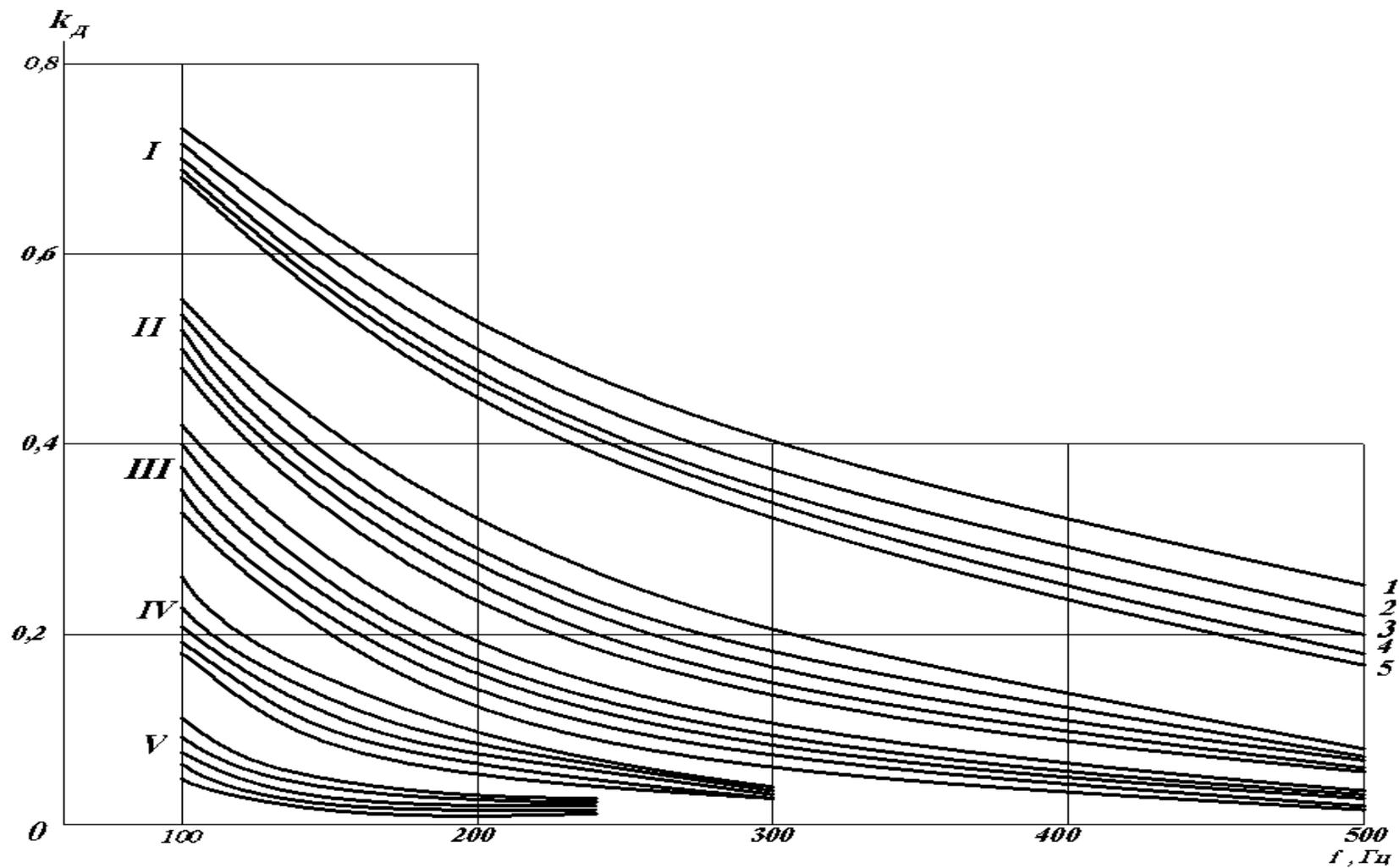


Рисунок. 2. 7. Расчетные зависимости коэффициента демпфирования намагничивающего тока при $\gamma=0,5$

Глава 3. Развитие систем импульсного регулирования электродвигателей постоянного тока

3. 1. Регулировочные возможности коллекторных электродвигателей постоянного тока и развитие систем импульсного регулирования

Электродвигатели постоянного тока весьма распространены, особенно в электрической тяге, но не везде они могут быть заменены более простыми асинхронными машинами или такая замена приводит к сложной электромеханической системе. Следует учесть, что возможности регулирования двигателя постоянного тока при питании от нерегулируемого источника постоянного напряжения весьма ограниченные (см. табл. 1.2). Сюда можно отнести:

- 1) Регулирование при помощи резистора реостата, включаемого между источником электропитания и двигателем;
- 2) При наличии нескольких идентичных двигателей или источников возможно их комбинированное включение, т.е. ступенчатое экономичное регулирование напряжения (переключение группировок);
- 3) Широко применяют также регулирование возбуждения, изменяя соотношение токов возбуждения и якоря $\beta = I_B / I_A$.

Такой набор способов регулирования был недостаточным как для маломощных двигателей цепей управления, так и для силовых систем, например для электрической тяги, где массово применяют тяговые двигатели постоянного тока последовательного возбуждения мощностью 100-850 кВт при напряжении 400-1500 В.

Новый способ регулирования – импульсное управление – было предложен и теоретически обоснован академиком Кулебакиным В. С. для двигателей постоянного тока небольшой мощности в системах релейного управления – регулирования. Но быстрое развитие систем импульсного регулирования в последующем было обусловлено двумя факторами:

- 1) Появление серийных полупроводников ключевого типа (силовые транзисторы, тиристоры – на токи 150-200 А).
- 2) Необходимость функционального улучшения тягового-энергетических характеристик электрической тяги постоянного тока (плавное бесконтактное регулирование, рекуперативное торможение).

На основе импульсного регулирования была сделана попытка решения актуальной проблемы повышения напряжения в системе электрической тяги постоянного тока с 3 до 6 **кВ** по токоприемнику ЭПС, т.е. с 3,3 до 6,6 **кВ** по номинальному напряжению на шинах тяговой подстанции. При тех же размерах движения поездов это позволяет снизить потери напряжения в тяговой сети в 2 раза, а потери электроэнергии в 4 раза. Эта работа была начата и завершена созданием опытного участка 6 **кВ** с электровозами ВЛ8В и электропоездами ЭР2В. Автор проекта и руководитель работ – профессор МЭИ, д.т.н. В. Е. Розенфельд. Был использован наиболее простой принцип частотно-импульсного регулирования (*ЧИР*). Коэффициент заполнения импульсного цикла в течение периода $T = \text{var}$ регулируется только частотой

$$k_s = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\tau_u}{T} = \tau_u f < 1 ,$$

где длительность выходного импульса $\tau_u = \text{const}$, $f = 1/T = \text{var}$.

Способ *ЧИР* отличается простотой реализации, но он непригоден для электрической тяги из-за сложности гашения импульсной помехи переменной частоты f в тяговой сети. Поэтому в электрической тяге, включая метро и трамвай, применяют широтно-импульсное регулирование *ШИР*, где коэффициент заполнения регулируется только длительностью импульса τ_u при $f = 1/T = \text{const}$. Этот способ был реализован на электропоездах ЭР2И, ЭМ2И, ЭР200, ЭР12, ЭР30, на вагонах метро Еи, Яуза. Для регулирования реостатного тормоза принцип *ШИР* использован на электровозах ЧС2Т, ЧС6, ЧС7, ЧС200 и вагонах метро типа Е.

Особенностью преобразователей *ЧИР* и *ШИР* на тиристорах является наличие довольно сложных контуров искусственной конденсаторной коммутации, что оказывало существенное влияние на внешние и регулировочные характеристики преобразовательных систем. Поэтому такие преобразователи детально рассмотрены в данной главе применительно к режимам тяги и электрического торможения.

3.2. Обоснование структуры импульсного преобразователя электроэнергии в системе тягового электропривода (тяговый режим)

Принцип действия импульсного преобразования основан на периодическом регулируемом дискретном потреблении энергии нагрузкой от источника электропитания постоянного напряжения. При этом возникают пульсации тока с основной гармоникой f в контактной сети и в цепи тяговых двигателей, в результате может быть частично ограничен управляемый диапазон регулирования и его интенсивность, выходные характеристики могут существенно зависеть от исполнения тиристорного или транзисторного преобразователя. Поэтому в дополнение к ранее упомянутым исходным данным для проектирования должны быть заданы три основных показателя, характеризующих работу импульсных регуляторов: качество потребления энергии из контактной сети, т.е. предельно допустимый уровень пульсаций тока с ограничением частот и амплитуд отдельных гармоник, к. п. д. преобразования электромагнитной энергии, способ импульсного регулирования.

Численно эти показатели качества оцениваются коэффициентом пульсаций тока в контактной сети, коэффициентом пульсаций мгновенных значений тока тяговых двигателей относительно его среднего значения, управляемым диапазоном регулирования коэффициента заполнения ($0 \leq k \leq 1$) и интенсивностью изменения выходного напряжения в зависимости от коэффициента заполнения, т. е. величиной $dU_{\text{вых}}/dk$.

Удовлетворение требований по этим показателям осложняется тем, что все они связаны между собой и зависят от структуры, режима работы и параметров преобразователя *ИПЭ*, источника питания *ИП* (рисунок. 3. 1, а) [контактной сети], нагрузки *H* (тяговых двигателей или их отдельных цепей), если эти цепи питаются от отдельных преобразователей *ИПЭ*.

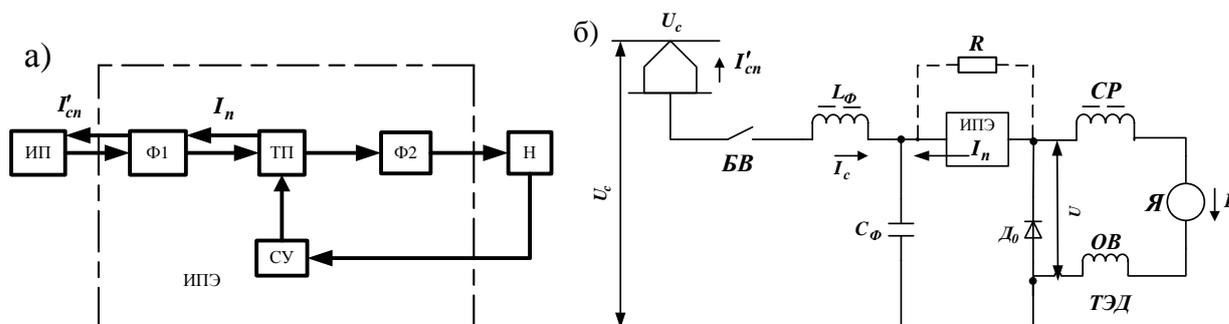


Рисунок.3.1. Функциональная (а) и упрощенная принципиальная (б) схемы импульсного регулятора

По функциональному признаку импульсный преобразователь энергии *ИПЭ* можно подразделить на тиристорный или транзисторный прерыватель *ТП*, входной *Ф1* и выходной *Ф2* фильтры, систему управления *СУ*. Если *ТП* включен параллельно некоторому сопротивлению *R* (рисунок. 3. 1, б), это свидетельствует об импульсном регулировании сопротивления (*ИРС*). Такое регулирование использовано, например, на электропоезде ЭР200. Когда $R = \infty$, имеет место импульсное безреостатное регулирование напряжения (*ИРН*). Под структурой импульсного преобразователя *ИПЭ* понимают его функциональное строение, определяющее порядко-временное соподчинение электромагнитных процессов в отдельных цепях *ИПЭ*, которое обеспечивается соответствующими сигналами управления со стороны *СУ*. В общем случае *ТП* может содержать $N_{\text{зр}}$ групп поочередно включаемых ветвей тиристоров, а фильтр *Ф2* можно выполнить в виде $N_{\text{ф}}$ идентичных фаз, каждая из которых имеет отдельный сглаживающий реактор, охваченный вместе с *ТЭД* обратными диодами. Допустимая нагрузка тиристоров *ТП* определена их номинальными параметрами U_n, I_n , поэтому

в мощных *ТП* каждая группа одновременно включаемых тиристоров может состоять из a_B параллельных цепей по n_B последовательно включенных полупроводниковых приборов в каждой. При этом:

$$a_B = a_D I_{ДР} \kappa_{П} / (N_{зр} I_n) \quad (3.1)$$

$$n_B = 1,1 \kappa_a U_{сн} / U_n + 1, \quad (3.2)$$

где $a_D I_{ДР}$ – нагрузка *ТП* тяговыми двигателями, собранными в a_D параллельных групп, каждая из которых имеет расчетный ток $I_{ДР}$; κ_a – коэффициент амплитуды коммутирующего конденсатора; $\kappa_{П} = 1,05 \div 1,03$ учитывает возможную разницу в нагрузках параллельно включенных тиристоров; $U_{сн}$ – номинальное напряжение контактной сети.

Наиболее целесообразно иметь поочередно включаемые группы тиристоров, не имеющих параллельно включенных вентилях. Отношение $N_T = N_{зр} / N_{\phi}$ определяет тактность импульсного преобразователя *ИПЭ*. На (рисунок. 3. 2, а) приведена в качестве примера такого решения четырехфазная схема, реализованная на электровозе ВЛ8В. Из диаграмм изменения токов в квазиустановившемся режиме, изображенных на рисунок. 3. 2, б и в, видно, что в многотактной системе каждое включение группы тиристоров сопровождается замещением всего тока нагрузки. В отличие от этого в многофазной системе включение группы тиристоров сопровождается замещением только части тока нагрузки, протекающего через соответствующие диоды, подключенные к своему сглаживающему реактору. Поэтому в интервале T_e потребления энергии средний ток через группу тиристоров многотактной I_{Te} и многофазной $I_{\phi e}$ систем соответственно составляет:

$$I_{Te} = I = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}; \text{ (многотактная схема)} \quad (3.3)$$

$$I_{\phi e} = I / N_{\phi}. \text{ (многофазная схема)} \quad (3.4)$$

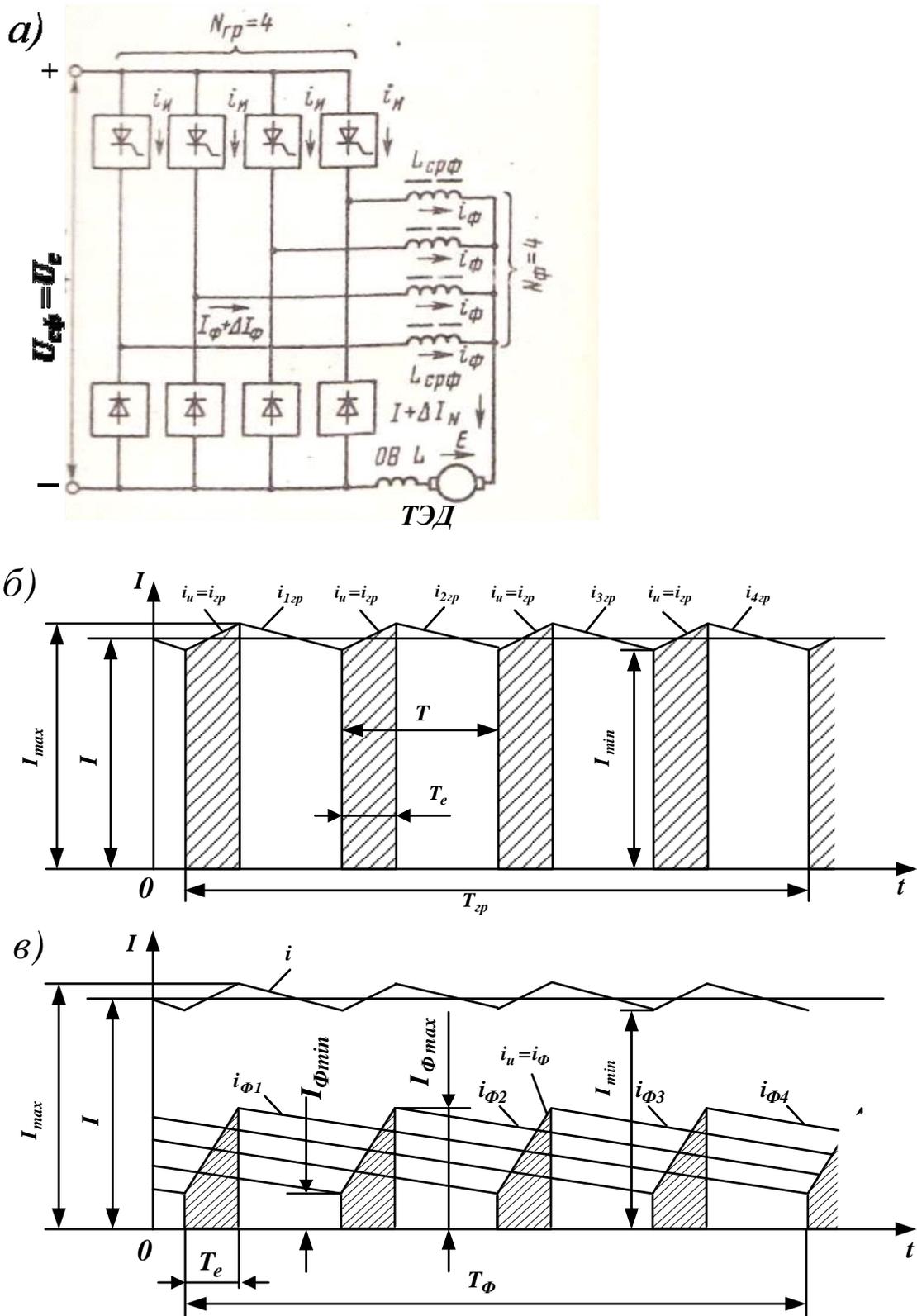


Рисунок. 3. 2. Структура импульсных регуляторов многотактного типа (а) и диаграммы пульсации тока в многотактном (б) и многофазном (в) ТП

Трансформация тока в многофазных ИПЭ при мощных ТЭД способствует снижению массы и габаритных размеров входного и выходного фильтров и обеспечивает лучшие регулировочные свойства. Здесь коэффициент заполнения поочередно включаемых групп тиристоров $\lambda_{\phi} = T_e / T_{\phi}$ (см. рисунок. 3. 2, в), и он в N_T раз меньше, чем $\lambda = T_e / T$ в многотактной системе (см. рисунок. 3. 2, б). Кроме того, в многотактной системе (рисунок. 3. 2, а) включение и выключение тиристоров сопровождается замещением полного тока нагрузки. Поэтому при одинаковых расчетных нагрузках коммутирующая емкость группы тиристоров многотактных систем в N_{ϕ} раз больше, чем в многофазных, и во столько же раз выше производные тока при включении тиристоров. Это является недостатком многотактных схем по сравнению с многофазными. Важно подчеркнуть, что индуктивность реактора фазы $L_{ср\phi}$ может быть принята меньше индуктивности $L_{срT}$ многотактного преобразователя, так как пульсация тока в фазе больше, чем в нагрузке (см. рисунок. 3.2, в).

Автономность работы фаз преобразователя частично нарушается, если цепь нагрузки имеет собственную индуктивность L , соизмеримую с индуктивностью $L_{ср\phi}$. Влияние L оценивают коэффициентом связывания системы

$$\kappa_c = 1 + L / L_{ср\phi}, \quad (3.5)$$

который в идеальном случае равен единице. При сильной связи ($\kappa_c > 1$) и малой нагрузке тяговых двигателей могут появиться прерывистые токи в фазах; дискретно изменяется коэффициент нагрузки фазы $\kappa_{\phi e0}$ в интервале

T_2 :

$$\kappa_{\phi e0} = I_{\phi e} / I = I / N_{\phi o}, \quad (3.6)$$

где $N_{\phi o} < N_{\phi}$ – число фаз, в которых одновременно протекают токи в периоде T_{ϕ} в рассматриваемом режиме. Когда $N_{\phi o} = 1$, многофазная система имеет такие же регулировочные характеристики, как многотактная.

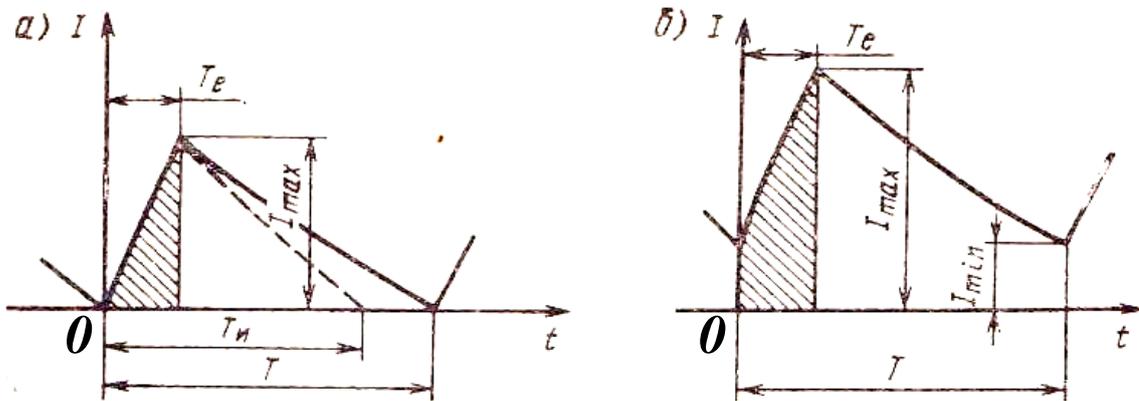


Рисунок. 3. 3. Диаграммы пульсации токов источника питания и группы тиристоров в прерывистом (а) и непрерывном (б) режимах

На рисунке 3. 3 изображены пульсации тока источника питания и тока группы тиристоров. Из этого рисунка видно, что независимо от того, имеет место прерывистый ток или непрерывный, справедливы соотношения между средними значениями напряжений и токов нагрузки и ИПП:

$$\left. \begin{aligned} U &= \lambda \kappa_{\phi e 0} U_{cн}; \\ I &= \kappa_u I_d / (\lambda \kappa_{\phi e 0}), \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

где $\kappa_u = T_u / T$ – относительное время импульса тока; $\lambda = T_e / T$ – коэффициент заполнения импульсного цикла в отборе энергии от источника питания ИПП (см. рисунок. 3. 1, а).

Для непрерывного режима имеем $\kappa_u = 1$ и $\kappa_{\phi e 0} = \kappa_{\phi e} = 1 / N_{\phi}$, следовательно, ток в цепи, содержащей э. д. с. E , равен

$$I = (U_c \lambda \kappa_{\phi e 0} - \kappa_u E) / R_{cp}, \quad (3.8)$$

где R_{cp} – среднее значение сопротивления цепи нагрузки за время T_u .

В отличие от системы ИПН (напряжения) системы ИПС (сопротивления) по (рисунок. 3. 1, б) не имеют обратных диодов в выходных

фильтрах. Это объясняется тем, что системы *ИРС* обычно состоят из N_R равных ступеней резисторов с одинаковыми сопротивлениями R , из которых плавно регулируется только одна, а остальные по мере разгона *ТЭД* поочередно отключаются контакторами. Такая система реализована на электропоезде ЭР200. При такой компоновке преобразователя разгрузочные диоды будут переходить в проводящее состояние только при очень низких коэффициентах заполнения, когда э. д. с. тяговых двигателей $E < U_c / N_R$. Системы *ИРС* не обеспечивают экономию электроэнергии при пуске э. п. с., а также в режиме регулирования тока возбуждения. Они обеспечивают только плавность регулирования среднего значения тока.

В системах *ИРН* при большой мощности *ТЭД* предпочтительны многофазные системы. Но если требуется получить ограниченный коэффициент заполнения при относительно малых массогабаритных показателях узлов коммутации тиристорного прерывателя, могут быть целесообразны и смешанные многофазно-многотактные системы в сочетании с магнитосвязанными реакторами выходного фильтра, т.е. сглаживающего реактора L_{cp} в цепи тягового двигателя *Р-ОВ*.

Выполненный выше анализ при учете многотактности и многофазности относится в основном к *ТЭД* большой мощности. В частности, он выполнен профессором Розенфельдом В. Е. и его учениками при разработке электровоза ВЛ8В на 6 *кВ*. В настоящее время ситуация изменилась следующим образом:

- Импульсное регулирование используют почти исключительно для мотор-вагонного подвижного состава при мощности *ТЭД* до 250 *кВт*;
- Единичная мощность тиристорov и силовых транзисторов возросла существенно, что позволяет обойтись без их группового соединения.

3. 3. Рекуперативное торможение

Импульсное управление э. п. с. позволяет осуществлять плавное бесконтактное регулирование скорости не только в тяговом режиме, но и при электрическом торможении. Процесс электрического торможения существенно различен при импульсном и контакторно-реостатном управлении. В случае контакторно-реостатного управления рекуперация возможна лишь при независимом или смешанном возбуждении *ТЭД* и э. д. с. тяговой машины или группы последовательно включенных машин должна превышать напряжение контактной сети. Импульсное управление позволяет осуществить рекуперацию, даже если э. д. с. *ТЭД* меньше напряжения сети и в большинстве случаев при двигателях последовательного возбуждения, что упрощает схемные решения. Возможно также реостатное торможение с плавным бесконтактным регулированием тормозной силы и скорости, причем и при сопротивлении тормозного реостата, большем критического.

Рассмотрим принцип работы импульсного преобразователя в процессе рекуперативного торможения на примере упрощенной схемы рисунок. 3. 4. В этой схеме использованы те же элементы, что и в схеме для тягового режима, но изменены их соединения. Реактор L_H обеспечивает сглаживание тока в цепи тяговых машин, а блокирующий вентиль B_0 препятствует поступлению тока из контактной сети в эти цепи в промежутки времени, когда напряжение на двигателях меньше напряжения сети.

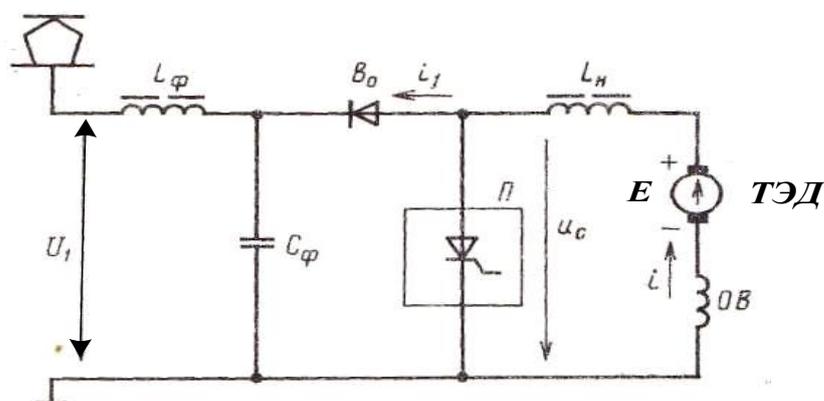


Рисунок. 3. 4. Принципиальная схема рекуперации при $U_{я} < U_1$

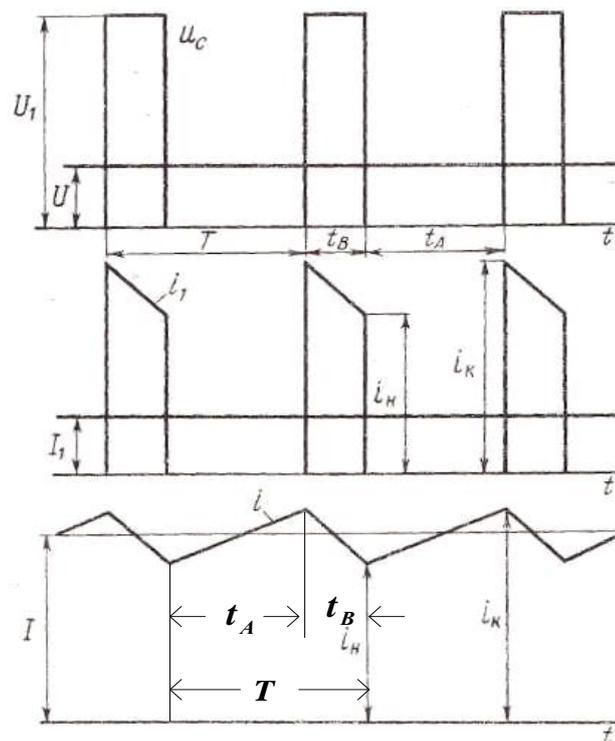


Рисунок. 3. 5. Импульсная диаграмма при рекуперации

На рисунке 3. 5 приведены диаграммы токов и напряжений при рекуперации по схеме рисунок. 3. 4. Замкнутому положению прерывателя Π соответствует часть периода t_A , а разомкнутому $t_B = T - t_A$. При отпирании прерывателя образуется контур тока тягового двигателя, работающего в генераторном режиме; он состоит из двигателя, реактора L_H и открытого прерывателя. Благодаря малому сопротивлению этого контура генераторный ток i увеличивается с i_H до i_K , вследствие чего возрастает запас электромагнитной энергии контура, сосредоточенный в основном двигателе $Я-ОВ$ и в реакторе. В этом интервале отдаваемый в сеть ток $i_1 = 0$. Затем после запираания прерывателя ток двигателя начинает уменьшаться и э. д. с. самоиндукции, обусловленная индуктивностью реактора L_H и обмоток двигателя, складывается с э. д. с. двигателя. Сумма этих э. д. с. превышает напряжение сети U_1 , и ток двигателя i_1 поступает в тяговую сеть, несмотря на то что его э. д. с. меньше напряжения сети ($E < U_1$).

Среднее напряжение U тягового двигателя, работающего в генераторном режиме, уравнивается средним за период значением напряжения сети u_C . Поэтому в соответствии с диаграммами рисунок 3.5

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T u_C dt = U_1 \left(1 - \frac{t_A}{T} \right). \quad (3.9)$$

Принимая, как и при тяговом режиме $U_1 I_1 t_B = U I T$, получим средний ток тяговой машины:

$$I = I_1 T / (T - t_A), \quad (3.10)$$

где I_1 – среднее значение тока, возвращаемого при рекуперации в контактную сеть в течение $t_B = T - t_A$.

Как следует из выражений (3.9) и (3.10), регулирование напряжения U и тока I , а тем самым тормозной силы и скорости поезда при импульсном управлении можно осуществить, изменяя отношение t_A/T . При частотно-импульсных преобразователях с уменьшением длительности периода T и увеличением частоты уменьшается напряжение U и, следовательно, скорость движения. В случае широтно-импульсного управления $T = \text{const}$ и напряжение регулируется только изменением длительности импульса t_A , которую нужно увеличивать для снижения напряжения U и уменьшать для его увеличения.

При схеме рекуперативного торможения рисунок 3.4 напряжение $U \approx E$ тяговой машины должно быть меньше напряжения U_1 контактной сети. Иначе рекуперация в случае тяговых машин последовательного возбуждения невозможна из-за электрической неустойчивости их при работе параллельно с сетью постоянного более низкого напряжения. В случае же машин независимого и смешанного возбуждения в режиме высоких скоростей, когда сумма э. д. с. тяговых машин может быть выше напряжения контактной сети, возврат энергии в сеть осуществляется без участия импульсного преобразователя, как и при обычном контакторно-реостатном

управлении и независимом возбуждении *ТЭД*. Только после того, как сумма напряжений последовательно соединенных тяговых машин станет меньше напряжения сети, вступает в действие импульсный преобразователь, и рекуперативное торможение происходит в описанном порядке (рисунок. 3. 4, 3. 5).

Импульсное управление процессом рекуперативного торможения принципиально возможно и при э. д. с. тяговых машин любой системы возбуждения, превышающей напряжение контактной сети, если включать импульсный преобразователь по схеме тягового режима, поменяв местами выход преобразователя и цепь тяговой машины. Однако такое включение в режиме высоких скоростей и больших э. д. с. и переключение на схему рисунок. 3. 4 при снижении скорости не нашло практического применения, так как сильно усложнило бы схему.

В случае импульсного управления в отличие от контакторно-реостатного рекуперация возможна до весьма низких скоростей и малых э. д. с. тяговых машин. По мере снижения скорости необходимо уменьшать отношение $\gamma = t_A/T$. Поэтому для стабилизации тока при частотно-импульсном управлении наименьшая скорость рекуперации ограничивается наибольшей допустимой частотой, а при широтно-импульсном — наименьшим возможным временем замкнутого состояния прерывателя.

Если применяются системы с постоянно включенными импульсными преобразователями, напряжение сети, как правило, значительно выше суммарного напряжения тяговых машин. При этом импульсное управление режимом рекуперации можно осуществить без каких-либо дополнительных устройств во всем диапазоне скоростей. В случае же использования импульсного регулирования только при пуске и электрическом торможении номинальное напряжение двигателей или групп двигателей равно напряжению контактной сети. Поэтому при высоких скоростях э. д. с. тяговых машин может оказаться выше напряжения сети. Для обеспечения возможности импульсного управления необходимо понизить напряжение,

получаемое от рекуперлирующих машин. Наиболее просто это достигается включением последовательно с импульсным преобразователем добавочного резистора $R_{доб}$. Сопротивление этого резистора выбирают так, чтобы разность напряжения тяговых машин и падения напряжения в резисторе была меньше напряжения сети. В резисторе теряется при торможении 15 - 20% энергии рекуперации, но зато обеспечивается устойчивая возможность рекуперативного торможения в широком диапазоне скоростей. Для уменьшения этих потерь энергии целесообразно шунтировать резистор $R_{доб}$ после того, как скорость двигателя снизится настолько, что сумма э. д. с. всех последовательно включенных тяговых машин станет меньше напряжения сети.

При последовательном возбуждении нельзя сохранить в режиме рекуперации простое параллельное соединение тяговых машин или их групп, так как параллельная работа их в генераторном режиме на сеть электрически неустойчива. Поэтому приходится либо питать каждую группу последовательно соединенных машин от отдельного преобразователя или от отдельной фазы, либо применять более сложные схемы включения, используемые при реостатном торможении параллельно включенных двигателей последовательного возбуждения. Кроме того, возникают трудности с обеспечением самовозбуждения тяговой машины, так как оно должно происходить при работе на прерывающуюся цепь, состоящую из прерывателя и нагрузочного реактора. Поэтому обычно требуется хотя бы в начальный момент специальный маломощный возбудитель, кратковременно подпитывающий обмотку возбуждения в момент перехода на рекуперативное торможение. При некоторых системах импульсных преобразователей целесообразно производить предварительный подзаряд коммутирующих конденсаторов (вагоны метро типа E). На электровозах ЧС2Т, ЧС6, ЧС7, ЧС200 используют начальное возбуждение тяговых электродвигателей $TЭД$ от аккумуляторных батарей электровоза 110 В.

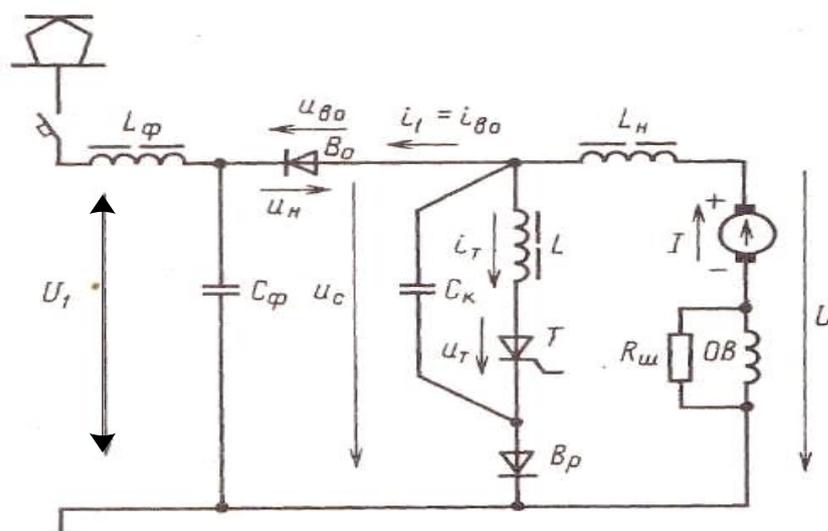


Рисунок. 3. 6. Частотно-импульсный преобразователь при рекуперации

Для электрического торможения могут быть использованы те же типы прерывателей, что и в тяговом режиме. Рассмотрим процесс рекуперативного торможения при простейших системах частотно-импульсного и широтно-импульсного преобразования, которые были проанализированы выше, применительно к тяговому режиму.

Применение частотно-импульсного преобразователя для рекуперативного торможения иллюстрируется схемой рисунок 3. 6 и диаграммами рисунок 3. 7. Преобразователь состоит из тех же элементов, которые используют для управления тяговым режимом. Вентиль B_0 препятствует поступлению тока от источника питания в цепь ТЭД и преобразователя, а вентиль B_p предотвращает разряд конденсатора C_k на тяговую машину в тех случаях, когда ее ток спадает до нуля. Как и для режима тяги, при построении диаграмм рисунок 3. 7 принято, что напряжение на конденсаторе C_ϕ и ток в цепи двигателя неизменны и равны соответственно U_1 и I . Кроме того, не учитываются потери энергии во всех элементах преобразователя.

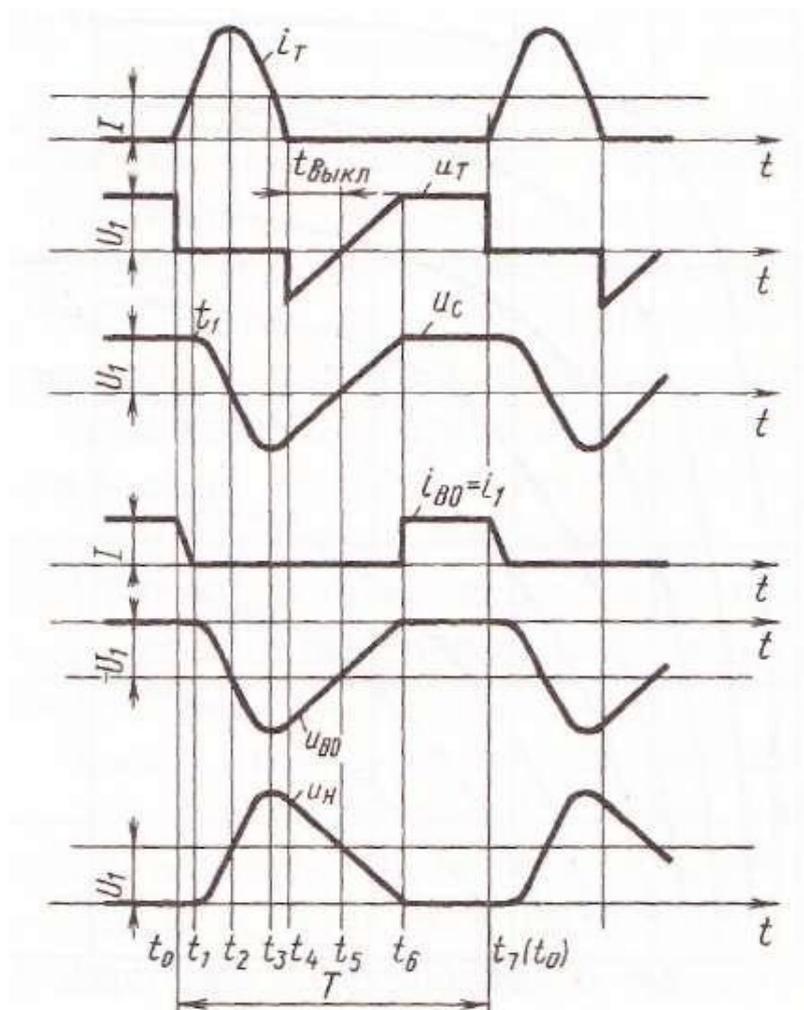


Рисунок. 3. 7. Импульсная диаграмма для схемы рисунок 3. 6

Перед отпиранием посредством системы управления тиристора T напряжение на нем и на конденсаторе C_K было равно U_1 . Ток I тяговой машины, поддерживаемый энергией, накопленной в ней и в индуктивностях нагрузочного контура, поступал через неуправляемый вентиль B_0 в контактную сеть.

После отпирания тиристора T начинается нарастание его тока i_T и соответственное снижение тока i_{BO} , отдаваемого в сеть. В момент t_1 ток i_T достигает значения I , а ток i_{BO} становится равным нулю. Начинается колебательный разряд конденсатора C_K на реактор L , вследствие чего напряжение u_C на конденсаторе сначала снижается до нуля (момент t_2), а затем меняет знак и начинает нарастать. Разрядный ток конденсатора C_K в

момент t_2 достигает максимума, а в момент t_3 опять спадает до нуля. Через тиристор T замыкается разрядный ток i_T и ток I тяговой машины. В момент t_3 , когда ток i_T тиристора становится равным I , напряжение на конденсаторе достигает наибольшего отрицательного значения.

В момент t_4 ток i_T прекращается, к тиристорному прикладывается обратное напряжение и начинается перезаряд конденсатора C_K током I по контуру, состоящему из тяговой машины, реактора L_H и конденсатора C_K . Напряжение u_C снова меняет знак и в момент t_6 становится равным U_1 . Тиристор T за время $t_5 - t_4$, в течение которого он находится под отрицательным напряжением, должен восстановить управляющие свойства, т. е. высокое сопротивление, так как с момента t_5 к нему прикладывается прямое напряжение.

В момент t_6 напряжение на конденсаторе C_K достигает напряжения сети U_1 , вследствие чего открывается вентиль B_0 и ток рекуперации, равный i_1 поступает в сеть при напряжении U_1 . Период T заканчивается в момент t_7 (или t_0), когда вновь отпирается тиристор.

Диаграммы напряжений и токов для режима рекуперативного торможения (см. рисунок. 3. 7) почти полностью совпадают с диаграммами для режима тяги. Различия заключаются лишь в том, что при тяге $i_1 = I - i_B$ и напряжение в цепи двигателя u_H , а при рекуперации $i_1 = i_B$ и напряжение в цепи двигателя равно u_C .

Из сопоставления диаграмм $u_C(t)$ и $u_H(t)$ следует, что

$$\int_{t_0}^{t_0+T} u_H dt + \int_{t_0}^{t_0+T} u_C dt = U_1 T . \quad (3.11)$$

Так как величина $\frac{I}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_H dt$ равна среднему напряжению двигателя при тяге, а $\frac{I}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u_C dt$ – среднему напряжению при рекуперации, можно сделать вывод, что при рекуперации оно равно разности напряжений U_1 и среднего в тяговом режиме. Вычитая из U_1 значение напряжения, рассчитанное по ранее приведенной методике, приходим к следующей формуле для среднего напряжения тяговой машины при рекуперативном торможении:

$$U = U_1 - \frac{U_1}{T} \left[\frac{IL}{2U_1} + \sqrt{LC_\kappa} \left(\pi + \arcsin \frac{I}{U_1} \sqrt{\frac{L}{C_\kappa}} \right) + \frac{C_\kappa U_1}{I} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{I^2}{U_1^2} \frac{L}{C_\kappa}} \right) \right]. \quad (3.12)$$

Точно так же из сопоставления диаграмм $i_1(t)$ и $i_B(t)$ следует, что

$$\int_{t_0}^{t_0+T} i_1 dt + \int_{t_0}^{t_0+T} i_B dt = IT. \quad (3.13)$$

Учитывая, что величина $\frac{I}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_1 dt$ равна среднему току источника питания при тяге, а $\frac{I}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_B dt$ – при рекуперации, можно определить средний ток I_1 при рекуперации, вычитая из тока I тяговой машины средний ток источника питания в тяговом режиме, который определяется по формуле

$$I_1 = I - \frac{I}{T} \left[\frac{IL}{2U_1} + \sqrt{LC_\kappa} \left(\pi + \arcsin \frac{I}{U_1} \sqrt{\frac{L}{C_\kappa}} \right) + \frac{C_\kappa U_1}{I} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{I^2}{U_1^2} \frac{L}{C_\kappa}} \right) \right]. \quad (3.14)$$

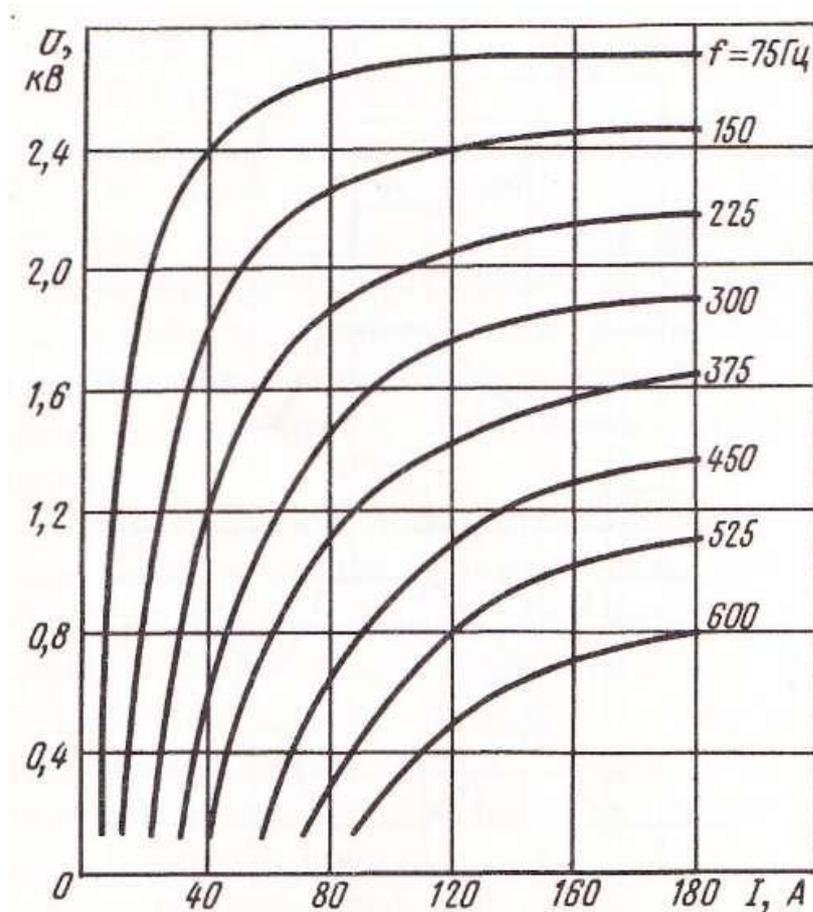


Рисунок. 3. 8. Входные характеристики по формуле (3.12)

Формула (3.12) представляет собой выражение входной характеристики частотно-импульсного преобразователя в режиме рекуперативного торможения. По ней рассчитаны для примера входные характеристики (рисунок. 3.8) частотно-импульсного преобразователя пригородного электропоезда ЭР2В при разных частотах f и неизменном напряжении контактной сети. Как следует из рисунка 3. 8 и формулы (3.12), с увеличением абсолютного значения тока I повышается напряжение U рекуперирующей машины.

Поскольку скорость движения поезда v приблизительно пропорциональна напряжению U , а тормозная сила зависит от тока I то, с уменьшением скорости резко падает тормозная сила. Для повышения ее необходимо увеличивать частоту преобразователя. Установить диапазон изменения частоты, необходимый для реализации желаемой зависимости $I(U)$, а следовательно, и тормозной характеристики $B(v)$, можно на

основании регулировочной характеристики $f(U, I)$, выражение для которой получим, решая уравнение (3.12) относительно частоты:

$$f = (U_1 - U) / \left\{ U_1 \left[\frac{IL}{2U_1} + \sqrt{LC_k} \left(\pi + \arcsin \frac{I}{U_1} \sqrt{\frac{L}{C_k}} \right) + \frac{C_k U_1}{I} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{I^2 L}{U_1^2 C_k}} \right) \right] \right\}. \quad (3.15)$$

Для рекуперации при широтно-импульсном преобразовании используют те же элементы преобразователя, что и в типовом тяговом режиме, но изменяют их соединение, как это показано на рисунке 3. 9. Анализ процессов, происходящих в режиме рекуперации, можно вести на основании диаграмм токов и напряжений, приняв, что ток рекуперации i_I изменяется так же, как ток $i_{BO}(t)$ в тяговом режиме.

Перед моментом t_I открытия главного тиристора T ток I тяговой машины, поддерживаемый неизменной энергией, запасенной в ее обмотках и реакторе L_H , поступал через вентиль B_o в питающую сеть. Напряжение на конденсаторе C_k , который был заряжен в предыдущем цикле до напряжения сети U_1 , приложено к тиристорам T в прямом направлении.

После отпирания главного тиристора в момент t_I его ток возрастает сразу до значения I , прекращается ток $i_{BO} = i_I$, а напряжение u_{BO} становится равным U_1 . Образуется колебательный разрядный контур конденсатора C_k через вентили T и B_B и реактор L . Разрядный ток, достигнув максимального значения, вновь снижается до нуля, а напряжение u_C на конденсаторе, пройдя через нуль, становится отрицательным и в конечном счете равным U_1 .

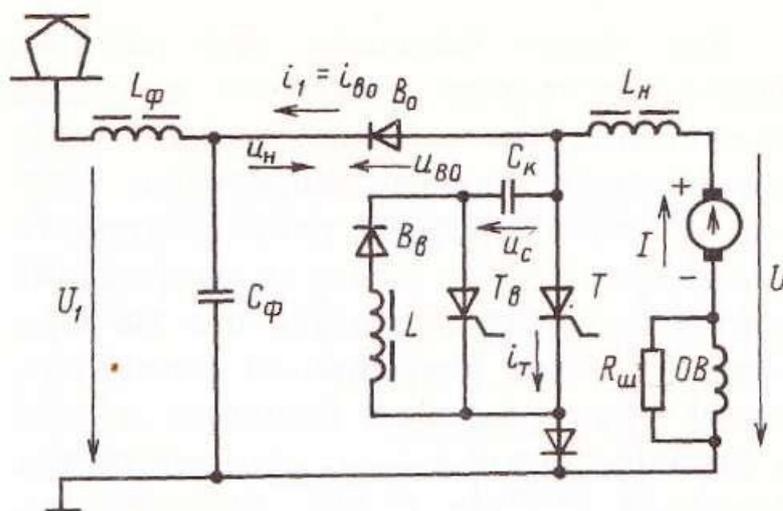


Рисунок. 3.9. Рекуперация при широтно-импульсном регулировании

Через тиристор T проходит сумма тока I тяговой машины и разрядного тока. После прекращения колебательного процесса i_{BO} (момент t_3) до момента t_4 открытия вспомогательного тиристора T_B ток $i_T = I$. При отпирании тиристора T_B к главному тиристор T прикладывается отрицательное напряжение конденсатора C_k , вследствие чего ток I переходит с тиристора T в цепь конденсатора C_k и тиристора T_B . Начинается перезаряд этого конденсатора при неизменном токе I , поддерживаемом энергией, накопленной в реакторе L_H и обмотках тяговой машины. Напряжение на конденсаторе увеличивается по линейному закону, проходит через нуль в момент t_5 и достигает в момент t_6 напряжения сети U_1 . Интервал времени от t_4 до t_5 , в течение которого к тиристор T приложено обратное напряжение, представляет собой время его непроводящего состояния. Время выключения вспомогательного тиристора T_B равно интервалу между моментами t_5 и t_8 .

После того как напряжение u_C достигло напряжения U_1 сети, открывается вентиль B_0 , и ток I двигателя поступает в фильтр и питающую сеть. Весь период завершается в момент следующего отпирания главного тиристора T , когда начинается новый цикл регулирования.

Как было показано при анализе электромагнитных процессов в случае применения частотно-импульсного преобразования, среднее напряжение тяговой машины во время рекуперативного торможения равно разности напряжений контактной сети и двигателя в тяговом режиме, а ток рекуперации равен разности токов тяговой машины и сети в тяговом режиме. Отсюда следует, что в режиме рекуперации при широтно-импульсном преобразователе имеем

$$U = U_1 - \frac{U_1}{T}(t_{OT} + 2C_k U_1 / I); \quad (3.16)$$

$$I_1 = I - \frac{I}{T}(t_{OT} + 2C_k U_1 / I). \quad (3.17)$$

На рисунке 3.10 приведен пример входных характеристик $U(I)$ широтно-импульсного преобразователя, рассчитанных по формуле (3.16) для режима рекуперации при разных значениях времени t_{OT} открытого состояния тиристора T . Эти характеристики имеют форму, близкую к аналогичным характеристикам при частотно-импульсном управлении, но являются более жесткими, особенно при больших нагрузках, когда слагающая длительности цикла, обратно пропорциональная току I , занимает небольшую часть всего периода T .

Решая уравнение (3.16) относительно времени t_{OT} , получим регулировочную характеристику:

$$t_{OT} = \frac{U_1 - U}{U_1} T - \frac{2C_k U_1}{I}. \quad (3.18)$$

Изменяя время t_{OT} в соответствии с этой формулой, можно получить любой закон $I(U)$ изменения тока в зависимости от напряжения, т. е. любую тормозную характеристику. Чем больше время открытого состояния главного тиристора, тем меньше напряжение двигателя. Наибольшее напряжение на двигателе ограничено минимально возможным временем t_{OT} , теоретически равным $\pi\sqrt{LC_k}$.

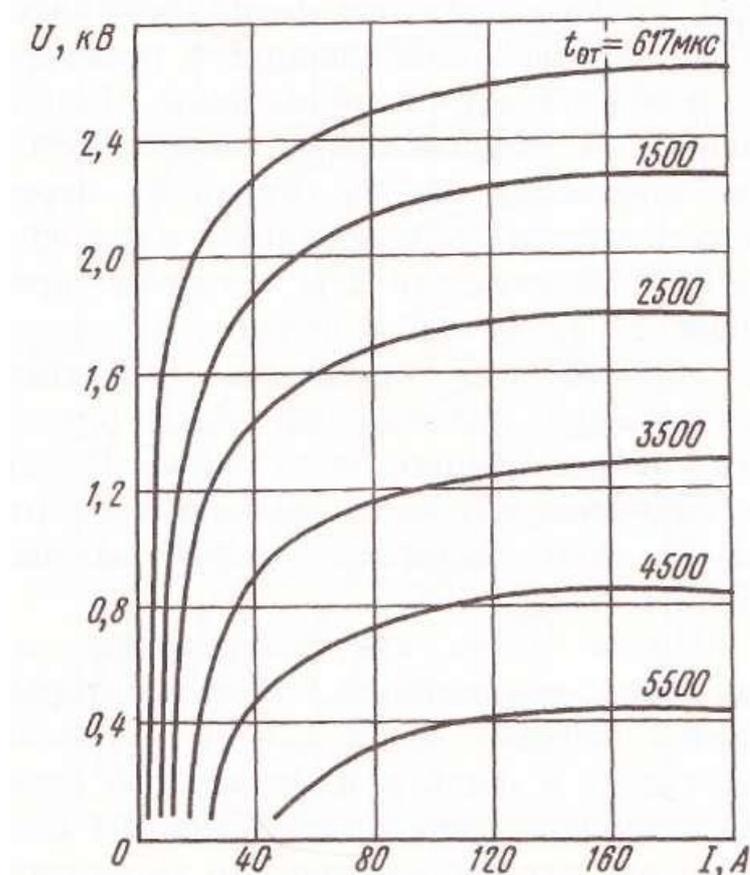


Рисунок. 3.10. Характеристики $U(I)$ по формуле (3.16)

По условиям обеспечения электромагнитной совместимости обычно применяют ШИР, стабилизируя рабочую частоту f . Однако, нужно учитывать, что система ЧИР характеризуется более простыми схемными решениями. Поэтому систему ЧИР целесообразно использовать в устройствах автономной электрической тяги (аккумуляторные электровозы, электромобили и т. д.).

3. 4. Реостатное торможение

По схеме рисунок 3. 4, используемой для рекуперативного режима, может быть осуществлено также плавное импульсное реостатное торможение без регулирования сопротивления тормозного резистора. Различие заключается лишь в том, что преобразователь при включении его не присоединяется к питающей сети, а замыкается на тормозной резистор R_T . Рабочие процессы при рекуперативном и реостатном торможении почти одинаковы и отличаются лишь тем, что при рекуперации вся система

работает на сеть приблизительно постоянного напряжения, а при реостатном — на резистор, напряжение на котором пропорционально току. Реостатное торможение возможно при тяговых машинах разных систем возбуждения, в том числе и последовательном, и при сопротивлении тормозного резистора, большем критического. В случае нескольких идентичных параллельных групп тяговых двигателей следует использовать для обеспечения их нормальной параллельной работы такие же схемы, как и при контакторно-реостатном управлении.

На рисунке 3. 11 приведена простейшая схема импульсного регулирования процесса реостатного торможения двигателя последовательного возбуждения. Рабочий процесс при этой схеме иллюстрируется теми же диаграммами рисунок 3. 5, которые были построены ранее применительно к рекуперативному торможению, с тем лишь изменением, что вместо напряжения сети U_1 должно быть принято падение напряжения $I_1 R'_T$ в тормозном резисторе.

Реостатное торможение начинается при отключении преобразователя от контактной сети и включении контактора K . Включенному состоянию прерывателя Π соответствует интервал t_A , а отключенному — интервал $t_B = T - t_A$. Если сопротивление резистора R_T больше критического, самовозбуждение тяговой машины при отключенном прерывателе Π невозможно. При включенном прерывателе Π для тяговой машины ТЭД образуется контур, состоящий из этой машины, реактора L_H и прерывателя Π , который можно считать короткозамкнутым. Происходит интенсивное самовозбуждение машины ТЭД, ее ток возрастает, увеличивается запас электромагнитной энергии в контуре, в основном в реакторе L_H . Ток i_1 , поступающий в этом интервале от двигателя в тормозной резистор, равен нулю.

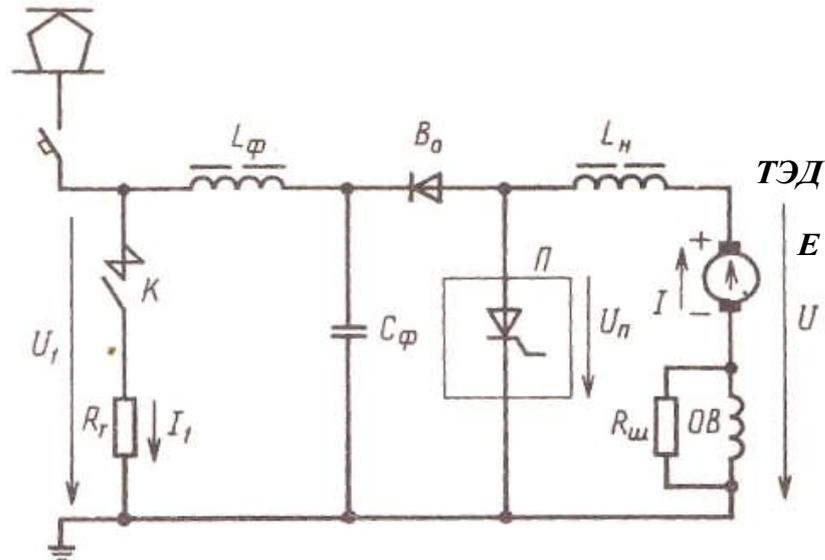


Рисунок. 3.11. Реостатное торможение с импульсным преобразователем Π

После отключения Π ток тяговой машины уменьшается, благодаря чему сумма ее э. д. с. E и э. д. с. самоиндукции становится достаточной для поддержания тока в резисторе, несмотря на то, что его сопротивление больше критического.

Благодаря мощному входному фильтру $L_\phi C_\phi$ можно принять, что ток I тормозного резистора остается практически неизменным в течение всего периода. Из рисунка 3. 5 следует, что

$$I_1 = I(T - t_A)/T = I(1 - \gamma), \quad (3.19)$$

где I – средний ток тяговой машины.

В соответствии с формулой (3.19) напряжение U_1 на резисторе также можно принять

$$U_1 = I_1 R_T = IR_T(T - t_A)/T = IR_T(1 - \gamma). \quad (3.20)$$

Напряжение в цепи тяговой машины равно нулю в интервале t_A и напряжению U_1 в интервале $T - t_A$. Следовательно, среднее напряжение тяговой машины

$$U = U_1(T - t_A)/T = IR_T(1 - \gamma)^2. \quad (3.21)$$

Поскольку напряжение U приблизительно пропорционально скорости движения, а тормозная сила зависит от ее тока, из формулы (3.21) следует,

что регулирование тормозной характеристики и всего тормозного процесса можно осуществить, изменяя коэффициент заполнения импульсов γ . В частности, как следует из этой формулы, для поддержания неизменного тока и неизменной тормозной силы при реостатном торможении необходимо изменять величину $(1 - \gamma)$ приблизительно пропорционально \sqrt{V} . При частотном управлении по мере снижения скорости следует увеличивать частоту, а при широтном - увеличивать длительность закрытого состояния прерывателя, т. е. уменьшать время его открытого состояния.

Чтобы рассчитать входную характеристику импульсного преобразователя при реостатном торможении, можно использовать выведенные применительно к рекуперативному торможению формулы (3.12) и (3.14) при частотном управлении и формулы (3.16) и (3.17) при широтном. Для этого необходимо подставить в них вместо U_1 величину $I_1 R_T$, а вместо I_1 — отношение U_1 / R_T и решить эти уравнения относительно U_1 или I_1 .

При импульсном управлении реостатное торможение используется преимущественно в качестве замещающего рекуперативное в случае отсутствия на линии достаточной нагрузки для обеспечения необходимого тормозного эффекта. На рисунке 3. 12 показана одна из возможных схем включения замещающего реостатного торможения. При нагрузке тяговой сети, недостаточной для восприятия всей мощности, рекуперированной тяговой машиной, повышается напряжение на конденсаторе фильтра. Вследствие этого срабатывает система отпирания тормозного тиристора T_T , включающего тормозной резистор R_T . Тем самым рекуперативное торможение замещается реостатным.

При очередном включении прерывателя Π обратным напряжением запирается и тиристор T_T . Он может вновь отпереться в следующих циклах, только если недостаточно потребление энергии в сети и соответственно повысилось напряжение. Если же нагрузка достаточна для восприятия энергии рекуперации, напряжение не повышается, не включается тормозной

резистор R_T и, следовательно, восстанавливается рекуперативное торможение.

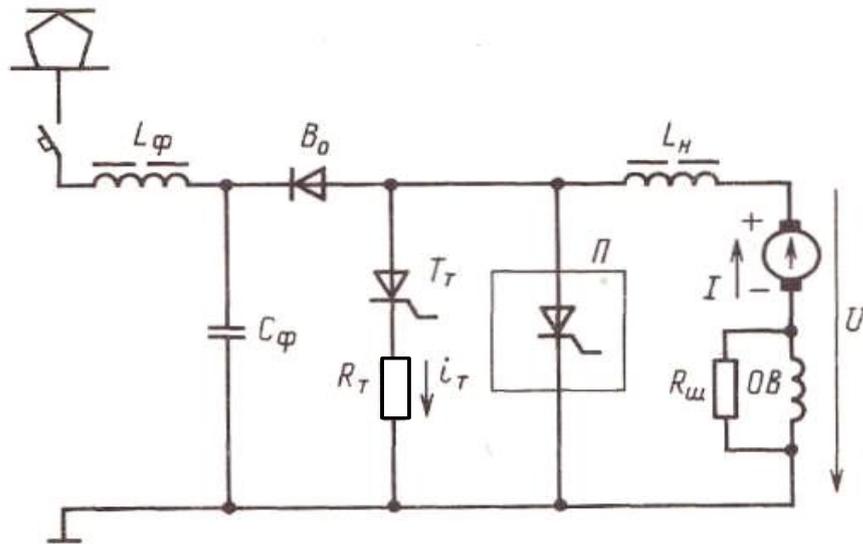


Рисунок. 3. 12. Замещение рекуперативного торможения реостатным

В схеме рисунок 3. 12 в отличие от схемы рисунок 3. 11 ток i_T резистора R_T получается прерывистым, так как резистор включается между прерывателем и фильтром. В течение части периода $T - t_A$ этот ток равен току I тяговой машины, а остальное время — нулю. Напряжение как на резисторе, так и на тяговой машине равно IR_T в интервале $T - t_A$ и нулю в интервале t_A . Отсюда легко получить значения средних токов и напряжений:

$$I_1 = I(1 - t_A/T) = I(1 - \lambda); \quad (3.22)$$

$$U_1 = U = IR_T(1 - t_A/T) = IR_T(1 - \lambda). \quad (3.23)$$

Поэтому среднее напряжение тяговых машин в схеме рисунок 3. 12 равно не $IR_T(1 - \lambda)^2$, как в схеме рисунок 3. 11, а $IR_T(1 - \lambda)$. Для поддержания неизменного тормозного тока и тормозной силы следует изменять величину $(1 - \lambda)$ приблизительно пропорционально скорости v .

3. 5. Особенности тяговых электроприводов с накопителями электроприводов с накопителями электроэнергии (НЭ)

НЭ в электрической тяге применяют (см. рисунок. 1. 6) с такими целями:

- сглаживание неравномерности потребления электроэнергии, в частности снижение пик-фактора;
- прием избыточной энергии рекуперации и ее последующее использование в тяговом режиме.

Имеются два варианта установки НЭ – на тяговых подстанциях и на электропоездах. Наиболее предпочтителен первый вариант; при этом не требуется никаких изменений в рассматриваемой системе импульсного регулирования (см. рисунок. 3. 1, а). Второй вариант также рассматривается, но он более затратен, так как при размещении НЭ на поезде необходимо соблюдать массогабаритные и другие ограничения (по вибрациям, температуре и т. д.).

Основная функция бортового НЭ – прием энергии рекуперации при торможении поезда, если тяговая сеть не принимает эту энергию. Для поезда массой M система импульсного регулирования должна передать в НЭ за одно торможение энергию

$$\mathcal{E}_{НЭ} = \left[M(V_H^2 - V_K^2)/2 - \Delta\mathcal{E}_w \right] \eta,$$

Где V_H, V_K – скорость начала и окончания торможения;

$\Delta\mathcal{E}_w$ – расход энергии на преодоление сопротивления движению;

η – КПД колесно-моторного блока.

Главным является вопрос выбора расчетного значения V_H , которое определяет емкость НЭ. Можно принять максимальное значение V_H , но поезд тормозит от $V_H = V_{макс}$ очень редко, так что этот вариант нецелесообразен, но его преимущество в том, что отпадает необходимость в

реостатном тормозе. Более реальным является вариант, когда на основе статистического анализа принимают значение V_H , соответствующее доверительной вероятности 0,9 - 0,95. В этом случае необходимости в реостатном тормозе нет, поскольку вместо него целесообразно использовать пневматический тормоз. Применительно к режимам движения поездов в Московском железном дорогом узле целесообразно принять $V_H=60-70$ км/ч.

При наличии НЭ необходимо дополнительно реализовать в системе по рисунку 3.1,а следующие алгоритмы регулирования:

- При включении тормоза сначала производят сборку схемы рекуперации на тяговую сеть, а при приеме энергии переходят на заряд НЭ; если торможение продолжается при уже заряженном НЭ, то необходим переход на пневматическое торможение;
- При пуске электропоезда реализуют питание тяговых электродвигателей от НЭ, пока накопленная энергия не будет исчерпана; после этого переключают электропитание на тяговую сеть.

Таким образом, расчетную схему по рисунку 3.1,а можно дополнить НЭ, включаемым при его заряде – разряде вместо источника *III*. При этом в методике расчета этот источник можно заменить конденсатором, напряжение на котором вычисляют путем интегрирования тока заряда – разряда.

3. 6. Характеристики тягового электропривода при импульсном управлении

Особенности и ограничения характеристик. Благодаря возможности плавного автоматического регулирования напряжения тяговых машин при импульсном управлении могут быть сформированы любые тяговые и тормозные характеристики. Эти характеристики ограничены лишь предельно допустимыми режимами, аналогичными рассмотренным выше. Наряду с общими для всех видов э. п. с. постоянного тока предельными режимами для

импульсного управления специфичны ограничения по мощности двигателя и преобразователя, наибольшей частоте для частотного преобразователя или наименьшему коэффициенту заполнения импульсов для широтного. Однако ограничение по минимальному коэффициенту заполнения при *ШИР* может быть устранено путем перехода с широтно-импульсного преобразования на частотно-импульсное при малых напряжениях, если это допустимо по условиям электромагнитной совместимости. Не должна ограничивать работоспособность тягового привода э. п. с. и нагрузочная способность импульсного преобразователя. Ее следует выбирать таким образом, чтобы обеспечить все заданные режимы работы тяговых двигателей.

Поскольку в пределах допустимых режимов работы э. п. с. при плавном регулировании возможны любые значения скорости и силы тяги, то характеристики при импульсном управлении изображаются не семейством кривых, как при контакторно-реостатном управлении, а площадями, лежащими внутри ограничивающих кривых. Несмотря на это, понятие характеристики в виде кривой не теряет смысла и при импульсном управлении, если принимать в качестве характеристик зависимости между скоростью, силой тяги, током и напряжением тяговых машин, соответствующими определенной позиции контроллера машиниста. Если не применяется автоматическое регулирование, такими характеристиками являются зависимости между указанными величинами при неизменной частоте f в случае частотного управления и при неизменном времени t_{OT} между отпиранием главных и вспомогательных тиристоров в случае широтного управления. Вводя обратные связи, можно получить и другие характеристики, например обеспечивающие в заданных пределах постоянство напряжения, тока и скорости.

Импульсное управление позволяет не только плавно регулировать в широком диапазоне скорость движения поезда, но и производить пуск и электрическое торможение по предельным характеристикам. Рассмотрим такой пуск на примере кривых рисунок 3.13. Благодаря плавному

импульсному регулированию напряжения разгон поезда может быть произведен при приблизительно неизменных пусковом токе I_{II} и пусковой силе тяги F_{II} вплоть до выхода на характеристику III при наибольшем напряжении и полном возбуждении. Осуществим также разгон при предельной по сцеплению силе тяги, обеспечиваемый автоматически.

Переход на ослабленное возбуждение для дальнейшего увеличения скорости поезда при импульсном управлении не сопровождается толчками тока. Если предусмотрено плавное регулирование тока возбуждения тяговых двигателей, для поддержания пускового тока неизменным следует постепенно уменьшать ток возбуждения I_B по мере увеличения скорости вплоть до скорости, соответствующей току I_{II} по характеристике OP ослабленного возбуждения. При неизменном токе I_{II} остается постоянной и мощность $I_{II}U$, а следовательно, сила тяги изменяется в зависимости от скорости по гиперболе, как это показано сплошной линией в левой части рисунок 3.13.

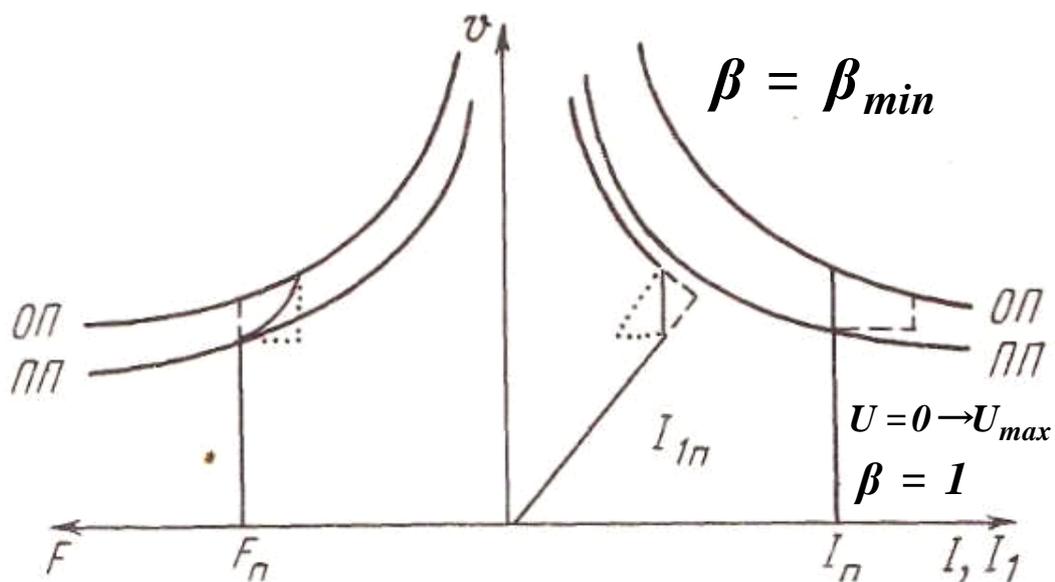


Рисунок. 3.13. Пусковые характеристики при импульсном регулировании

Если не применяется специальный регулятор тока I_B , можно обеспечить постоянство пускового тока при переходе на ослабленное возбуждение путем шунтирования обмотки возбуждения резистором, если одновременно с включением резистора понизить напряжение, подводимое к тяговому двигателю. По мере повышения скорости напряжение двигателя постепенно увеличивается таким образом, что сохраняется неизменный пусковой ток I_{II} . Когда скорость поезда достигает значения, соответствующего этому току на характеристике **ОП** ослабленного возбуждения, напряжение должно стать равным номинальному. Сила тяги сразу после включения шунтирующего резистора падает до значения, соответствующего току I_{II} при ослабленном возбуждении, и остается постоянной до момента выхода на характеристику **ОП** при номинальном напряжении. Изменения силы тяги при такой системе пуска показаны пунктиром в левой части рисунок 3.13.

Если пусковой режим ограничивается не наибольшим током двигателя, а условиями сцепления, целесообразно сохранить в течение всего периода перехода на ослабленное возбуждение ту же силу тяги F_{II} , что и при полном возбуждении. Для этого в момент включения шунтирующего резистора следует увеличить ток двигателя до значения, соответствующего силе тяги F_{II} при ослабленном возбуждении. Во избежание чрезмерного толчка тока необходимо одновременно несколько снизить напряжение на двигателях, а затем постепенно повышать его. После достижения скорости, соответствующей силе тяги F_{II} при ослабленном возбуждении, к двигателям подводится полное напряжение. Процессу перехода при постоянной силе тяги соответствуют штриховые линии на рисунке 3.13.

При пусковом токе двигателя I_{II} и напряжении $U = U_{ном}$ ток I_{1II} , потребляемый из контактной сети в момент выхода на характеристику при полном возбуждении, равен

$$I_{1П} = I_{П} U_n n_D / (U_1 \eta_{пр}), \quad (3.24)$$

где n_D – число двигателей; $\eta_{пр}$ – к. п. д. преобразователя; U_1 – напряжение контактной сети.

В случае пуска при неизменном пусковом токе зависимость $I_{1П}(v)$ в течение периода разгона поезда при полном возбуждении может быть принята прямолинейной (см. рисунок 3.13). Для учета некоторого ухудшения к. п. д. преобразователя в случае пониженного напряжения начальный ток при $v = 0$ целесообразно принять ориентировочно равным не нулю, а около 5% $I_{1П}$.

Изменение тока $I_{1П}$ при переходе с полного возбуждения на ослабленное зависит от принятого способа этого перехода. Если пусковой ток остается неизменным и применяется постепенное плавное уменьшение тока возбуждения, ток $I_{1П}$ остается постоянным в течение всего переходного процесса, как это показано сплошной линией в правой части рисунок 3.13.

В случае перехода на ослабленное возбуждение при неизменном пусковом токе $I_{П}$ путем включения шунтирующего резистора с одновременным понижением напряжения двигателя ток $I_{1П}$ уменьшается сначала пропорционально отношению сил тяги при ослабленном и полном возбуждении и токе двигателя $I_{П}$, а затем линейно возрастает с увеличением скорости до значения, определяемого формулой (3.24) (пунктирная линия на рисунке 3.13). При сохранении же неизменной силы тяги $F_{П}$ во время перехода на ослабленное возбуждение ток I_1 возрастает в функции скорости линейно до значения, соответствующего току двигателя при силе тяги $F_{П}$ и ослабленном возбуждении (штриховая линия на рисунке 3.13). После выхода на характеристику **ОП** ослабленного возбуждения ток определяется формулой (3.24).

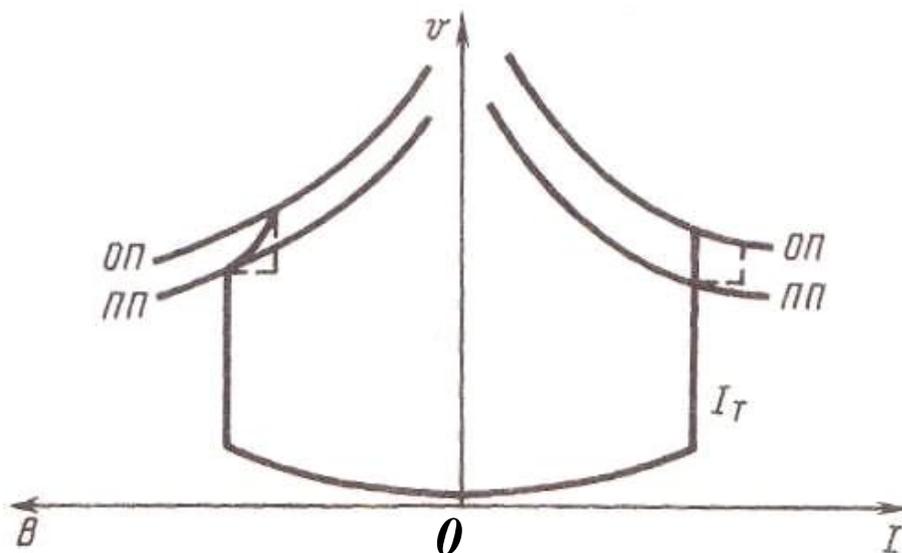


Рисунок. 3.14. Характеристики рекуперативного торможения ТЭД

Процесс рекуперативного торможения для замедления поезда протекает в обратном порядке по отношению к процессу пуска. Вначале, при больших скоростях, имеет место ограничение по наибольшему допустимому напряжению при ослабленном возбуждении. При этом ток и тормозная сила двигателя увеличиваются по мере уменьшения скорости по кривым, подобным скоростным характеристикам **ОП** при ослабленном возбуждении (рисунок. 3.14). После увеличения тормозного тока до заданного значения I_T следует переходить на работу при полном возбуждении. Переход может быть осуществлен по любому из трех способов, рассмотренных при анализе процесса пуска. Если переход на полное возбуждение осуществляется отключением шунтирующего резистора, для сохранения неизменного тормозного тока следует предварительно, постепенно понижая напряжение, снизить скорость при ослабленном возбуждении до значения, соответствующего току I_T в случае полного возбуждения, и лишь затем отключить шунтирующий резистор, одновременно повысив напряжение (штриховая линия в левой части рисунок. 3.14). При питании обмотки возбуждения от специального преобразователя, позволяющего плавно регулировать ее ток, переход на

характеристику *III* осуществляется постепенным увеличением тока возбуждения при неизменном токе якоря (сплошные линии на рисунок. 3.14).

Если процесс торможения ограничивается условиями сцепления и допустимо некоторое увеличение тока якоря, целесообразно продолжать торможение при ослабленном возбуждении вплоть до достижения предельной по сцеплению тормозной силы. После этого, постепенно понижая напряжение двигателя, уменьшают скорость до значения, соответствующего этой тормозной силе по характеристике для полного возбуждения. При такой скорости и полном возбуждении ток якоря равен I_T и, следовательно, можно отключить шунтирующий резистор, повысив одновременно напряжение на двигателе до первоначального (штриховая линия в левой части рисунок. 3.14).

Ток, отдаваемый рекуперирующим поездом в контактную сеть,

$$I_P = \frac{1}{3,6} \frac{BV}{U_1} \eta_{рек} \eta_{пр.рек} , \quad (3.25)$$

где $\eta_{рек}$ и $\eta_{пр.рек}$ — к. п. д. соответственно тяговой машины и преобразователя при рекуперации.

Конечную точку зависимости $I_P(V)$ следует брать при скорости, равной не нулю, а ориентировочно 10% скорости при токе I_T и полном возбуждении. Этим приближенно учитывается прекращение рекуперации при малых скоростях из-за ограничений по наибольшей частоте или максимальному времени открытия, а также ухудшение к. п. д. преобразователя при низких напряжениях тяговых машин. В пределах от скорости при полном возбуждении и токе I_T до конца рекуперации зависимость $I_P(V)$ допустимо принимать прямолинейной.

Расчет характеристик э. п. с. с импульсным управлением. Расчет естественных характеристик при постоянной частоте f в случае частотно-импульсного преобразования и постоянном времени проводящего состояния прерывателя при широтно-импульсном преобразовании проводят на

основании выходных характеристик для тягового режима и входных характеристик для рекуперативного. Выходные характеристики могут быть рассчитаны на основании формул для разных частот или времен проводящего состояния тиристорov, приведенных в разделах 3.1 и 3.2.

Поскольку эти формулы выведены без учета потерь в преобразователе, необходимо ввести при расчетах характеристик э. п. с. соответствующие поправки на потери в колебательном и нагрузочном контурах преобразователей. Относительные потери в коммутирующем контуре невелики и стабильны; их можно принять постоянными и равными 2%. Поэтому влияние их на выходные характеристики может быть учтено приближенно в тяговом режиме умножением выходного напряжения, рассчитанного без учета этих потерь, на коэффициент 0,98, а при электрическом торможении делением входного напряжения на тот же коэффициент. Потери в нагрузочном контуре, т. е. в цепях тяговых двигателей, и в реакторе фильтра проще всего учесть, вводя в формулы для определения скорости падения напряжения в этом контуре и в реакторе. При таких допущениях уравнение баланса напряжений и э. д. с. для тягового режима имеет вид

$$0,98U = n_c(Cv\Phi + Ir) + IR_n n_{II}/n_{\phi} + \Delta U_{BO}(1 - \lambda) + \Delta U_{BP} + I\lambda^2 R_{\phi} n_{\phi} ; \quad (3.26)$$

а для рекуперативного режима

$$U/0,98 = n_c(Cv\Phi - Ir) - IR_n n_{II}/n_{\phi} - \Delta U_{BO}(1 - \lambda) - \Delta U_{BP} - I(1 - \lambda)^2 R_{\phi} n_{\phi} - IR_{ДОБ}(1 - \lambda)n_{\phi} , \quad (3.27)$$

где ΔU_{BO} – падение напряжения в основных (главных) тиристорах;

R_n – сопротивление нагрузочного дросселя в цепи ТЭД;

R_{ϕ} – сопротивление дросселя фильтра;

n_{ϕ} – число фаз.

Входящее в эти формулы падение напряжения ΔU_{BP} в разделяющих вентилях следует умножить на $1 - \lambda$ в случае, если они установлены не в цепи тяговых машин. Сопротивление R_{aob} резистора в цепи рекуперации должно быть умножено не на $1 - \lambda$, а на $(1 - \lambda)^2$, если он подключен непосредственно к контактной сети, до фильтра. Для схемы же без этого резистора сопротивление $R_{ДОБ}$, естественно, должно быть принято равным нулю.

Коэффициент заполнения λ может быть приближенно принят равным отношению выходного напряжения преобразователя к входному при тяге и входного к выходному при рекуперации.

На основании формул (3.26) и (3.27) получаем следующие выражения для расчета скоростных характеристик при тяге:

$$v = \frac{I}{n_c C \Phi} \left[0,98U - n_c I r - I R_n n_{II} / n_{\phi} - \Delta U_{BO} (1 - \lambda) - \Delta U_{BP} - I \lambda^2 R_{\phi} n_{\phi} \right], \quad (3.28)$$

и при рекуперации

$$v = \frac{I}{n_c C \Phi} \left[U / 0,98 + n_c r I + I R_n n_{II} / n_{\phi} + \Delta U_{BO} (1 - \lambda) + \Delta U_{BP} + I (1 - \lambda)^2 R_{\phi} n_{\phi} + I R_{ДОБ} (1 - \lambda) n_{\phi} \right]. \quad (3.29)$$

Силы тяги F и торможения B определяют соответственно по известным формулам электромеханики.

Для выбора параметров системы управления импульсного преобразователя и определения потерь энергии в нем используют так называемые регулировочные характеристики $f(I)$ или $t_{OT}(I)$. Их можно получить из выходных и входных характеристик путем определения зависимостей f или t_{OT} от тока I при различных постоянных значениях $U_{вх}$ и $U_{вых}$.

Естественные характеристики импульсных преобразователей не во всех случаях пригодны для электрической тяги. Поэтому при импульсном

управлении путем автоматического регулирования формируют различные тяговые и тормозные характеристики. Для любой из них должны быть предварительно определены необходимые выходные, входные и регулировочные характеристики.

При регулировании на постоянство напряжения двигателей $U = \text{const}$ оно поддерживается в пределах, определяемых его допустимыми отклонениями при регулировании. Практически легко осуществить характеристику $U(I)$ с отклонениями напряжения от его значения при часовом токе, не превышающими $\pm 5\%$, в пределах изменений тока двигателя от 0 до $2I_q$. При этом характеристика $U(I)$ может быть принята прямолинейной и выражена уравнением

$$U = U_q [1 - (I - I_q)/(2I_q)], \quad (3.30)$$

где U_q и I_q — соответственно выходное напряжение и ток при часовом режиме.

После того как установлена характеристика $U(I)$, скорость поезда v при любом токе рассчитывают по формуле (3.28) для тягового режима и (3.29) — для рекуперативного. Силу тяги и тормозную силу рассчитывают по электромеханическим характеристикам ТЭД. Построение регулировочных характеристик при тяге и при рекуперации выполняют на основании кривых $U(I)$ по методике, приведенной в разделах 3.1 и 3.2.

В случае регулирования по закону $V = \text{const}$ скоростные характеристики $V(I)$ можно принять в виде прямых линий, наклон которых к оси абсцисс определяется статизмом системы управления. При отсутствии данных о схеме и параметрах системы управления допустимо принять, как и для регулирования на $U = \text{const}$, отклонения скорости от ее значения при часовом токе $\pm 5\%$ в пределах от $I = 0$ до $I = 2I_q$.

При расчете выходных и входных характеристик в случае регулирования на постоянство скорости для каждой скоростной характеристики следует задаться несколькими значениями тока I ,

определить соответствующие им скорости и рассчитать по формуле (3.26) выходное напряжение, а по формуле (3.27) — входное. На основании рассчитанных таким образом выходных и входных характеристик строят регулировочные характеристики.

Основная часть входного при рекуперации и выходного при тяге напряжения определяется э. д. с. двигателя $E = CV\Phi$. В случае мало изменяющейся скорости выходное и входное напряжения должны быть приблизительно пропорциональны магнитному потоку Φ . Следовательно, при двигателях последовательного возбуждения для поддержания постоянства скорости в режиме больших токов двигателя, а значит, и больших магнитных потоков приходится значительно повышать напряжение. Поэтому может оказаться более целесообразным обеспечить высокую жесткость характеристик не регулированием напряжения, а применением независимого возбуждения. Импульсное управление следует использовать при этом для поддержания постоянства напряжения двигателей независимо от напряжения контактной сети. При такой системе управления устраняются главные недостатки классической системы независимого возбуждения, так как отсутствуют колебания напряжения, подводимого к тяговым двигателям, и можно обеспечить хорошее распределение нагрузок между ними, если питание к каждой группе последовательно включенных двигателей подводить от отдельного импульсного преобразователя или от разных фаз преобразователя. Возможно поддерживать практически постоянную скорость одновременным регулированием напряжения двигателей и тока независимого возбуждения.

Автоматическое регулирование на постоянство пускового или тормозного тока двигателя может оказаться удобным для моторвагонной тяги. В этом случае, чтобы улучшить условия регулирования скорости в условиях ограничения по сцеплению, следует применять системы, в которых допускаются большие отклонения — порядка $\pm 10\%$ среднего тока в пределах от скорости, равной нулю, до максимальной, т. е. целесообразно

уменьшение тока при максимальной скорости на **20%** по сравнению с его значением в момент строгания. Расчет выходных, входных и регулировочных характеристик ведется так же, как и при регулировании на $V = const$.

Ток, потребляемый из контактной сети, при всех системах регулирования определяется формулами (3.7) и (3.8), а ток, отдаваемый в сеть при рекуперации, — (3.14) и (3.17). Эти токи можно рассчитать также по скорости и силе тяги в режиме тяги

$$I_1 = FV / (3,6\eta_D\eta_{np}U_1); \quad (3.31)$$

или тормозной силе при рекуперации

$$I_1 = BV\eta_p\eta_{np} / (3,6U_1), \quad (3.32)$$

где η_D и η_p — к. п. д. двигателя соответственно в тяговом и рекуперативном режимах;

η_{np} — к. п. д. импульсного преобразователя.

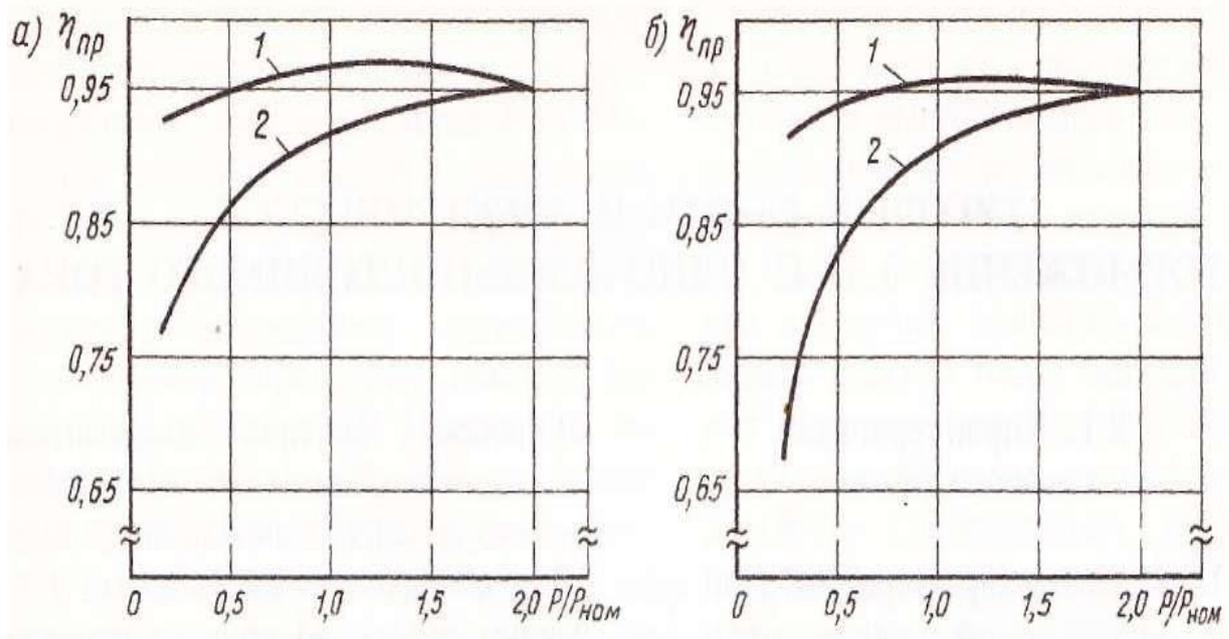


Рисунок. 3.15. КПД импульсного преобразователя для режимов тяги (а) и рекуперации (б)

Независимо от параметров, по которым ведется регулирование, характеристики э. п. с. должны быть ограничены предельно допустимыми режимами. Это в основном ограничения по наибольшему допустимому напряжению и наибольшему допустимому току, определяемому мощностью тягового двигателя и преобразователя, или условиями сцепления. На диаграммах $F(V)$ их изображают скоростными характеристиками при наибольшем напряжении и с ограничениями по максимальным токам. Между этими ограничивающими линиями возможны любые характеристики, определяемые системой управления импульсного преобразователя.

Коэффициент полезного действия при импульсном управлении равен произведению к. п. д. η_D двигателя и к. п. д. преобразователя $\eta_{пр}$. Расчет потерь в преобразователе, необходимый для определения его к. п. д., представляет значительные трудности, и для его выполнения должны быть известны параметры всех элементов преобразователя. Однако зависимости к. п. д. от нагрузки для различных правильно сконструированных импульсных преобразователей э. п. с. постоянного тока отличаются незначительно, — как правило, не больше чем на $1-2\%$. Поэтому допустимо пользоваться приведенными на рисунке 3.15 средними значениями к. п. д. импульсных преобразователей при разных нагрузках для режима тяги (рисунок. 3.15, а) и рекуперации (рисунок. 3.15, б). Здесь кривые 1 соответствуют $U = U_{ном}$ и $I = var$, а кривые 2 пусковому току $I = 2I_{\text{ч}}$ и $U = var$.

Глава 4. Математическая модель для расчета квазистационарных процессов импульсного регулирования

4. 1. Двухзонное регулирование тяговых электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения

Тяговые электродвигатели постоянного тока последовательного возбуждения регулируются по двухзонному принципу [1] согласно универсальным характеристикам, показанным на рисунке 4. 1, а. При этом в зоне 1 поддерживают пусковой ток на уровне заданного значения I_3 путем постепенного повышения напряжения на двигателе U_d при постоянном коэффициенте регулирования возбуждения $\beta = 1$. В следующей зоне 2 при номинальном напряжении на двигателе $U_d = U_{ном}$ постепенно снижают β до β_{min} при $I = I_{min}$. Далее разгон тягового электропривода осуществляется по естественной характеристике **ОВ**.

В зоне 1 имеем постоянный вращающий момент $M_3 = M_{33}$ и, соответственно, постоянную силу тяги локомотива или моторного вагона, а в зоне 2 вращающий момент и сила тяги постепенно снижаются, как показано на (рисунок. 4. 1, а) в левой полуплоскости. Поскольку в этой зоне при стабилизированном тока якоря $I_я = I_3$; ток возбуждения снижается в соответствии с выражением $I_в = I_я \cdot \beta$. Это примерно соответствует снижению коэффициента сцепления колесных пар с рельсами в функции скорости $V[2]$.

При практической реализации этой диаграммы учитывают динамический фактор, т. е. должно быть исключено скачкообразное приложение силы тяги и соответственно вращающего момента M_3 . Поэтому начиная от момента включения тягового электропривода ток и момент изменяются постепенно, примерно линейно в функции времени, как показано на (рисунок. 4. 1, а) штриховыми линиями.

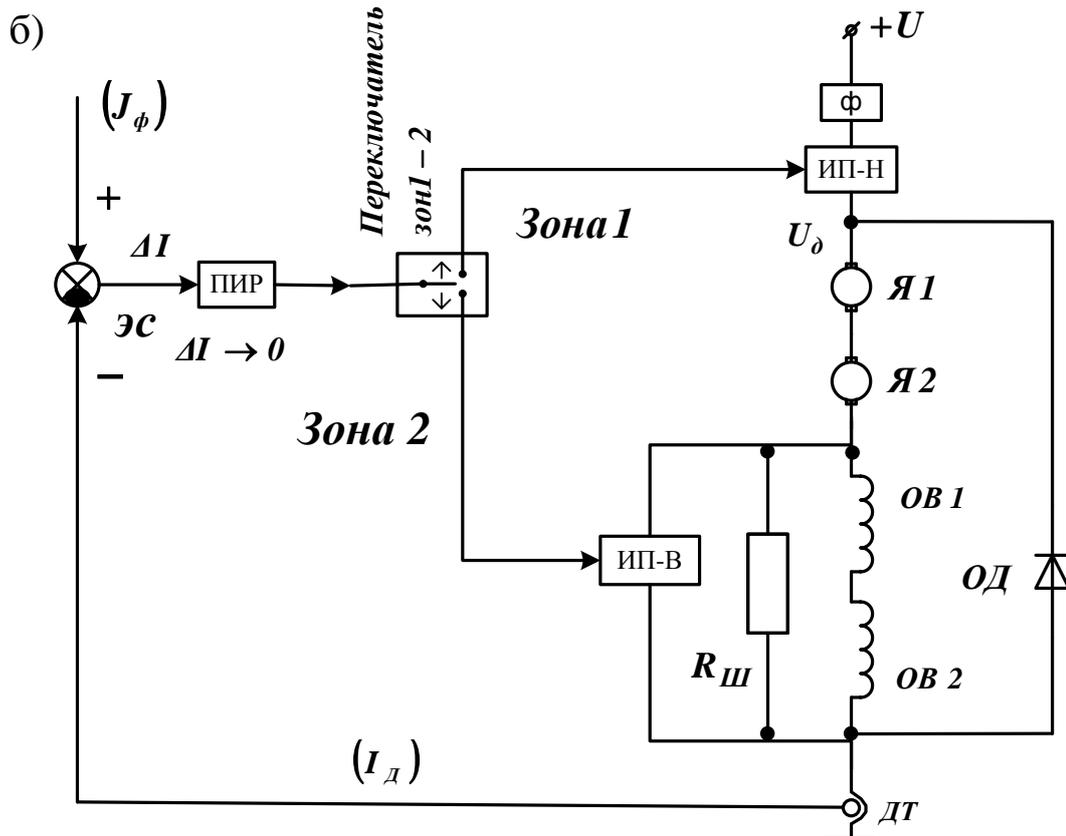
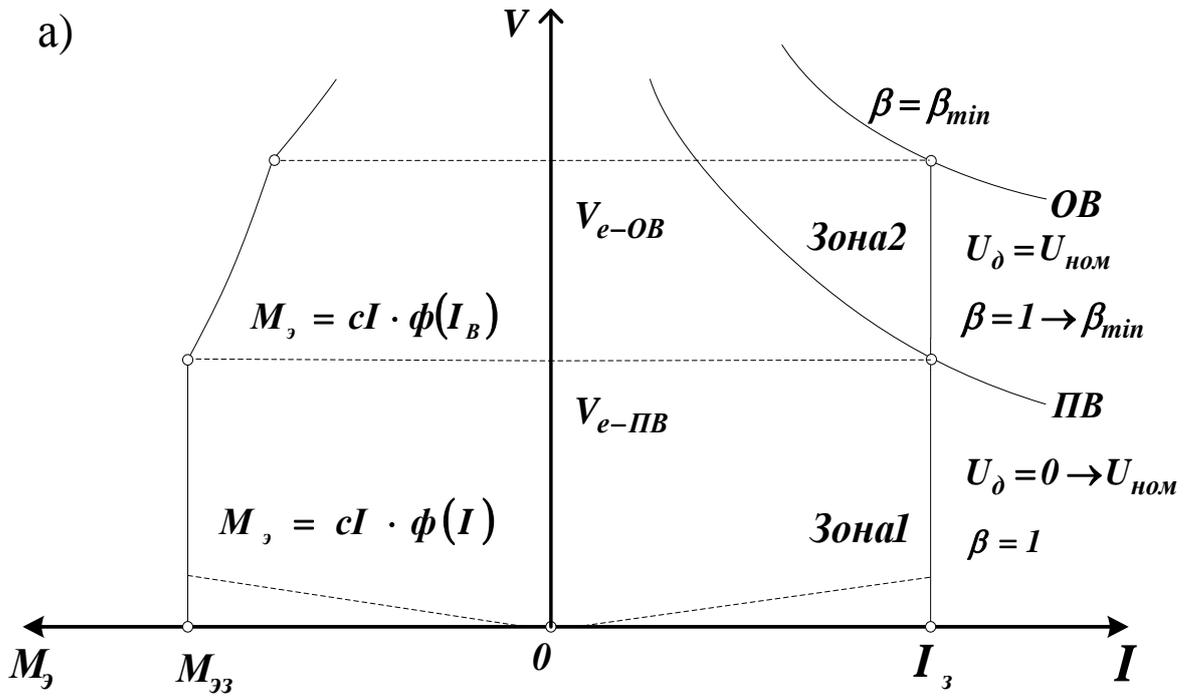


Рисунок. 4.1. Принцип двухзонного регулирования ТЭД (а) и его схемная реализация (б)

На большинстве эксплуатируемых электровозов и электропоездов постоянного тока двухзонное регулирование осуществляют при помощи реостатов со ступенчатым изменением сопротивления. При этом основной реостат включают в цепь двигателя со стороны токоприемника, а дополнительный реостат - параллельно обмоткам возбуждения. Аналогично, при импульсном регулировании необходимы два исполнительных элемента (рисунок. 4. 1, б), а именно

- высоковольтный импульсный преобразователь питающего напряжения ИП-Н, реализующий регулирование в зоне 1, т.е. в диапазоне скоростей

$$0 < V \leq V_{e-ПВ} ; \quad (4.1)$$

- низковольтный импульсный преобразователь ИП-В, реализующий ослабление возбуждения в зоне 2, т.е. в диапазоне скоростей

$$V_{e-ПВ} < V \leq V_{e-ОВ} . \quad (4.2)$$

Такая структура реализована на вагонах метро типов E_{II} и на электропоездах 3 кВ типов ЭР-200 и ЭМ2И. Если при реостатном регулировании процесс пуска автоматизируют при помощи простейшего реле ускорения, то при импульсном регулировании используют более совершенную систему двухконтурного регулирования. На рисунке 4. 1, б показан внутренний контур этой системы, содержащий:

- датчик тока $ДТ$, включенный в цепь $TЭД$;
- элемент сравнения ЭС для вычисления рассогласования

$$\Delta I = I_z - I_\phi ; \quad (4.3)$$

- пропорционально-интегральный регулятор, выполненный по типовой схеме линейного интегрирующего звена; $ПИР$ обеспечивает закон регулирования $\Delta I \rightarrow 0$;
- переключатель зон, который коммутирует выход $ПИР$ на вход управления $ИП-Н$ при $U_\delta < U_n$ (зона 1) или на управляющий вход $ИП-$

B при $U_{\partial} = U_n$ (зона 2). Таким образом, при пуске ТЭД преобразователи ИП-Н и ИП-В срабатывают последовательно.

Для комплексного расчета тягового электропривода с системой стабилизации тока ТЭД по рисунку 4.1, б необходимы регулировочные и пульсационные характеристики, т.е. зависимости средних значений токов I_D и I_B , а также их пульсаций от коэффициента заполнения k импульсного цикла, показанные в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Регулировочные и пульсационные характеристики при двухзонном регулировании ТЭД

Зона	Регулировочная	Пульсационная
1	$U_D(k); I_D(k)$	$\Delta I_D(k); \frac{\Delta I_D}{I_D}(k)$
2	$I_B(k); \beta(k)$	$\Delta I_B(k); \frac{\Delta I_B}{I_B}(k)$

4.2. Математическая модель для расчета процесса импульсного регулирования тяговых электродвигателей в зоне 1

Импульсное регулирование электродвигателей постоянного тока является прогрессивным техническим решением, которое в специфических условиях электрической тяги, особенно в условиях пригородного сообщения, метро и городского наземного транспорта, позволяет практически полностью исключить пусковые и тормозные потери. Этот вид регулирования реализуется импульсным прерывателем **ИП**, который включают в цепь электропитания тягового электродвигателя ТЭД последовательного возбуждения, причём **ИП** работает совместно с обратным диодом **ОД**. Характерные эквивалентные схемы для режимов тяги, рекуперативного и реостатного торможения показаны на рисунке 4.2. В их состав обязательно входит **ИП**, работающий по условиям электромагнитной совместимости с постоянной частотой $f = 1/T$, где T период регулирования (при

выполнении *ИП* на однооперационных тиристорах, как показано на рисунке 4.2, или на запираемых тиристорах *GTO*). Частоту f по условиям электромагнитной совместимости обычно принимают равной 400 Гц или 2 x 400 Гц (при двухфазных импульсных преобразователях). ТЭД на рисунке 4.2 во всех трех схемах представлен схемой замещения, содержащей следующие компоненты:

- Противо-ЭДС e , которая в дальнейшем будет представлена постоянной величиной E для рассматриваемой скорости движения поезда V ;
- Суммарное активное сопротивление r всех обмоток цепи ТЭД;
- Индуктивность l всех обмоток ТЭД, методика расчета которой с учетом действия вихревых токов и насыщения магнитной системы ТЭД рассмотрена в главе 2. На рисунке (4.2, б, в) условно показано реверсирование ТЭД, т.е. переключение его обмотки возбуждения при переходе в режимы электрического торможения. При этом абсолютное значение l не изменяется.

Кроме источника электропитания U (тяговая сеть постоянного тока 3 кВ на железных дорогах или контактный рельс 750 В в метро), в состав эквивалентных схем входит обратный диод *OD* (рисунок. 4. 2, а, б). В состав схемы реостатного торможения входит силовой реостат R , желательным с регулированием его сопротивления до нуля по мере снижения скорости поезда.

Все схемы по рисунку 4. 2 для квазистационарного режима, т.е. в периодическом импульсном режиме регулирования (стабилизации) тока i_g , ТЭД могут быть описаны идентичными дифференциальными уравнениями первого порядка, которые при определенных допущениях могут быть алгебраизированы, т.е. сведены к линейным алгебраическим уравнениям. Эта процедура иллюстрирована ниже на примере схемы по рисунку 4. 2, а.

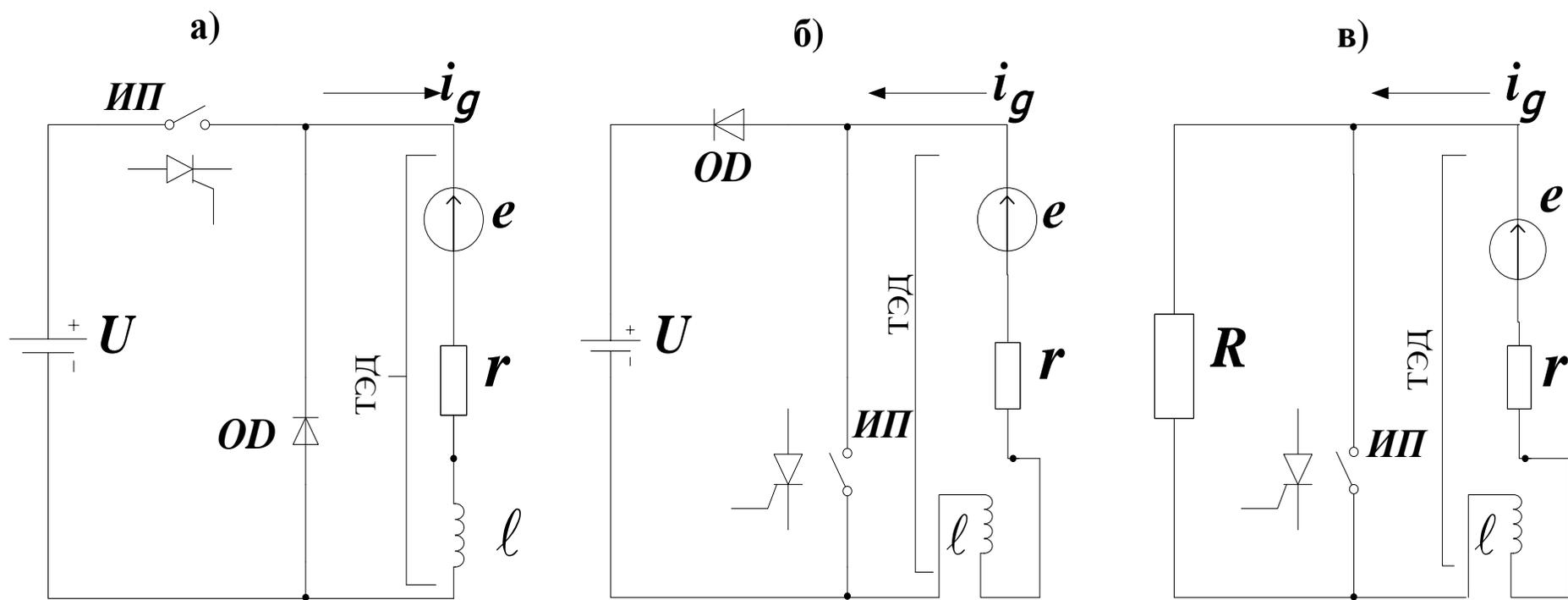


Рисунок. 4. 2. Основные схемы импульсного регулирования ТЭД

а) пуск и регулирование в тяговом режиме;

б) рекуперативное торможение;

в) реостатное торможение

На рисунке 4. 3 показан применительно к квазистационарному режиму линеаризованный электромагнитный процесс для одного периода импульсного регулирования T . Этот период содержит два этапа, соответствующих включенному BKL и выключенному $BЫKL$ состояниям $ИП$. Их длительность равно соответственно kT и $(1-k)T$, где k – коэффициент заполнения импульсного цикла, изменяющийся при пуске $TЭД$ от $k \cong 0$ до $k \cong 1$.

Принимаем следующие допущения:

1. В течение каждого из интервалов импульсного цикла считаем изменение тока i_g линейным в функции времени t , так что на интервалах BKL и $BЫKL$ имеем соответственно

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{\Delta I}{kT} \quad ; \quad \frac{di_g}{dt} = -\frac{\Delta I}{(1-k)T}, \quad (4.4),$$

где ΔI – пульсация тока $TЭД$.

В действительности изменение тока происходит по экспонентам, но при высокой частоте f , т.е. при малых длительностях рассматриваемых интервалов импульсного цикла линеаризация вполне допустима.

2. Противо-ЭДС e считаем постоянной, поскольку при пульсирующем токе возбуждения $TЭД$ его магнитный поток практически полностью сглажен из-за действия вихревых токов, т.е. принимаем $e = E$.
3. Падение напряжения на активном сопротивлении r из-за небольших пульсаций ΔI тока i_d в цепи $TЭД$ можно считать приблизительно пропорциональным среднему току I , т.е.

$$ri \cong rI. \quad (4.5)$$

При этом расчетная процедура может быть представлена в виде следующих этапов, показанных в таблице 4. 2:

Этап I сводится к записи исходных дифференциальных уравнений для каждого интервала импульсного цикла BKL и $BЫKL$.

Этап II заключается в преобразовании этих уравнений в линейные алгебраические на основе использования допущений 1-3. Неизвестными в этих уравнениях являются среднее значение тока I и пульсация ΔI .

Этап III Путем решения линейных алгебраических уравнений получаем выражения для расчета I и ΔI . Они приведены в последней строке таблице 4.2.

Аналогичные этапы имеют место для схем рекуперативного и реостатного торможения (рисунок. 4.2,б и рисунок. 4.2,в). Они иллюстрируются в соответствующих столбцах таблице 4. 2. Формулы для среднего значения пускового или тормозного тока показывают, что его регулирование возможно в любом диапазоне, если $0 \leq k \leq 1$. Однако, для схемы рекуперативного торможения (рисунок. 4.2,б) устойчивость обеспечивается только при условии

$$(E - Ir) < U, \quad (4.6)$$

что имеет место только в зоне средних и низких скоростей электропоезда. В зоне высоких скоростей обеспечить устойчивость импульсного регулирования можно:

- Снижением E путем ослабления возбуждения $TЭД$;
- Введением дополнительного резистора, т.е. фактически увеличением r за счёт внешнего фактора.

Однако, второй способ сопряжен со значительным увеличением E , так что необходима предварительная проверка потенциальных условий на коллекторе $TЭД$. Ослабление возбуждения более предпочтительно; поэтому оно всегда используется в классических схемах электрического торможения. При этом в системе регулирования кроме ограничений по току I для якорных обмоток $TЭД$ и по напряжению $U_{max}=3800 \text{ В}$ на токоприемнике учитывают также ограничение по соотношению токов возбуждения и якоря $TЭД$: должно быть $I_B/I_J = (0,3 \div 0,5)$. Процессы ослабления возбуждения рассмотрены в следующих разделах.

Особенность рассматриваемых тормозных режимов состоит в том, что заданное значение тормозной силы по мере замедления электропоезда сохраняется до определенной скорости – обычно до **6-8 км/ч**. Для торможения до остановки необходимо реализовать плавный переход на пневматическое торможение; возможно также и электрическое торможение в режиме противовключения *ТЭД*.

Более серьёзная проблема связана с пульсациями тока *ТЭД*. Их амплитуду определяют по формулам, приведённым в последней строке таблицы 4.2. Обычно при $f = 400$ или 800 Гц собственной индуктивности *ТЭД* недостаточно для сглаживания пульсаций тока; тогда последовательно в цепь *ТЭД* дополнительно вводят сглаживающий реактор. Его индуктивность рассчитывают на основе предельно допустимой амплитуде пульсаций $\Delta I_{\text{дон}}$ по формуле

$$L_{\text{ср}} = \frac{4\Delta I_{\text{дон}}}{\omega T} - l . \quad (4.7)$$

Пульсации тока *ТЭД* являются лимитирующим фактором в системе импульсного регулирования. В расчётах этих систем нужно учитывать закон изменения ΔI от k , т.е. зависимости, приведенные в последней строке таблицы 4.2. Характерно, что для схем пуска и рекуперации (рисунок. 4.2, а,б) эти зависимости имеют максимум при $k = 0,5$, а в схеме реостатного торможения указанный максимум смещен ближе к $k \approx 1$. В последнем случае желательно по мере снижения скорости электропоезда ступенями снижать значение R (достаточно $1 \div 2$ ступени).

В перспективе кардинальное решение проблемы импульсного регулирования достигается повышением частоты *ИП*, что вполне возможно на базе силовых транзисторов *IGBT*. При $f = 1 \div 1,5 \text{ кГц}$ уже нет необходимости в сглаживающем реакторе $L_{\text{дон}}$, но при этом нужно учесть дополнительные потери от повышения частоты в *ИП*, обмотках *ТЭД* и даже в проводном монтаже.

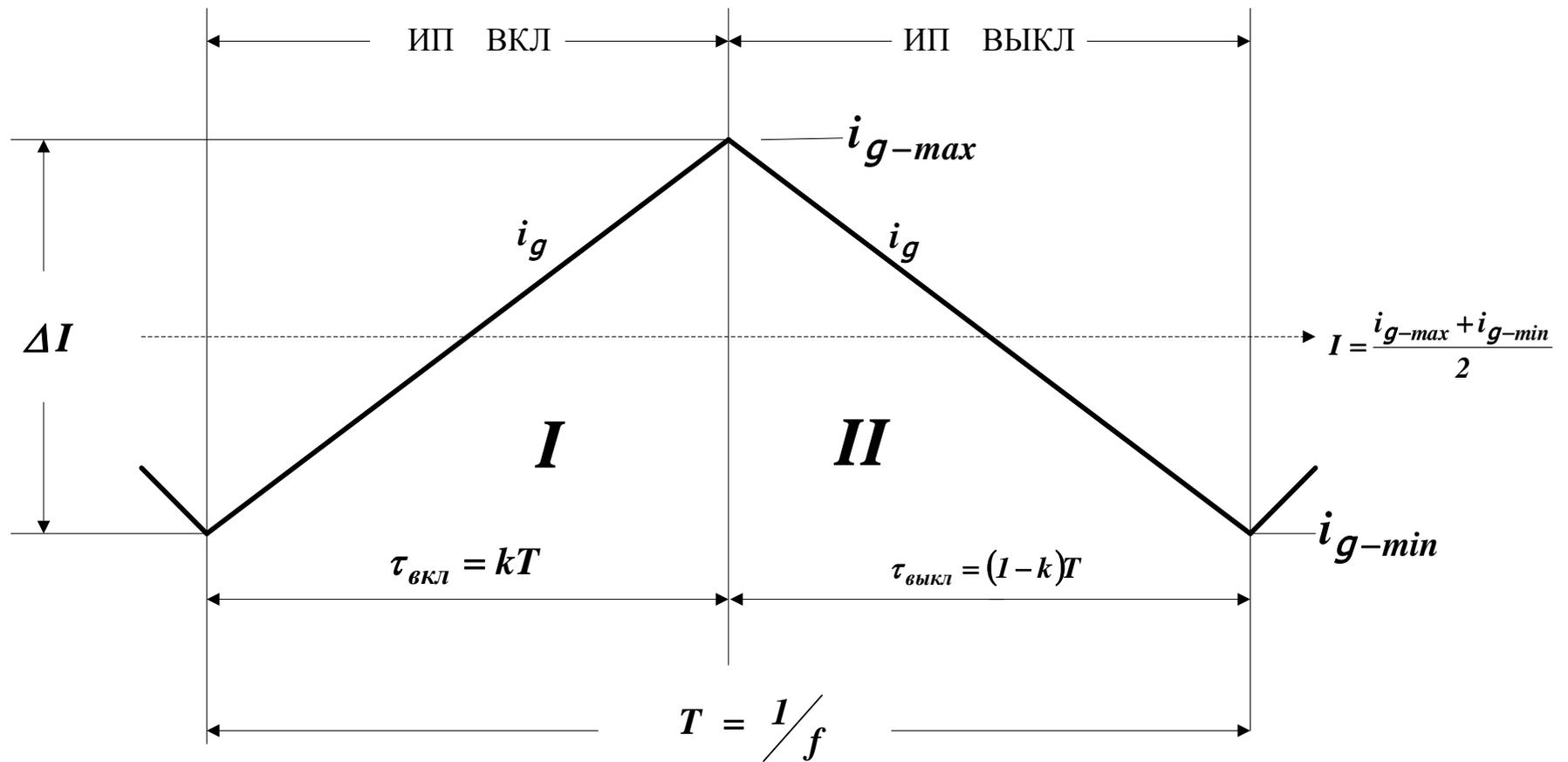


Рисунок.4.3. Пульсации тока ТЭД при импульсном регулировании

Таблица. 4. 2. Основные расчётные формулы для схем тяги, рекуперативного, реостатного торможения тяговых электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения, при импульсном регулировании

уравнения	ИП	Рисунок.4.2,а	Рисунок.4.2,б	Рисунок.4.2,в
Исходные дифференциальные уравнения (Этап I)	ВКЛ	$l \frac{di}{dt} + ri = U - E$	$l \frac{di}{dt} + ri = E$	
	ВЫКЛ	$l \frac{di}{dt} + ri = E$	$l \frac{di}{dt} + ri = E - U$	$l \frac{di}{dt} + (r + R)i = E$
Алгебраические уравнения (Этап II)	ВКЛ	$l \frac{\Delta I}{kT} + rI = U - E$	$l \frac{\Delta I}{kT} + rI = E$	
	ВЫКЛ	$-l \frac{\Delta I}{(1-k)T} + rI = E$	$l \frac{\Delta I}{(1-k)T} + rI = E - U$	$l \frac{\Delta I}{(1-k)T} + (r + R)I = E$
Решение (Этап III)	$I =$	$(Uk - E)/r$		$E/(R(1-k) + r)$
	$\Delta I =$	$UTk(1-k)/l$		$ETk(1-k)/l((1-k) + r/R)$

Таким образом, импульсное регулирование позволяет существенно улучшить тягово-энергетические характеристики электропоездов постоянного тока за счёт практически полного исключения пусковых и тормозных потерь. Однако, лимитирующим фактором при импульсном регулировании тяговых электродвигателей являются пульсации тока, которые должны быть ограничены на предельно допустимом уровне введением дополнительной индуктивности или повышением частоты.

4.3. Модель квазистационарного режима при импульсном регулировании процесса ослабления возбуждения (зона 2)

Детальные исследования систем ослабления возбуждения выполнены в диссертационных работах Вейцмана Л. Ю., Феоктистова В. П., Дудченко Д. Н.. Известны и широко применяются две основные схемы импульсного регулирования тока возбуждения *ТЭД*. На рисунке 4.4,а показана схема, в которой импульсный прерыватель *ИП* включен параллельно обмотке возбуждения *ОВ*; аналогичным образом к *ОВ* подключено шунтирующее (демпфирующее) сопротивление $R_{ш}$. Такая система широко используется на вагонах метро – в тяге и электрическом торможении.

На рисунке 4.4,б представлена схема с двумя *ИП*, т.е. *ИП1* и *ИП2*(ЭР200). Для современных двигателей характерно существенное расширение зоны ослабления возбуждения, т. е. зоны 2 (см. рисунок. 4.1,а). Например, двигатели мотор-вагонных электропоездов мощностью на ось 200-250 кВт имеют $\beta_{min} = 0,19$, а двигатели электровозов при мощности на ось до 1000 кВт имеют $\beta_{min} = 0,4 - 0,5$. При столь глубоком ослаблении возбуждения обычно применяемая схема ступенчатого реостатного шунтирования обмотки возбуждения в сочетании с индуктивным шунтом не может быть признана эффективной. На новом и модернизируемом электроподвижном составе целесообразно использовать плавное ослабление возбуждения при помощи низковольтных импульсных преобразователей *ИП* (рисунок. 4.4,а,б) в сочетании с электронной микропроцессорной системой

стабилизации $I_{я}$ [2], показанной на рисунке 4.1,б. Эти схемы хорошо зарекомендовали себя на скоростных электропоездах ЭР200 и на вагонах метро типов И и Яуза, а схема по рисунку 4.4,а – на всех вагонах метро традиционного исполнения с реостатным торможением.

Соответствующие диаграммы электромагнитных процессов для обеих схем представлены также на рисунке 4.4 при допущении о линейности изменения в функции времени тока i_{ϵ} в обмотке возбуждения, как это обычно принимают при расчетах систем импульсного регулирования. Ток якорной обмотки $I = I_{я}$ принимаем постоянным, поскольку даже при пульсациях тока возбуждения i_{ϵ} магнитный поток Φ двигателя остается практически идеально сглаженным из-за действия вихревых токов в остове двигателя. Кроме того, действие вихревых токов должно быть учтено через коэффициент демпфирования k_{δ} [3]. Так что индуктивность обмотки возбуждения можно принять равной $l_{\epsilon} \approx k_{\delta} l_{\epsilon 0}$, где $l_{\epsilon 0}$ – статическое значение индуктивности, определяемое дифференцированием паспортной кривой намагничивания $\Phi(I_{\epsilon})$. Зависимости $k_{\delta}(f)$ для серийных тяговых электродвигателей постоянного тока имеются в работах [3,4] и рассмотрены в главе 2. Ниже приведена методика расчета квазистационарного процесса импульсного регулирования тока возбуждения тягового двигателя для схем по рисунку 4.4.

Имеются два варианта реализации схем импульсного ослабления возбуждения по рисунку 4.4: более простым является вариант $R_{д} = 0$, но при $R_{д} > 0$ можно реализовать некоторые дополнительные преимущества (второй вариант). Ниже рассмотрен первый вариант, а второй вариант проанализирован в следующем разделе.

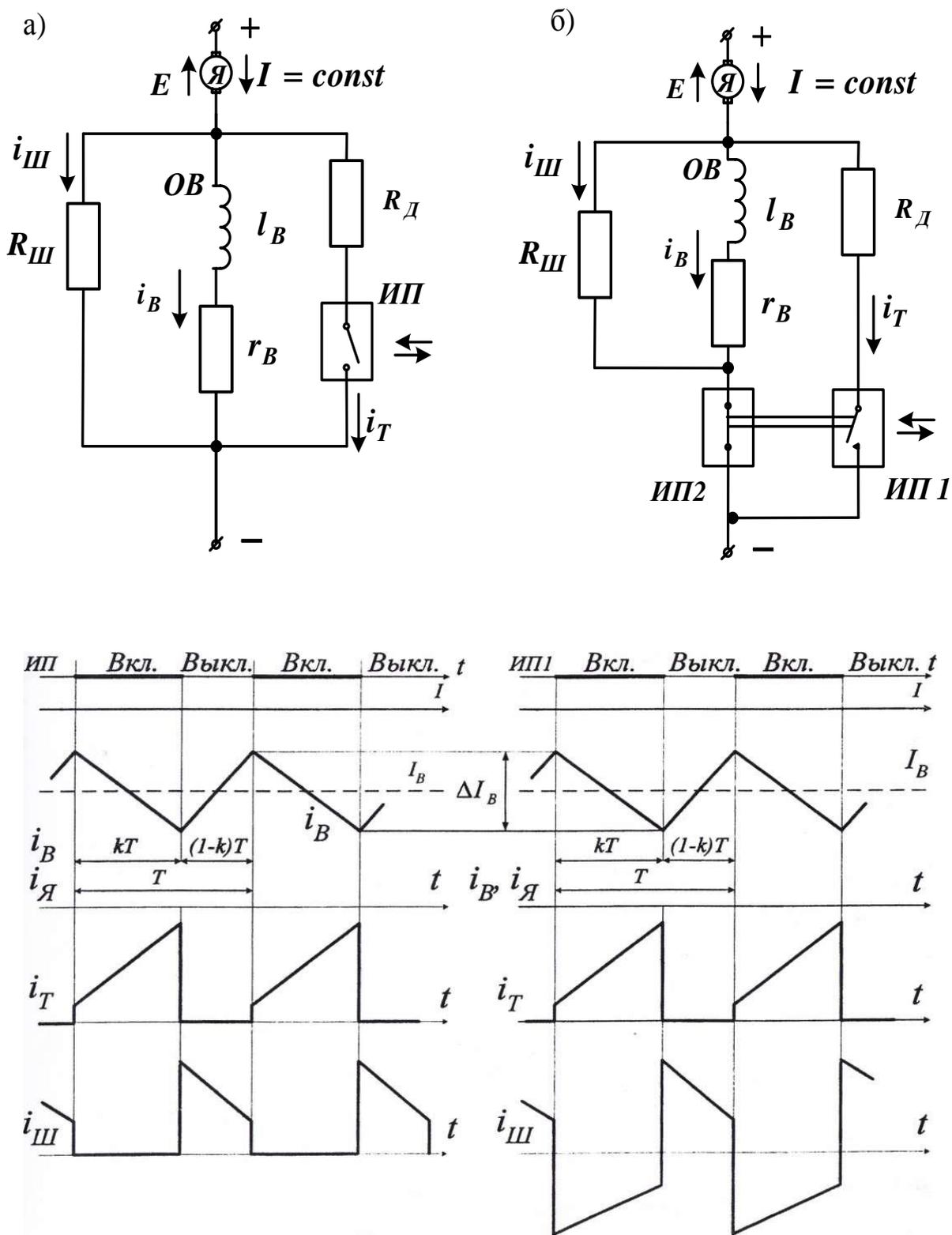


Рисунок. 4. 4. Схемы импульсного регулирования тока возбуждения i_B (а, б) и их линеаризованные импульсные диаграммы

Принятые при этом допущения аналогичны допущениям, сформулированным в разделе 4.2. Они позволяют достаточно просто рассчитать параметры квазистационарного процесса регулирования возбуждения. Соответствующая методика одностипна для обеих рассматриваемых схем.

Для схемы по рисунку 4.4,а при $R_D = 0$ имеем исходную систему линейных дифференциальных уравнений первого порядка (этап 1)

$$\begin{cases} l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = 0 \dots\dots\dots \text{ИП} \dots \text{вкл.} \\ l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = (I - i_B) R_{III} \dots\dots\dots \text{ИП} \dots \text{выкл.} \end{cases} \quad (4.8)$$

Для их решения упомянутое выше допущение о линейности изменения тока i_B в каждом из характерных интервалов импульсного цикла запишем в виде:

Допущение 1:

$$\frac{di_B}{dt} = \begin{cases} -\frac{\Delta I_B}{kT} \dots\dots\dots \text{ИП} \dots \text{вкл} \\ \frac{\Delta I_B}{(1-k)T} \dots\dots\dots \text{ИП} \dots \text{выкл.} \end{cases} \quad (4.9)$$

Кроме того принимаем:

Допущение 2: ввиду небольшой амплитуды пульсаций тока ΔI_B можно заменить мгновенное значение i_B его средним значением I_B .

С учетом этих допущений дифференциальные уравнения можно записать в форме линейных алгебраических уравнений (этап 2)

$$\begin{cases} -l_B \frac{\Delta I_B}{kT} + r_B I_B = 0 \dots\dots\dots \text{ИП} \dots \text{вкл.} \\ l_B \frac{\Delta I_B}{(1-k)T} + r_B I_B = (I - I_B) R_{III} \dots\dots\dots \text{ИП} \dots \text{выкл.} \end{cases} \quad (4.10)$$

В результате их решения для схемы рисунок 4.4,а получим пульсационную характеристику (этап 3)

$$K_{i_B} = \frac{\Delta I_B}{I_B} = \frac{k r_B T}{l_B}. \quad (4.11)$$

и регулировочную характеристику для коэффициента ослабления возбуждения (этап 3)

$$\beta = \frac{I_B}{I} = \left[\frac{r_B}{(1-k)R_{III}} + 1 \right]^{-1}. \quad (4.12)$$

Эти характеристики в графической форме показаны на рисунке 4.5 сплошными линиями. Важно отметить, что регулировочная характеристика $\beta(k)$ существенно нелинейна. Производная $d\beta/dk < 0$ и ее абсолютное значение $\left| \frac{d\beta}{dk} \right|$ быстро растет с увеличением k .

Аналогичным образом для схемы по рисунку 4.4,б при $R_D = 0$ имеем исходную систему дифференциальных уравнений (этап 1)

$$\begin{cases} l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = (I - i_B) R_{III} \dots \dots \dots \text{ИП2} \dots \text{вкл.} (\text{ИП1} \dots \text{выкл.}) \\ l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B + R_{III} i_B = 0 \dots \dots \dots \text{ИП1} \dots \text{вкл.} (\text{ИП2} \dots \text{выкл.}) \end{cases} \quad (4.13)$$

При тех же допущениях ее решение дает пульсационную и регулировочную характеристики (этап 3)

$$K_{i_B} = \frac{\Delta I_B}{I_B} = \frac{r_B R_{III} k (1-k) T}{l_B [r_B + R_{III} (1-k)]}, \quad (4.14)$$

$$\beta = \frac{I_B}{I} = \frac{1-k}{\frac{r_B}{R_{III}} + 1}. \quad (4.15)$$

Они показаны на рисунке 4.5 штриховыми линиями. Из сопоставления этих характеристик следует, что схема с одним ИП (рисунок. 4.4,а) обладает существенно нелинейной регулировочной характеристикой (4.5,а). Это осложняет выполнение и функционирование в переходных режимах автоматической системы регулирования тока в базовой схеме по (рисунок.

4.1,б). Недостаток схемы по (рисунок. 4.4, б) состоит в том, что ей свойственны повышенные пульсации тока при $k > 0,5$.

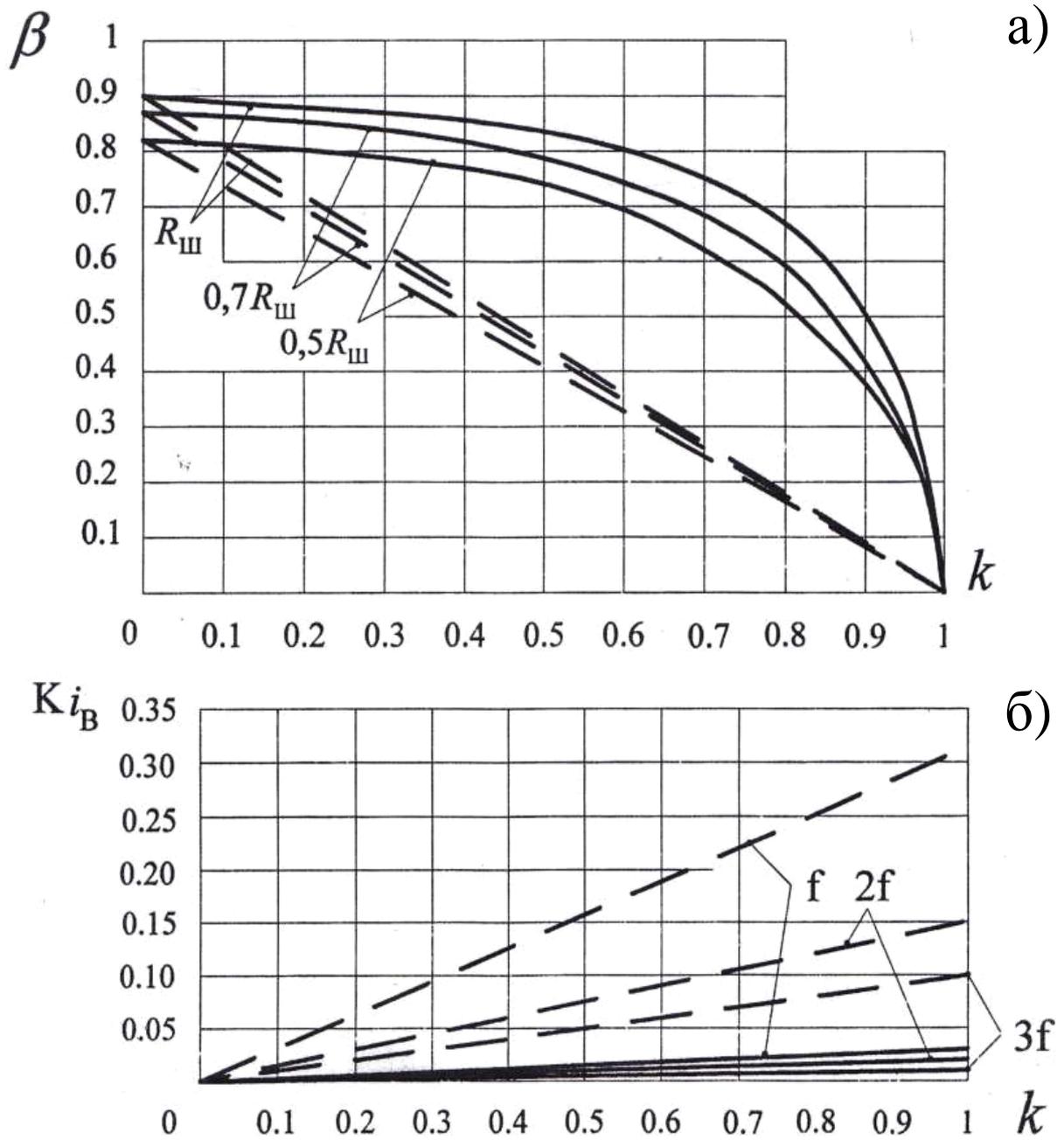


Рисунок. 4. 5. Регулировочные (а) и пульсационные (б) характеристики схем ослабления возбуждения при $R_D = 0$:

- схема по рисунку 4.4,а
- схема по рисунку 4.4, б

Схема по рисунку 4.4,б обладает линейными регулировочными характеристиками $\beta(k)$ – они показаны на рисунке 4.5,а штриховыми линиями. Но для этой схемы характерны большие пульсации тока в начальной и средней фазах регулирования, т.е. при $k < 0,6$ (рисунок. 4.5,б). Достоинство обеих схем по рисунку 4.4 – простота реализации на низковольтных импульсных прерывателях, плавное регулирование $\beta(k)$ при высоком быстродействии, что позволяет не допустить сверхнормативного ослабления возбуждения $\beta < \beta_{min}$, например при скачках напряжения контактной сети, отскоках токоприемника и т.д. Быстродействие импульсных прерывателей позволяет исключить из схемы тягового электропривода индуктивные шунты (ИШ), благодаря чему получаем существенное упрощение и снижение массы электрооборудования.

4. 4. Усовершенствование системы импульсного регулирования возбуждения с целью снижения пульсаций тока

Недостаток системы импульсного регулирования возбуждения ТЭД при всех ее вышеуказанных достоинствах все же связан с наличием пульсаций тока возбуждения, что показано на графиках рисунок 4.5,б. Кроме повышения рабочей частоты ИП (ИП1-ИП2), например при переходе на силовые транзисторы IGBT, возможен переход на непрерывный безимпульсный режим ослабления возбуждения при достижении β_{min} . Для этого в схемы по рисунку 4.4 нужно ввести дополнительные резисторы R_D ; в результате получаем усовершенствованные схемы, в которых величину R_D определяем, исходя из условий

1. $\beta = \beta_{min}$
2. Все ИП полностью включены.

К расчету R_D при β_{min} . Имеет место коэффициент ослабления возбуждения

$$\beta_{min} = \frac{i_B}{I_a} = \frac{\frac{R_D R_{III}}{R_D + R_{III}}}{r_B + \frac{R_D R_{III}}{R_D + R_{III}}} = \frac{1}{\frac{r_B (R_D + R_{III})}{R_D R_{III}} + 1}, \quad (4.16)$$

откуда получим

$$R_D = \frac{r_B R_{III}}{R_{III} \left(\frac{1}{\beta_{min}} - 1 \right) - r_B}. \quad (4.17)$$

Таким образом, обе схемы по рисунку 4.4 могут быть усовершенствованы введением дополнительного резистора в цепь *III* (*IIII*). Это сглаживает регулировочные и пульсационные характеристики и позволяет при достижении β_{min} полностью включить импульсные преобразователи ($k = 1$) и работать без пульсаций тока возбуждения. Этот вариант может быть рекомендован для электропоездов, которые имеют редкие остановки (ЭКСПРЕСС, Аэроэкспресс, РЭКС, Спутник), а также для пассажирских и грузовых электропоездов.

По изложенной выше методике может быть записана исходная система дифференциальных уравнений для схемы рисунок (4.4,а) с добавочным сопротивлением $R_D > 0$:

$$\begin{cases} l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = (I - i_B) R_{III} \dots \dots \dots \text{ИП} \dots \text{выкл.} \\ l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = (I - i_B) \frac{R_D R_{III}}{R_D + R_{III}} \dots \dots \dots \text{ИП} \dots \text{вкл.} \end{cases} \quad (4.18)$$

и получено при тех же допущениях ее решение в виде

$$K_{i_B} = \frac{r_B R_{III} k (1 - k) T}{l_B [R_D + R_{III} (1 - k)]}, \quad (4.19)$$

$$\beta = \frac{R_D + R_{III} (1 - k)}{R_D \left(\frac{r_B}{R_{III}} + 1 \right) + r_B + R_{III} (1 - k)}. \quad (4.20)$$

Аналогично для схемы рисунок 4.4,б при $R_D > 0$ может быть записана исходная система дифференциальных уравнений (схема с двумя ИП) с добавочным сопротивлением $R_D > 0$:

$$\begin{cases} l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = (I - i_B) R_{III} \dots \dots \text{ИП2} \dots \text{вкл.} (\text{ИП1} \dots \text{выкл.}) \\ l_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B + R_{III} i_B = I R_D \dots \dots \text{ИП1} \dots \text{вкл.} (\text{ИП2} \dots \text{выкл.}) \end{cases} \quad (4.21)$$

и получено ее решение в виде

$$K_{i_B} = \frac{\left(1 - \frac{R_D}{R_{III}}\right) (1 - k) k \left(\frac{r_B}{R_{III}} + 1\right) T}{l_B \left[1 - \left(1 - \frac{R_D}{R_{III}}\right) k\right]}, \quad (4.22)$$

$$\beta = \frac{1 + \left(\frac{R_D}{R_{III}} - 1\right) k}{\frac{r_B}{R_{III}} + 1}. \quad (4.23)$$

Характеристики по этим уравнениям построены на рисунке 4.6. Они являются более сглаженными по сравнению с аналогичными характеристиками по рисунку 4.5 при $R_D = 0$.

В любом варианте импульсное бесконтактное регулирование коэффициента ослабления возбуждения обладает существенными преимуществами по сравнению с классической схемой ступенчатого контакторного реостатного регулирования. Этот вывод справедлив независимо от выполнения регулятора напряжения в зоне 1 по рисунку 4.1,а (контакторно-реостатное или импульсное регулирование). Импульсные преобразователи ИП и ИП1-ИП2 по рисунку 4.2 и рисунку 4.4 являются низковольтными и могут быть выполнены на тиристорах или IGBT-транзисторах низкого класса. При этом можно отказаться от наиболее ненадежных и энерго-массоёмких элементов традиционных систем ослабления возбуждения (реостат, контакторы, индуктивные шунты).

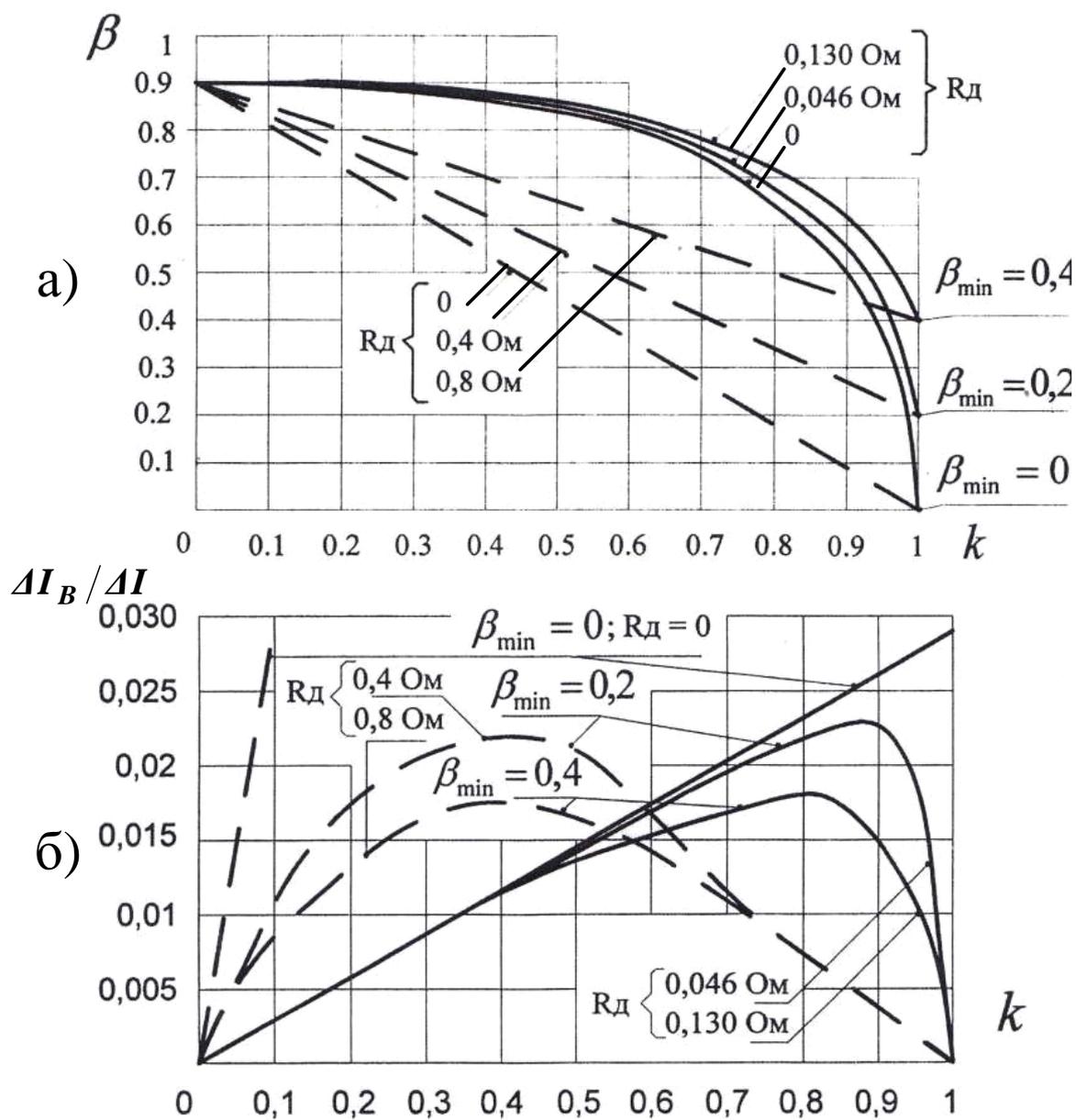


Рисунок. 4. 6. Регулировочные (а) и пульсационные (б) характеристики схемы с $R_D > 0$

- схема по рисунку 4.4,а
- - - - - схема по рисунку 4.4, б

Таким образом, плавное бесконтактное регулирование коэффициента ослабления возбуждения тяговых электродвигателей целесообразно внедрить на всех видах электроподвижного состава с коллекторными тяговыми электродвигателями при питании от контактной сети постоянного или переменного тока. Эскизное проектирование соответствующих тяговых электроприводов и вариантыные расчеты процессов импульсного регулирования рекомендуется выполнять по методике, изложенной в данной главе.

Глава 5. Автоматизация тяговых электроприводов с импульсным регулированием и рекомендации по практическому использованию

5. 1.Обобщенная структура комплексной автоматизации

Для тягового электропривода обычно используют принцип подчиненного регулирования, предусматривая для каждого параметра, подлежащего ограничению или регулированию отдельный контур с соответствующей обратной связью. В рассматриваемой задаче можно выделить два таких параметра:

- ток тяговых электродвигателей $TЭД$ (в режиме тяги или электрического торможения);
- ограничение по скорости движения поезда.

Поэтому система автоматизации (рисунок. 5.1) содержит соответствующие задающие элементы $ЗТ$ ($ЗИ$) и $ЗС$. При помощи их система автоматики тягового электропривода достаточно просто может быть подключена к системе автоведения поезда, а также к устройствам безопасности (АЛСН, КЛУБ-У и др).

На рисунке 5. 1 показан объект регулирования, т. е. поезд, имеющий приведенную массу M , и тяговый двигатель $TЭД$. Они описываются уравнением движения поезда

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F - W}{M}, \quad (5.1)$$

где $\sum F$ - сумма сил тяги, развиваемая всеми $TЭД$;

W - сила сопротивления движению.

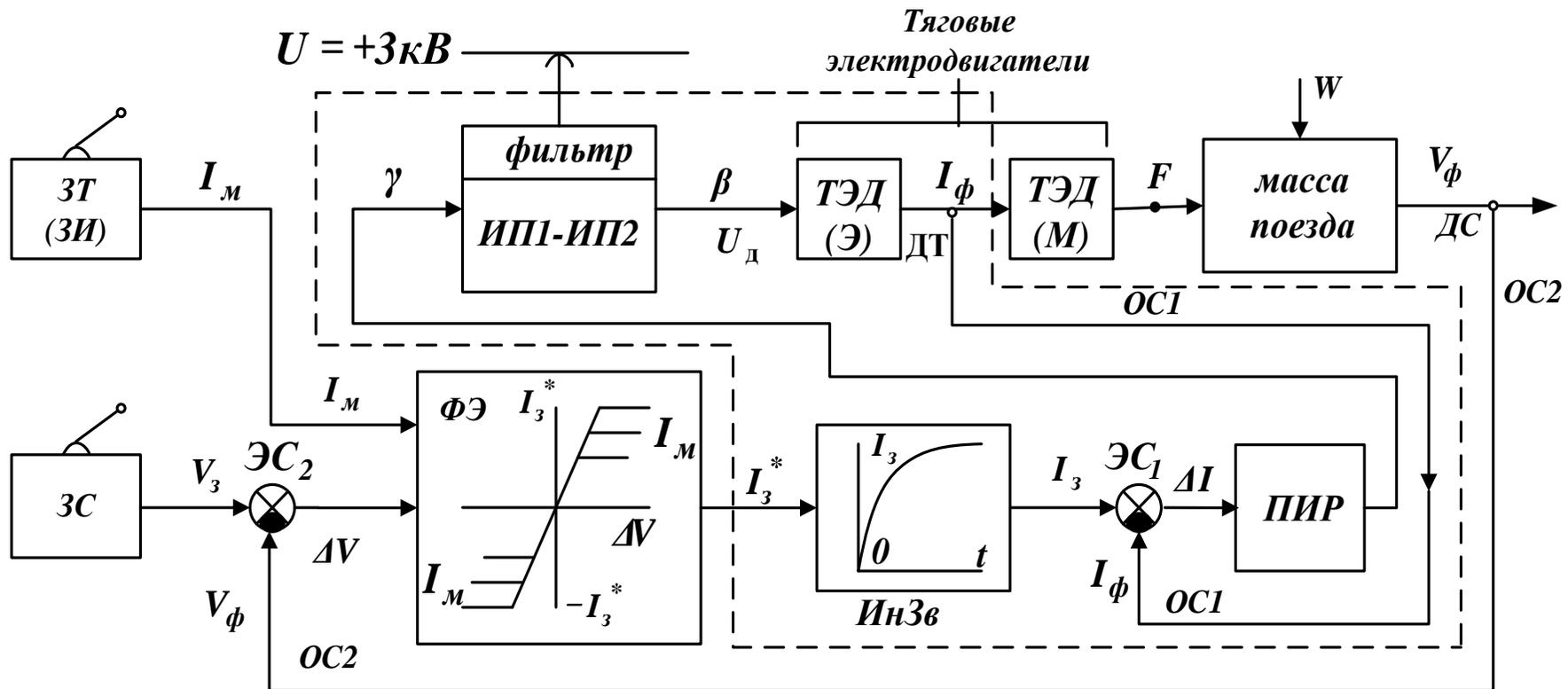


Рисунок. 5. 1. Двухконтурная система автоматического регулирования тягового электропривода с импульсным преобразователем ТИП и тяговыми электродвигателями $ТЭД$ постоянного тока:

$ЗТ(ЗИ)$ – задатчик тока I_m ;

$ЗС$ – задатчик ограничения по скорости v_3

Таблица 5. 1. Развитие элементной базы реализации систем импульсного регулирования тяговых электроприводов

Варианты реализации элементной базы							
Силовая часть			Система управления			Датчики обратной связи	
Одноперационные тиристоры с конденсаторной коммутацией	Запираемые тиристоры серий GTO	Силовые транзисторы серий IGBT	Интегральные микросхемы (ИМС)	Большие интегральные микросхемы (БИС)	Программируемые микропроцессоры	Измерение V, I Датчики типа LEM (эффект Холла)	Измерение частоты вращения n

Исполнительным элементом является импульсный преобразователь *ТИП*, генерирующий напряжение на двигателе $U_d = kU$. Контур регулирования тока содержит *ЗТ (ЗИ)*, линейный регулятор *ЛР*, инерционное звено *И_нЗв*, элемент сравнения *ЭС₁*, датчик тока *ДТ* и пропорционально-интегральный регулятор *ПИР*.

Контур регулирования скорости содержит *ЗС*, датчик фактической скорости *ДС* и элемент сравнения *ЭС₂*. Выход последнего $\Delta V = V_z - V_\phi$ является входной величиной контура регулирования тока.

Такая двухконтурная система была реализована на первых электропоездах с импульсным регулированием ЭР2И и ЭР12. Теория систем многоконтурного регулирования электроприводов общепромышленного назначения с полупроводниковыми преобразователями была развита в работах профессоров Ильинского Н. Ф., Глазенко Т. А., Трахтмана Л. М. Применительно к тяговым электроприводам с импульсными преобразователями эти исследования выполнили профессора Феоктистов В. П., Мазнев А. С., Савоськин А. Н., Калиниченко А. Я.. По мере развития информационных технологий и электроники появились возможности реализации систем управления импульсными преобразователями на программируемых микропроцессорах. Одновременно реализация силовой части преобразователя стала возможной на силовых транзисторах, что облегчает решение задачи совместимости силовой части и системы управления. Эти возможности указаны в таблице 5.1. Ниже рассмотрен конкретный пример такой реализации.

5. 2. Пример реализации двухконтурной системы автоматического регулирования электропоезда с импульсным преобразователем

Имеется несколько проектов, в которых реализовано импульсное регулирование и имеются данные по эксплуатации модернизированных электропоездов. Один из таких проектов – это модернизация электропоездов

ЭР2 на Московском локомотиворемонтном заводе (МЛРЗ) по предложению профессора кафедры «Электрическая тяга» МИИТа Амелина В. М.. Рабочий проект модернизации выполнен ЗАО «Спец-ремонт». Ниже выполнен анализ этой системы с учетом основных алгоритмов, реализованных в микропроцессорной системе регулирования. Использована двухфазная силовая схема тягового электропривода моторного вагона электропоезда, обеспечивающая импульсные режимы пуска и электрического реостатного торможения.

В тяговых режимах предусмотрена реализация автоматического пуска со стабилизацией заданного тока тяговых электродвигателей (ТЭД) и заданной скорости движения. В режиме электрического реостатного торможения предусмотрена стабилизация заданного тормозного тока при последовательном возбуждении тяговых электродвигателей.

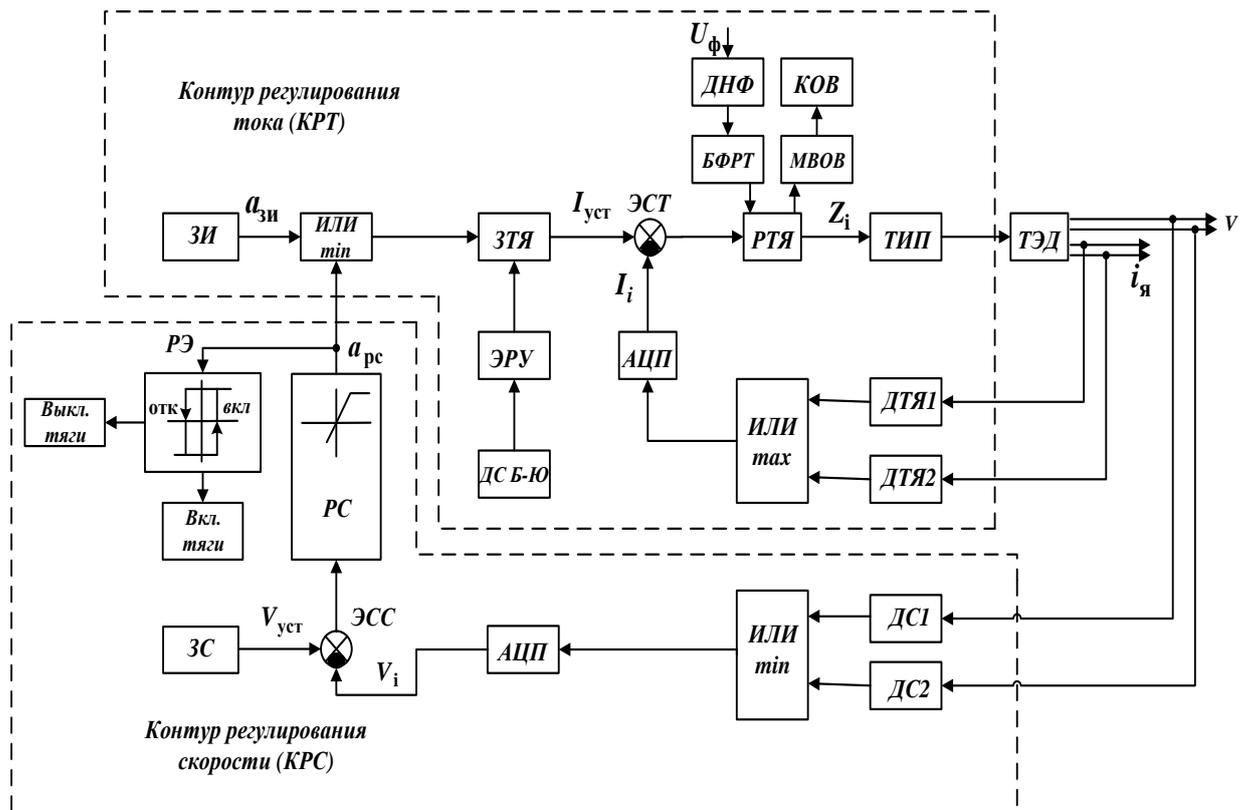


Рисунок. 5. 2. Функциональная схема управления тяговыми и тормозными режимами электропоезда

Функциональная схема *САР* в режиме тяги представляет собой два замкнутых контура: контур регулирования тока якорей (внутренний) и контур регулирования скорости (внешний), как показано на рисунке 5. 2.

Пуск электропоезда осуществляется с заданным пусковым током (пусковым ускорением) под контролем регулятора *РТЯ* тока якорей *ТЭД*. Когда скорость движения достигает заданной величины, регулятор скорости *РС* понижает заданную уставку тока якорей, обеспечивая стабилизацию скорости движения.

РЭ – релейный элемент; *ЭСС* – элемент сравнения сигналов скорости; *ЗТЯ* – задатчик уставки тока якорей *ТЭД*; *ЭРУ* – элемент регулирования уставок тока якорей *ТЭД*; *ДС Б-Ю* – датчики избыточного скольжения (боксования-юзa); *ЭСТ* – элемент сравнения сигналов тока якорей *ТЭД*; *АЦП* – аналого-цифровой преобразователь; *РТЯ* – регулятор тока якорей *ТЭД* (*ПИД*-регулятор); *ТИП* – тиристорные ключи; *ТЭД* – тяговые электрические двигатели; *ДТЯ1*, *ДТЯ2* – датчики тока якорей *ТЭД*; *ДС1*, *ДС2* – датчики скорости; *ДНФ* – датчик напряжения сглаживающего фильтра; *БФРТ* – блок фиксации регулятора тока якорей *ТЭД*; *КОВ* – контактор ослабления возбуждения; *МВОВ* – модуль включения ослабления возбуждения; *ИЛИ-тах* – элемент выбора наибольшего по уровню сигнала. *ИЛИ-min* – элемент выбора наименьшего по уровню сигнала датчиков скорости.

В начальный момент пуска заданный сигнал скорости $V_{уст}$ существенно превышает сигнал обратной связи по скорости V_i . Сигнал рассогласования элемента сравнения сигналов по скорости *ЭСС* максимальный. Регулятор скорости с пропорционально-интегральным законом регулирования плавно увеличивает выходной сигнал от минимального значения, обусловленного пропорциональной составляющей сигнала регулятора с интенсивностью, обеспечивающей нарастание пускового ускорения $0,2 \dots 0,3 \text{ м/с}^3$:

$$a_{pc} = K_1[(V_{уст} - V_{i-1}) + K_2 \sum (V_{уст} - V_{i-1})], \quad (5.2)$$

где индексом i обозначен номер интервала времени на момент включения тиристорных ключей импульсного прерывателя (*ТИП*).

Пропорциональная составляющая сигнала регулятора $K_1(V_{уст} - V_{i-1})$ устанавливает начальное ускорение при трогании поезда $0,2...0,3 \text{ м/с}^3$. Интегральная составляющая ПИ закона регулирования (1) $K_1 K_2 \sum (V_{уст} - V_{i-1})$ обеспечивает интенсивность нарастания пускового ускорения и точность поддержания заданной скорости движения электропоезда. Коэффициент усиления интегратора K_2 представляет собой отношение периода регулирования (функционирования) $\tau_{ИП}$ импульсного прерывателя *ТИП* к постоянной времени $T_{И}$ интегратора, выбираемой на основании механической постоянной времени электропоезда и интенсивности роста пускового ускорения:

$$K_2 = \frac{\tau_{ИП}}{T_{И}}. \quad (5.3)$$

Элемент *ИЛИ-min* избирает меньший по уровню из двух сигналов (в начальный момент пуска электропоезда это сигнал регулятора скорости a_{pc}) и передает его в задатчик уставки тока якоря *ЗТЯ*. Когда сигнал регулятора скорости a_{pc} превысит уровень сигнала задатчика интенсивности, обеспечивая разгон электропоезда с заданным ускорением.

При дальнейшем разгоне электропоезда фактическое значение скорости V_i будет приближаться к заданному $V_{уст}$ и может незначительно его превысить. Сигнал с выхода регулятора скорости *РС* будет снижаться, так как будет уменьшаться сигнал рассогласования элемента сравнения сигнал *ЭСС*. Элемент *ИЛИ-min* будет передавать в задатчик тока якоря *ЗТЯ* сигнал регулятора скорости *РС*, как только он станет меньше по уровню

сигнала задатчика интенсивности ZI , понижая сигнал уставки $I_{уст}$ тока тяговых электродвигателей. Таким образом интенсивность разгона автоматически будет снижаться.

При движении электропоезда на длительном спуске в режиме поддержания заданной скорости, установленной задатчиком ZC , отрицательный сигнал рассогласования элемента сравнения скорости ЭСС может привести к формированию отрицательного выходного сигнала $-a_{pc}$ регулятора скорости PC . В том случае, когда отрицательный сигнал PC превысит порог переключения релейного элемента $PЭ$ $-a_{pc} < -a_{отк}$, последний формирует сигнал на отключение тяги. Переход в режим электрического реостатного торможения электропоезда при стабилизации скорости движения не предусмотрен.

Положительный сигнал регулятора скорости, соответствующий минимальному ускорению электропоезда при трогании с места, должен превышать положительный порог переключения релейного элемента $PЭ$ на включение тяги $a_{pc} > a_{вкл}$.

Во внутреннем контуре регулирования тока якорей $TЭД$ элемент сравнения сигналов тока ЭСТ сравнивает сигнал заданной уставки $I_{уст}$ элемента $ZТЯ$ с сигналом обратной связи I_i по току якорей $TЭД$, программно усредненным за период регулирования $ТИП$, формируя сигнал рассогласования по току. Этот сигнал передается в регулятор тока якорей $PТЯ$, формируя по пропорционально-интегрально-дифференциальному закону регулирования интервал длительности проводящего состояния Z_i тиристорных ключей $ТИП$:

$$Z_i = A_1[(I_{уст} - I_{i-1}) + A_2 \sum (I_{уст} - I_{i-1}) + A_3(I_{i-2} - I_{i-1})], (мс) \dots (5.4)$$

Интегральная составляющая $A_2 \sum (I_{уст} - I_{i-1})$ ПИД закона регулирования обеспечивает точность поддержания заданного тока якорей ТЭД. Коэффициент A_2 представляет собой отношение периода регулирования $T_{ИП} \tau_{ИП}$ к постоянной времени $T_{1ТД}$ наиболее инерционного апериодического звена цепи якорей ТЭД:

$$A_2 = \frac{\tau_{ИП}}{T_{1ТД}} . \quad (5.5)$$

Дифференциальная составляющая $A_3(I_{i-2} - I_{i-1})$ обеспечивает высокое быстродействие регулирования тока якорей ТЭД. Коэффициент A_3 представляет собой отношение второй по величине постоянной времени $T_{2ТД}$ апериодических звеньев цепи якорей ТЭД к периоду регулирования $T_{ИП} \tau_{ИП}$:

$$A_3 = \frac{\tau_{ИП}}{T_{1ТД}} . \quad (5.6)$$

При достижении интервалом проводящего состояния Z_i тиристорных ключей $T_{ИП}$ величины, предельной по условиям коммутации $Z_i = Z_{max}$, модуль включения ослабления возбуждения МВОВ формирует сигнал на включение ступени постоянного ослабления возбуждения. Регулятор тока при этом оперативно уменьшает интервалы длительности включенного состояния тиристорных ключей $T_{ИП}$, сглаживая броски тока якорей ТЭД.

В режиме электрического реостатного торможения из функциональной схемы исключается канал регулирования скорости (показан пунктирной линией) и производится регулирование только по току якоря.

При возникновении боксования или юза колесной пары по сигналу датчика избыточного скольжения ДС Б-Ю элемент регулирования уставки ЭРУ автоматически понижает уставку тока якорей. Предусмотрено две

ступени понижения уставки в зависимости от продолжительности режима избыточного скольжения. На первой ступени происходит снижение сигнала уставки на 20%. Если в течение 3...5с не происходит отмены сигнала боксования (юза), то вторая ступень понижает уставку еще на 20%.

Поддержание заданного значения тока якорей производится по более нагруженному тяговому электродвигателю (элемент *ИЛИ-max*). В случае боксования или юза колесной пары одной из параллельных групп *ТЭД* регулирование тока якорей осуществляется по сигналу датчика тока второй параллельной группы *ТЭД*. Поддержание заданного значения скорости движения осуществляется по минимальному сигналу датчиков скорости, так как при срыве сцепления частота вращения боксующей колесной пары будет выше.

Предусмотрена автоматическая фиксация интервалов проводящего состояния тиристорных ключей при возникновении переходных процессов в цепи *ТЭД*, обусловленных переходной проводимостью между токоприемником и контактной сетью. Блок *БФРТ* блокирует изменение интегральной составляющей закона регулирования (5.4) при понижении сигнала датчика *ДНФ* напряжения входного сглаживающего фильтра U_{ϕ} на 30% за промежуток времени $4...5\tau_{ИП}$. Отмена фиксации происходит при увеличении сигнала датчика *ДНФ* на 90% от первоначального за промежуток времени $(2...3)\tau_{ИП}$.

Реализация этого проекта позволяет приступить к созданию электропоездов постоянного тока нового поколения, а также к модернизации эксплуатируемого парка.

5.3. Устойчивость рекуперативного торможения в тяговом электроприводе с импульсным регулированием

Основная доля парка электропоездов постоянного тока имеет коллекторные тяговые двигатели последовательного возбуждения. При этом

эффективным является применение электрического торможения – реостатного или рекуперативного. Традиционная схема рекуперативного тормоза предполагает использование независимого возбуждения тяговых двигателей, работающих в генераторном режиме (рисунок. 5. 3, а). В такой же схеме их якорные обмотки **Я1** и **Я2** подключены через токоприемник к контактной сети с напряжением **U**, а обмотки возбуждения **ОВ1**, **ОВ2** питаются от отдельного возбуждения **B** – низковольтного источника постоянного тока (электрический генератор или статический преобразователь), управляемого блоком **БУ**, алгоритм работы которого рассмотрен ниже.

Особенность генераторного режима тяговых электродвигателей (**ТЭД**) связана с необходимостью контроля более значительного числа параметров, чем в тяговом режиме. В тяге необходим оперативный контроль (ограничение) только тока двигателя. В генераторном режиме приходится отдельно контролировать ток **I_я** якорных обмоток и ток **I_В** обмоток возбуждения, напряжение **U** на токоприемнике (не должно быть более 3800 **В**), а также потенциальные условия на коллекторе двигателя, т. е. межламельное напряжение. Обычно последнее ограничение выражают через коэффициент ослабления возбуждения $\beta = I_B / I_{я}$. Оно выполняется при помощи автоматических систем (на грузовых электровозах ВЛ10 и ВЛ11 применяют системы САУРТ-034 и АСУР-021). Аналогичные системы автоматики имеются на других видах электроподвижного состава с рекуперативным или реостатным торможением. При этом контроллер машиниста КМ служит только для включения тормоза и для задания максимальной тормозной силы **B_{max}**.

Поэтому тормозная характеристика моторного вагона, т. е. зависимость тормозной силы **B** от скорости **V** имеет вид как показано на рисунке 5. 3, б. При включении тормоза на максимальной скорости **V_{max}** (точка 1) исходным ограничивающим параметром является $\beta = \beta_{min}$. Соответственно

приходится ограничивать I_B и $I_{я}$. По мере снижения скорости увеличивают I_B при помощи возбудителя B . Одновременно возрастает $I_{я}$ при контроле $\beta \geq \beta_{min}$ до точки 2, в которой достигается ограничение по $I_{я} = I_{яmax}$. Далее по мере снижения V поддерживают это значение увеличением тока I_B при $\beta = 1$.

При рекуперативном торможении возможна ситуация, когда в тяговой сети отсутствует приемник рекуперированной энергии. Тогда происходит повышение напряжения U до значения уставки (3800 В) и отключение тяговых двигателей или по сигналу $БУ$ реализуется переход на реостатное торможение.

Аналогичные ограничения действуют при реализации импульсного регулирования (рисунок. 5. 3, в). При этом возможна рекуперация при низкой скорости, т. е. при $2E < U$, при высокой скорости. Для этого в схеме предусмотрены импульсные прерыватели ИП1 и ИП2. При малой скорости двигателей используют только ИП1, замыкая и размыкая его с частотой $f = 1/T$. При этом токи в схеме (рисунок. 5. 3,в) в квазистационарном режиме изменяются по диаграмме рисунок 5. 3,г. При замкнутом ИП1 ток двигателей $I = I_{я} = I_B$ нарастает (верхняя часть диаграммы рисунок. 5. 3,г), а при выключенном – спадает. Внизу показан ток I_p , отдаваемый в сеть.

Но при более высокой скорости параметры диаграммы, показанной на рисунке 5. 3, г, меняются следующим образом по мере увеличения V и E :

- коэффициент заполнения $k = \tau/T$ принимает небольшие значения, промежуток 1 импульсного цикла уменьшается, а промежуток 2 увеличивается;

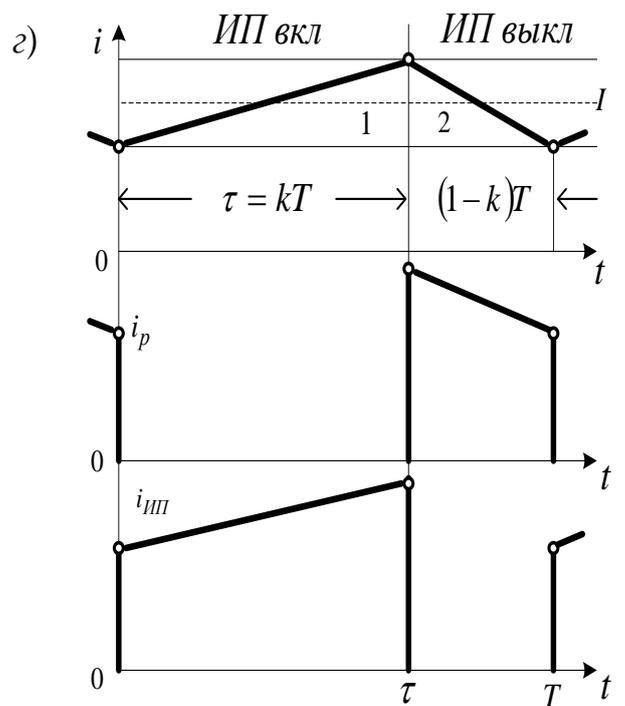
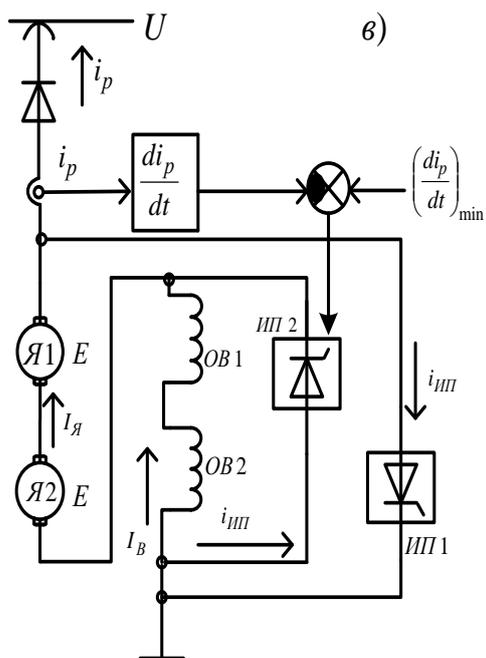
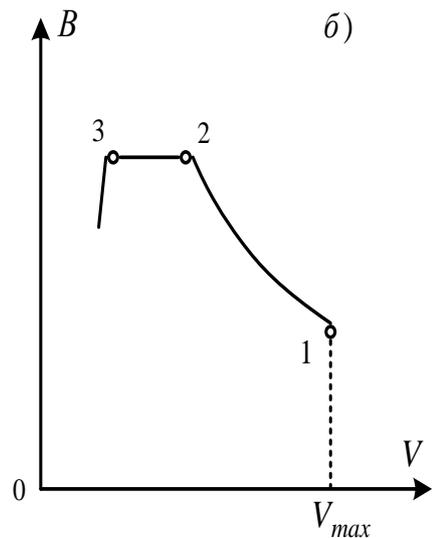
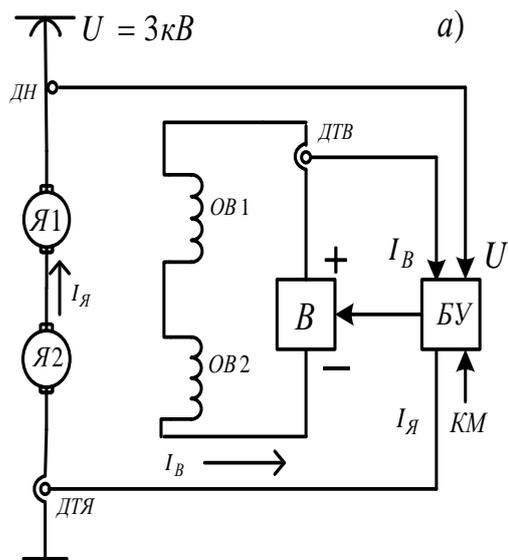


Рисунок. 5. 3. Рекуперативное торможение по классической схеме (а, б) и с импульсным регулированием (в, г)

– при этом график изменения мгновенного значения тока I_p в течение промежутка 2, становится более пологим, т. е. величина производной dI_p/dt , которая нормально имеет отрицательное значение, приближается к нулю. При

$$\frac{dI_p}{dt} \geq 0 \quad (5.7)$$

процесс рекуперации теряет устойчивость, ток I_p быстро нарастает до отключения ТЭД защитой. В этой зоне, где имеет место соотношение (5.7), нужно применять ослабление возбуждения, чтобы реализовать условие устойчивости

$$2E - 2rI_p < U. \quad (5.8)$$

Для снижения э.д.с E до допустимого уровня

$$E < \frac{U}{2} + rI_p \quad (5.9)$$

включают ИП2, что выполняют автоматически по такому алгоритму: измеряют мгновенное значение тока рекуперации I_p , вычисляют его производную dI_p/dt и сравнивают ее с минимально допустимым значением, что соответствует условию (5.9). Все элементы для выполнения этих операций показаны на рисунке 5. 3, в.

С учетом этого условия следует выполнять включение рекуперативного тормоза в такой последовательности:

1. Собирают схему по рисунку 5. 3,в и постепенно увеличивают ток двигателя включением прерывателя ИП1.
2. При этом постепенно увеличивается E и соответственно снижается крутизна импульса $I_p(t)$.

3. При низкой скорости V сначала достигается ограничение по току двигателя и использовать ослабление возбуждения двигателей нет необходимости.
4. При высокой скорости V фиксируется приближение dI_p/dt к предельному значению и при достижении его включается ИП2, реализующий ослабление возбуждения $\beta < 1$. Далее по мере снижения скорости поезда и возрастания абсолютного значения указанной производной можно при помощи ИП2 постепенно увеличивать β , а по достижении $\beta = 1$ переходить к управлению ИП1.

Схема по рисунку 5.3,в должна также содержать все средства регулирования и ограничения параметров I_A, I_B, U , показанные на рисунке 5.3,а. Таким образом, при импульсном регулировании имеем существенное усложнение электропривода по сравнению с традиционной схемой, но при этом расширяется диапазон действия рекуперации в сторону низких скоростей, т. е. левее точки 3 на рисунке 5. 3,б.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании систем импульсного регулирования для модернизируемых моторных вагонов пригородного и городского электротранспорта.

5. 4. Эффективность модернизации эксплуатируемых мотор-вагонных электропоездов постоянного тока

Основной объем пригородных сообщений выполняют мотор-вагонные электропоезда постоянного тока, поскольку самые крупные ж. д. узлы и прилегающие к ним линии электрифицированы по системе постоянного тока 3 кВ (Москва, Санкт - Петербург, Новосибирск, Омск, Екатеринбург и др.). Пригородные перевозки убыточны, что является следствием высоких энергозатрат, которые достигают 500 - 600 кВт-ч на 10 тыс. т-км брутто. Имеется и ряд других негативных факторов; поэтому для комплексного

решения всей экономической проблемы в целом созданы Дирекции пригородных перевозок, в ведение которых переданы все вопросы эксплуатационного, организационного, финансово - экономического и технического характера по пригородным сообщениям.

Главной является проблема сокращения расходов на энергозатраты, на величину которых влияют:

- быстрый рост тарифов по оплате электроэнергии (примерно на 20% ежегодно);
- значительная масса моторных и прицепных вагонов (тара 0,5 - 0,6 т на пассажиро - место) и принятая система учета удельного расхода электроэнергии $УРЭ$ кВт-ч / 10 тыс. т-км брутто. Расход энергии в кВт - ч и пробег поезда в км определяют с необходимой точностью по приборам учета, а вес брутто принимают условно по нормативному заполнению вагонов пассажирами. Система учета $УРЭ$ не стимулирует эксплуатационников к энергосбережению. Было бы целесообразно перейти к энергозатратам на пассажиро - км, что позволило бы влиять не только на сокращение $УРЭ$, но и на заполнение вагонов, т. е. на увеличение доходов от перевозок;
- задача оптимизации режимов движения в рамках заданного графика движения в целом решена применением систем автоведения, но не используются возможности автоматического выбора уставок пускового и тормозного тока (предусмотрено 7 уставок), что может дать дополнительное снижение $УРЭ$;
- применяемые пневмоприводы дверей с дистанционным управлением не обеспечивают безопасность пассажиров по причине плохой видимости из-за большой длины поезда до 250 м, плохой освещенности платформ и размещения их в кривых участках пути, а также из-за недисциплинированности пассажиров. Все это ведет к задержкам при отправлении поезда и дополнительным энергозатратам;

- главная причина повышенного расхода энергии на тягу - это непроизводительные потери при реостатном регулировании тяговых электродвигателей (*ТЭД*) постоянного тока последовательного возбуждения.

Реостатный пуск *ТЭД* используют не только поезда старых выпусков ЭР2 (модернизированная версия ЭМ2) и ЭТ2, но и поезда последующих серий ЭР2Р, ЭР2Т, ЭД2 и ЭД4 всех модификаций. На поездах старых выпусков использовали переключение группировок *ТЭД* (С - П), что ограничивало реостатные потери на уровне 11 - 13 % для условий типичного депо Московского узла (Москва-2, Лобня, Нахабино и др.). Для исключения этих потерь по инициативе профессора Краснобаева Н.И. (тогда он был Начальником Прибалтийской ж. д.) был модернизирован электропоезд ЭР2 с установкой на моторных вагонах импульсных преобразователей ТИП-1200/3П. Положительный опыт их эксплуатации позволил выпустить опытную партию электропоездов ЭР12 с преобразователями ТИП-1320/3П. Их испытания в Рижском узле и на Опытном кольце ВНИИЖТ показали возможность обеспечения расчетных размеров экономии *УРЭ* (не менее 10%).

Однако, выполненные кафедрой "Электрическая тяга" МИИТа и лабораторией электропоездов ВНИИЖТ экономические расчеты не подтвердили на тот период времени (начало 1970-х гг.) целесообразность перехода на серийное производство поездов с импульсным регулированием по следующим причинам:

- низкая цена электроэнергии в тот период 0,4 коп/кВт-ч;
- высокая стоимость преобразовательного оборудования (тиристоры ТЛ-320-10 и в целом весь блок импульсного прерывателя в подвагонном исполнении), что объяснялось несовершенством силовой преобразовательной техники в тот период времени;
- необходимость обеспечения электромагнитной совместимости импульсного режима прерывателя с ж.-д. автоматикой и проводными

линиями связи, что потребовало установки мощного входного *LC* – фильтра.

Более актуальной представлялась в то время идея реализации рекуперативного торможения, что по мнению авторов обеспечивало большой возврат энергии, компенсируя тормозные и пусковые потери. Для этого в новых поездах использовали двигатели с номинальным напряжением 750 В, что позволяло применять только одну группировку *C*, но облегчало реализацию рекуперации. Но на практике эффект рекуперации мог быть получен только при существенном повышении скорости, что не было реализовано даже в Московском железном дорогом узле.

Обычно скорость перехода на выбег составляет 55 - 60 км/ч, а рекуперация может работать до скорости 40 - 45 км/ч, так что возможность возврата энергии в сеть практически отсутствует. При импульсном регулировании возврат энергии возможен до скорости 6 - 7 км/ч. К настоящему времени удалось преодолеть все негативные факторы, указанные выше, а именно:

- разработаны надежные силовые транзисторы *IGBT*, включаемые и выключаемые импульсами напряжения небольшой амплитуды, что существенно упрощает выполнение импульсного преобразователя вместе с микропроцессорной системой управления. При этом комплект импульсного преобразователя на отечественной элементной базе (ОАО "Электровыпрямитель", г. Саранск) на один моторный вагон ЭД4М при серийном производстве будет иметь цену 650 - 870 тыс. руб.;
- транзисторы *IGBT* имеют рабочую частоту 2,5 - 3 кГц, что позволяет исключить выходной фильтр и максимально упростить входной фильтр, решив таким путем задачу электромагнитной совместимости и снизив массу электрооборудования;
- трудность применения рекуперации исключается расширением ее рабочего диапазона до 6 - 7 км/ч и дополнительно возможностью

приема избыточной энергии рекуперации при помощи бортовых накопителей энергии (НЭ) на базе суперконденсаторов;

- повышение тарифов по оплате электроэнергии для Дирекций пригородных сообщений до 3 руб./кВт-ч и выше снижают срок окупаемости затрат на модернизацию до 2 - 2,5 лет.

Конкретные расчеты экономии электроэнергии Э выполнены для двух характерных маршрутов следования электропоездов ЭД4М в функции маршрутной скорости v_m и среднего расстояния между остановками $S_{ост}$. Результаты этих расчетов приведены в таблице 5. 2 (УРЭ по факту до модернизации).

Модернизацию электропоездов с переходом на импульсное регулирование целесообразно выполнять при капитальном ремонте с продлением их ресурса (КРП), что впервые было реализовано по предложению директора Московского локомотиворемонтного завода (МЛРЗ) В.М. Амелина. Тогда же на этом заводе фирма "Спецремонт" при КРП поездов ЭР2 некоторые из них оборудовала импульсным регулированием, присвоив им обозначение ЭМ2И. Все они успешно эксплуатируются в депо Московского узла, обеспечивая расчетные значения экономии пусковых потерь.

Таблица 5. 2. Расчетные результаты по исключению пусковых и тормозных потерь электропоезда постоянного тока

v_m , км/ч	$S_{ост}$, км	УРЭ, кВт-ч/изм	Э (исключение потерь), %	
			пусковые	торм. НЭ
51	6,8	466	11	17
42	5,3	521	14	19

Заключение

1. Тяговый электропривод эксплуатируемых электропоездов постоянного тока целесообразно в процессе их капитального ремонта модернизировать путем применения систем импульсного регулирования, что обеспечивает экономию электроэнергии и создает возможность применения современных систем автоматики при сохранении на моторных вагонах тяговых электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения. В перспективе для новых электропоездов следует рекомендовать привод с асинхронными двигателями, что соответствует мировому уровню.
2. Предложенная математическая модель системы импульсного регулирования включает схему замещения тягового двигателя, в которой учтены нелинейность магнитной характеристики и демпфирующее действие вихревых токов. Соответствующий коэффициент демпфирования соответствует степени снижения индуктивности в функции частоты импульсного преобразователя.
3. Начальный этап развития систем импульсного регулирования был основан на использовании однооперационных тиристоров, что требовало учета влияния контура емкостной коммутации на характеристики преобразователя и соответственно привода в целом. На данном этапе в качестве ключевых элементов целесообразны силовые транзисторы IGBT, которые в математической модели представлены как идеальные переключатели.
4. Анализ регулировочных и пульсационных характеристик системы импульсного регулирования рекомендовано выполнять на базе разработанной универсальной математической модели. Она предполагает решение обыкновенных дифференциальных уравнений для процессов квазистационарного импульсного режима на основе допущения о линейной зависимости тока от времени в каждом характерном интервале импульсного цикла. Модель позволяет выполнять расчет тяговых

электроприводов при пуске и торможении. Установлено, что максимум пульсаций тока при тяге и рекуперации имеет место при коэффициенте заполнения импульсного цикла $k=0,5$, что облегчает их сглаживание.

5. Импульсное регулирование целесообразно также использовать для плавного ослабления возбуждения тяговых электродвигателей. Расчеты регулировочных и пульсационных характеристик этого режима выполнены на основе предложенной математической модели для разных вариантов подключения импульсного преобразователя к обмоткам возбуждения двигателей. Для сглаживания пульсаций тока возбуждения рекомендовано повышать рабочую частоту импульсного регулирования или использовать дополнительный резистор.
6. Автоматизацию тягового электропривода с импульсным регулированием целесообразно выполнять на базе двухконтурной системы подчиненного регулирования со входами задания тока и скорости. Исполнительными элементами системы являются импульсные преобразователи для регулирования напряжения и ослабления возбуждения тяговых двигателей. Такая система удовлетворяет требованиям экономичного управления поездом и может быть дополнена типовым устройством автоведения.
7. Концепция дальнейшего развития тяговых электроприводов электропоездов постоянного тока для пригородного и городского транспорта включает переход на бесколлекторные двигатели с автономными инверторами на транзисторах IGBT, применение микропроцессорных систем управления. Дополнительную экономию энергозатрат можно обеспечить применением бортовых накопителей энергии, что гарантирует возможность рекуперации независимо от наличия приемников энергии в тяговой сети.

Список литературы

1. Автоматизированные электроприводы постоянного тока с широтно-импульсными преобразователями / М. Е. Гольц, А. Б. Гудзенко, В. М. Остреров, Л. А. Шпиглер. – М.: Энергия, 1972. – 111 с.
2. Бадер М. П.. Энергоэффективность инновационных процессов в силовой электронике. Известия АЭН, 2009, № 3, с. 19-31.
3. Бирзниецс Л. В.. Импульсные преобразователи постоянного тока. М., Энергия, 1974, 256 с.
4. Бирзниецс Л. В., Валеинис Я. А.. Пульсации тока тягового двигателя при импульсном регулировании. – Тр. ВНИИВагоностроения, 1968, вып. 8, с. 93-104.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: издание девятое переработанное и дополненное – М.: «Высшая школа», 1996. – 638 с., ил.
6. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи. М.: Транспорт, 2005, 464 с.
7. Вагнер Р.. Системы и компоненты современного тягового привода для мотор-вагонных поездов. Железные дороги мира. 1997, № 1, с. 17-23.
8. Винокуров В.А., Попов Д.А. Электрические машины железнодорожного транспорта. Учебник для вузов. – М.: Транспорт, 1986. – 511 с.
9. Гаврилов Я. И., Мнацаканов В. А.. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. М., Транспорт, 1986, 229 с.
10. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MathLab v6.0: Учебное пособие. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
11. Ерофеев А. А. Теория автоматического управления // СПб.: Политехника, 2001.
12. Ефремов И. С., Кобозев В. М., Шевченко В. В.. Технические средства городского электрического транспорта. М., 1985 г.
13. Ильинский Н. Ф., Козаченко В.Ф. Автоматизированный электропривод.

14. Иньков Ю.М., Ротанов Н.А., Феоктистов В.П., Чаусов О.Г. Преобразовательные полупроводниковые устройства подвижного состава – М.: Транспорт, 1982. – 263 с.
15. Иньков Ю. М., Фельдман Ю. И.. (ред) ЭПС с электрическим торможением. М., УМЦ ЖДТ, 2008, 412 с.
16. Касаткин А.С., Немцов М. В.. Электротехника. М., Высшая школа, 2000.
17. Калининченко А. Я.. Исследование технико-экономической эффективности электроподвижного состава постоянного тока с полупроводниковыми преобразователями. Автореф. Дис...канд. техн. наук. – М.: 1974. – 22 с.
18. Ко Ко Хтет. Развитие электрооборудования электропоездов постоянного тока на базе перспективных технологий[Текст] / Ко Ко Хтет // Неделя науки-2012 «Наука МИИТа-транспорту»: труды научн. –практ. Конф.; М.: МГУПС(МИИТ). – 2012. – С III-90.
19. Ко Ко Хтет. Модернизация мотор-вагонных электропоездов постоянного тока (аспекты экономики и безопасности) [Текст] / Ко Ко Хтет //Безопасность движения поездов : труды научн. –практ. Конф.; М.: МГУПС(МИИТ). – 2012 – С VI-11.
20. Ковтун А. В., Лысов Н.В.. Повышение энергетических показателей тиристорного преобразователя опытного электропоезда ЭТ-2А. Материалы международного симпозиума ELTRANS-2001, СПб, ПГУПС, 2002, с. 211-216.
21. Малютин В. А., Грибанов П. Ф.. Электрооборудование электропоезда ЭД6. Материалы международного симпозиума ELTRANS-2001, СПб, ПГУПС, с. 218-220.
22. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студентов высших учебных заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 368 с.
23. Осипов С.И., Осипов С.С., Феоктистов В.П. Теория электрической тяги. М., УМЦ ЖДТ, 2005 г.

24. Патваканов С. С.. Вероятностные методы расчета фильтра электроподвижного состава постоянного тока. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М.: МИИТ, 1982, 27 с.
25. Патент 2216457. Устройство для рекуперативного торможения тяговых электродвигателей вагона метрополитена / Л. В. Винник, Г. Г. Рябцев и др. // БИ 2003, №.32.
26. Плакс А. В., Савоськин А.Н. Автоматизация электрического подвижного состава // М.: Транспорт, 1976.
27. Плакс А.В. Системы управления электрическим подвижным составом. Учебник для вузов ж.д. транспорта. – М.: Маршрут, 2005. – 360 с.
28. Проектирование тяговых электрических машин / Сб. трудов под ред. М. Д. Находкина. М.: Транспорт, 1976, 624с.
29. Ранькис И. Я. Оптимизация параметров тиристорных систем импульсного регулирования тягового электропривода. Рига: Зинатне, 1985, 183 с.
30. Ранькис И. Я. Импульсное регулирование тяговых электродвигателей. Рига, Изд-во «Зинатне», 1991 г.
31. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н.. Теория электрической тяги. – М.: Транспорт, 1983 – 328 с.
32. Рябцев Г. Г.. Методы и средства повышения качества функционирования импульсных системы управления режимами работы вагонами метрополитена. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. М.: МИИТ, 1986, 47 с.
33. Санява Д.. Теория и методы расчета процессов импульсного регулирования тяговых электрических машин на электроподвижном составе постоянного тока. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. М.: МИИТ, 1990, 45 с.
34. Семенов И. В.. Повышение эффективности систем рекуперативного торможения электропоездов постоянного тока пригородного сообщения. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М.: МИИТ, 2003, 198 с.

35. Сипайлов Г. А., Лоос А. В.. Математическое моделирование электрических машин // М.: Высшая школа, 1980.
36. Терехов В. М.. Элементы автоматизированного электропривода. М., Энергоатомиздат, 1987, 222 с.
37. Тиристорное управление электрическим подвижным составом постоянного тока / В. Е. Розенфельд, В. В. Шевченко, В. А. Майбога, Г. П. Долаберидзе. – М.: Транспорт, 1970. – 240 с.
38. Трахтман Л. М.. Устойчивость системы широтно-импульсного управления тяговыми двигателями. – Электричество, 1976, № 2, с. 70-74.
39. Узарс В.. Выбор параметров полупроводниковых выпрямительных установок электропоездов переменного тока 25 Гц на основе анализа теплового процесса вентиляей. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. М.: МИИТ, 1966, 175 с.
40. Филиппов Е. Нелинейная электротехника (перевод с немецкого) // М.: Энергия, 1979.
41. Феоктистов В. П. Режимы работы электропоездов постоянного тока с импульсными преобразователями. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. М.: МИИТ, 1981, 542 с
42. Феоктистов В.П., Просви́ров Ю.Е. и др. Электрические железные дороги. М., УМЦ ЖДТ, 2010 г.
43. Феоктистов, В. П.. Тяговый электродвигатель постоянного тока как звено системы автоматического регулирования электропоезда [Текст] / В. П. Феоктистов, С. С. Борисенков, Ко Ко Хтет // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 4. – с.27-29.
44. Феоктистов, В. П.. Эквивалентная схема замещения тягового электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения для расчета электромагнитных процессов при импульсном регулировании [Текст] / В. П. Феоктистов, Ко Ко Хтет // Вестник МИИТа. – 2012. – № 25. – с. 3-10.

45. Феоктистов, В. П.. Сглаживание пульсаций входного тока в преобразователях с импульсной модуляцией [Текст] / В. П. Феоктистов, В. Н. Ротанов, Ко Ко Хтет // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 1. – С.33-34.
46. Феоктистов, В. П.. Устойчивость рекуперативного торможения в тяговом электроприводе с импульсным регулированием [Текст] / В. П. Феоктистов, С. С. Борисенков, Ко Ко Хтет // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 2. – С.22-23.
47. Феоктистов, В. П.. Автоматизация тяговых электроприводов мотор-вагонных электропоездов постоянного тока [Текст] / В. П. Феоктистов, Ю. Ю. Чуверин, Ко Ко Хтет // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 3. – С.23-25.
48. Чибиркин В. В., Шестоперов Г. Н., Живечков А. С.. Современная преобразовательная техника ОАО «Электровыпрямитель» для ЭПС. Материалы международного симпозиума ELTRANS-2005, СПб, ПГУПС, с. 660-664.
49. Электропоезда постоянного тока с импульсными преобразователями / Я. Берзиньш, Л. В. Бирзниекс, В. П. Данилов и др. – М.: Транспорт, 1976. – 280 с.
50. Электротехника и электроника: учебник для студ. Учреждений сред. Проф. Образования / Б. И. Петленко, Ю. М. Иньков, А. В. Крашенинников и др. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 320 с.
51. Якушев А.Я., Колодкин О.В., Корнев А. С.. Алгоритмы микропроцессорной системы автоматического управления импульсными на IGBT приборах электропоезда постоянного тока. Материалы международного симпозиума ELTRANS-2001, СПб, ПГУПС, с. 228-232.
52. Katta T. Thyristor chopper-controlled electric cars in Japan. «Japan Railway Engineering», 1980, v.20, N 2, S. 3-10.

53. McLellan P. R. Thyristor choppers using a bridge-connected capacitor for commutation. – Proc. Inst. Electrical Eng., 1975, vol. 122, № 5, p. 514-516.
54. Winkler A., Otto G.. Erfahrungen zum Einsatz von Bord-Mikrorechnern für einen energieoptimalen Zugbetrieb bei der S-Bahn Berlin. – DET – Eisenbahn – technik, 1981, 29, N 12, S. 490-494.