



На правах рукописи

ДУДЧЕНКО ДМИТРИЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ПЛАВНОЕ БЕСКОНТАКТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА В
ОБМОТКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
ПРИ ПОМОЩИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

11 НОЯ 2010

Москва -- 2010

Диссертационная работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МИИТ) на кафедре «Электрическая тяга».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Феоктистов Валерий Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Калининченко Анатолий Яковлевич

кандидат технических наук
Чернов Олег Евгеньевич

Ведущая организация: Всероссийский институт научной и
технической информации РАН (ВИНИТИ РАН)

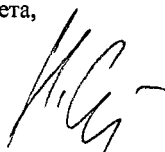
Защита состоится 10 ноября 2010 г. в 13 часов 00 мин на
заседании диссертационного совета Д 218.005.02 при Московском
государственном университете путей сообщения (МИИТ) по адресу: 127994,
г. Москва, ул. Образцова, 9, стр.9, аудитория 4210.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Московского государственного университета путей сообщения

Автореферат разослан 07 октября 2010 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью
учреждения, просим направлять по адресу совета университета.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, с.н.с.



Н.Н. Сидорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы определяется мировой тенденцией к реализации систем плавного бесконтактного регулирования тяговых электродвигателей на электровозах и электропоездах. При этом могут быть существенно улучшены тяговые и энергетические характеристики электроподвижного состава, повышены показатели надёжности тягового электрооборудования. Наиболее легко эта задача решается для регулирования тока обмоток возбуждения тяговых электродвигателей. Здесь могут быть использованы достаточно простые импульсные преобразователи низкого напряжения. Соответствующий опыт имеется, поскольку такие системы длительное время эксплуатируются на электропоездах и электровозах постоянного тока. Поэтому необходимо обобщение соответствующих схемных решений и расчётных методик. Эта задача решается в данной работе.

Целью работы является аналитический обзор и системный анализ схемных решений по плавному регулированию тока возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока; обобщение методов расчёта квазистационарных электромагнитных процессов при регулировании тока в зоне ослабления возбуждения; обоснование универсальной методики расчёта регулировочных и пульсационных характеристик при импульсном регулировании тока возбуждения во всём диапазоне возможных параметров и режимов тягового электродвигателя и импульсного преобразователя.

Для достижения поставленной цели обоснована математическая модель тягового электропривода с системой импульсного регулирования при учёте нелинейных характеристик двигателя и дискретности импульсного преобразователя.

Предметом исследования является система тягового электропривода с двигателями постоянного тока последовательного возбуждения в зоне ослабления возбуждения. При этом поставлена задача обоснования методики расчета регулировочных и пульсационных характеристик.

Методы исследования заключаются в формулировании и решении в обобщённом виде системы дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы для квазистационарного режима ослабления возбуждения тягового электродвигателя постоянного тока. При этом обоснованы допущения, позволяющие алгебраизировать исходную систему дифференциальных уравнений и свести её к линейным уравнениям. Это позволило получить универсальные зависимости для регулировочных и пульсационных характеристик применительно ко всем рассматриваемым схемным решениям.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– обоснована математическая модель, позволяющая алгебраизировать исходные дифференциальные уравнения для квазистационарных электромагнитных процессов при импульсном регулировании тока возбуждения и получить обобщённые аналитические выражения для регулировочных и пульсационных характеристик;

– обобщены и классифицированы возможные варианты выполнения систем импульсного регулирования тока возбуждения, реализован научный подход к выбору конкретной системы с учётом требований разработчиков электроподвижного состава по регулировочным свойствам и предельным уровням пульсаций.

Практическая ценность работы заключается в том, что обоснованы рекомендации для использования систем плавного бесконтактного регулирования на электроподвижном составе с двигателями постоянного тока. Соответствующие расчётные зависимости могут быть использованы при проектировании электрооборудования для новых и модернизируемых электропоездов и электровозов.

Апробация работы.

Основные материалы диссертации рассмотрены и получили одобрение на следующих научно – практических конференциях:

- «Безопасность движения поездов», Москва, МИИТ, 2007, 2008, 2009 гг.;
- «Наука и молодёжь в начале нового столетия», Белгородская обл., г. Губкин, 2008 г.;
- «Наука МИИТа транспорту – 2008», Москва, 2008г.;
- «*TRANS-MECH-ART-CHEM*», Москва, 2008, 2010 гг.

Работа докладывалась и получила одобрение на научно – технических семинарах и заседаниях кафедры «Электрическая тяга», МИИТа, 2010 г.

Публикации.

Основное содержание работы отражено в 11-ти публикациях, из них 4-е статьи в научно-технических журналах, 2-е из которых в изданиях, рекомендованных ВАК, и в 7-ми тезисах научных и научно-практических конференций.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения с изложением основных результатов и выводов, списка использованных источников из 45 наименований, двух приложений и содержит 114 страниц основного текста, 48 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована постановка задачи по усовершенствованию системы регулирования тяговых электродвигателей в электрической тяге постоянного тока. Обоснована актуальность применения импульсного регулирования при помощи силовых полупроводниковых элементов.

В главе 1 сформулированы постановка задачи и цель исследования. Показано, что для электроприводов с двигателями постоянного тока, в том числе для тяговых электроприводов, характерно двухзонное регулирование. Пуск двигателя осуществляется сначала путём повышения напряжения при полном или усиленном возбуждении (зона 1), а затем ослаблением возбуждения при полном напряжении на двигателе (зона 2).

Поставлена задача исследования электромагнитных процессов в зоне 2. Выполнен обзор применяемых схемных решений при ступенчатом и плавном ослаблении возбуждения. Системы плавного регулирования тока возбуждения выполняют на базе импульсных преобразователей (электропоезда ЭР2И, ЭР12, ЭР200, вагоны метро, электровозы ЧС2Т, ЧС6, ЧС7, ЧС200).

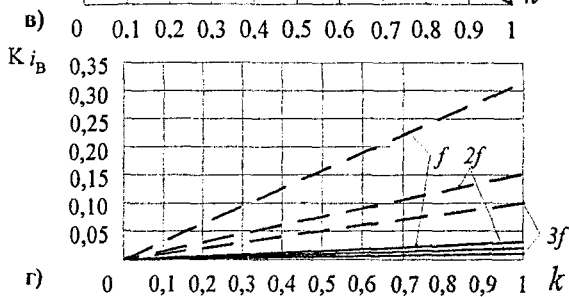
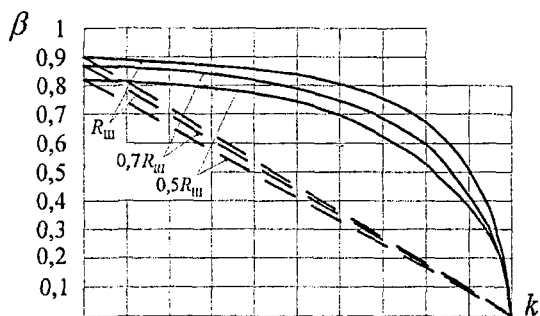
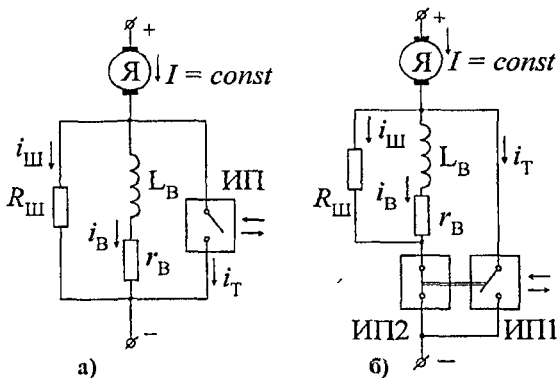
Преимущества плавного регулирования состоят в высоком быстродействии импульсного преобразователя, что позволяет исключить из силовых цепей индуктивные шунты. Кроме того имеется возможность точно установить и поддерживать в условиях возмущений заданное значение коэффициента ослабления возбуждения, что важно в зоне его предельно допустимых (минимальных) значений, а также при стабилизации скорости электропоезда на заданном уровне. Плавное регулирование позволяет исключить переходные процессы, вызываемые быстрыми изменениями магнитного потока. Несмотря на разнообразие применяемых схемных решений по плавному ослаблению возбуждения, все они могут быть сведены к двум базовым способам включения импульсного преобразователя (ИП):

а) один преобразователь включён параллельно обмотке возбуждения (рис. 1, а, схема типа 1);

б) используют два импульсных преобразователя, включённых соответственно параллельно и последовательно с обмоткой возбуждения (рис. 1, б, схема типа 2) и работающих в противофазе.

Системы импульсного регулирования возбуждения и, в частности для зоны 2, могут быть выполнены с разными способами регулирования и с разными базовыми ключевыми элементами (таблица 1). Применительно к тяговым электроприводам всегда по условиям обеспечения электромагнитной совместимости с рельсовыми цепями используют широтно – импульсное регулирование обычно с рабочей частотой 400 Гц.

У эксплуатируемых электропоездов и электровозов постоянного тока импульсные преобразователи выполнены на однооперационных тиристорах, но



$3f > 2f > f$ – частота пульсаций ИП

Рисунок 1 – Базовые схемы (а, б) плавного ослабления тока возбуждения без дополнительного сопротивления ($R_d = 0$) и их регулировочные (в) и пульсационные (г) характеристики:
сплошная линия – с одним ИП, пунктирная – с двумя ИП

как следующий этап возможно применение запираемых тиристоров GTO, а в перспективе идеальным ключевым элементом будет силовой транзистор IGBT.

Однако, специфика импульсных преобразователей для ослабления возбуждения заключается в том, что они работают при низких напряжениях – даже с учётом запасов по перенапряжениям в переходных режимах не более 150 –200 В (в качестве примера можно привести регулятор тока возбуждения РТ 300/300 для вагонов метро). Поэтому в настоящее время целесообразно использовать наиболее дешёвый вариант с однооперационными тиристорами низких классов при искусственной коммутации с LC – контуром.

Окончательное решение этого вопроса определяется экономическими соображениями при учёте следующих исходных условий:

- покупная цена комплекта однооперационных тиристоров для ИП ослабления возбуждения (включая компоненты контура искусственной коммутации тиристоров) на порядок, т.е. в 6 – 11 раз меньше, чем силовые транзисторы IGBT зарубежного производства, включая их драйверы;

- накоплен многолетний опыт эксплуатации импульсных преобразователей для регулирования тока возбуждения на низковольтных однооперационных тиристорах (электропоезда ЭР200, электровозы ЧС2Т, ЧС6, ЧС7, ЧС200, вагоны метро), причём эти преобразователи надёжны в эксплуатации и требуют минимального технического обслуживания.

Однако, ценовая политика на мировом рынке силовой электроники меняется очень быстро. Поэтому в данной диссертации с учётом обобщения мирового опыта (таблица 1) принято допущение об идеальности ИП. При этом ИП в дальнейшем исследовании рассматривается как идеальный ключевой элемент, у которого в открытом состоянии омическое сопротивление равно нулю, а в закрытом – бесконечности.

В главе 1 рассмотрены также реализованные схемные решения по системам плавного бесконтактного регулирования тока возбуждения. На этой основе в дальнейшем реализован переход к теоретической модели для расчёта

процессов импульсного регулирования магнитного поля в тяговых электродвигателях постоянного тока последовательного возбуждения.

В главе 2 выполнен анализ обоснованных ранее и используемых схем замещения тягового электродвигателя. Эти схемы отличаются, в основном, способами учёта вихревых токов и нелинейности характеристики намагничивания. При обосновании схемы замещения нужно учитывать назначение расчётной модели: – для анализа переходных процессов с большим диапазоном изменения тока двигателя или для расчёта систем импульсного регулирования в квазистационарном режиме с небольшими пульсациями тока. Поставленная задача относится ко второму типу, так что при высокой частоте импульсного регулирования (не менее 400 Гц) целесообразно использовать математическую модель со следующими допущениями:

1. Предполагаем, что в пределах каждого из двух характерных интервалов импульсного цикла (ИП включён, ИП выключен) ток возбуждения тягового электродвигателя изменяется линейно в функции времени, т.е. для каждого указанного интервала $di_B/dt = \text{const}$.

2. Из – за сглаживающего действия вихревых токов магнитный поток и соответственно ЭДС двигателя для квазистационарного режима импульсного регулирования можно считать примерно постоянными, т.е. $e \cong E$.

3. Ввиду небольшой амплитуды пульсаций тока возбуждения его мгновенное значение в уравнениях Кирхгофа заменяем средним, т.е. $i_B \cong I_B$. Но даже при этом допущении расчётная модель позволяет учесть размах пульсаций тока $\Delta I_B = I_{B\max} - I_{B\min}$ и построить пульсационные характеристики.

4. Ток якорной обмотки при регулировании тока возбуждения принимаем постоянным $I_\alpha = \text{const}$, поскольку в цепь якоря включён сглаживающий реактор.

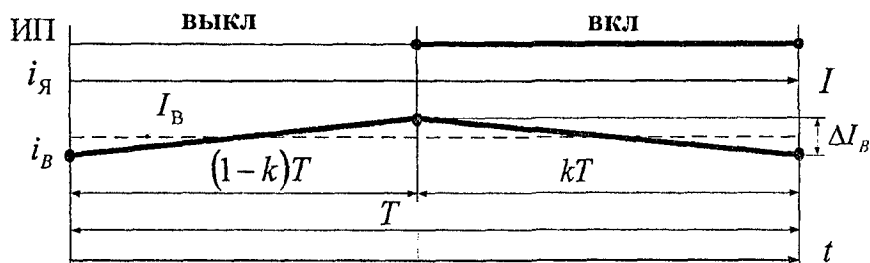
Эти допущения проиллюстрированы в верхней части таблицы 2 для периода импульсного регулирования T при коэффициенте заполнения k .

Таблица 1

Классификация систем импульсного регулирования						
По способу регулирования			По типу базового ключевого элемента			
Широтные (ШИР)	$f = \text{const}, \tau_{и} = \text{var}$	Частотные (ЧИР)	Комбинированные	Тиристор однооперационный	Тиристор GTO	Транзистор IGBT
	$f = \text{var}, \tau_{и} = \text{const}$					

Таблица 2

Обоснование предложенной расчётной модели



	$L_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = (I - i_B) R_{ш}$	$L_B \frac{di_B}{dt} + r_B i_B = 0$
Доп. 1	$\frac{di_B}{dt} = \frac{\Delta I_B}{(1-k)T}$	$\frac{di_B}{dt} = -\frac{\Delta I_B}{kT}$
	Доп. 2, 3	
	$L_B \frac{\Delta I_B}{(1-k)T} + r_B I_B = (I - I_B) R_{ш}$	$-L_B \frac{\Delta I_B}{kT} + r_B I_B = 0$

В нижней части таблицы 2 для каждого из характерных интервалов импульсного цикла записаны исходные дифференциальные уравнения. Затем строкой ниже в аналитическом виде представлено допущение 1. После использования допущений 1– 3 путём подстановки их в исходные дифференциальные уравнения получены линейные алгебраические уравнения (нижняя строка таблицы 2).

В результате решения этих уравнений для исследуемых схем по рисунку 1, а, б получены аналитические выражения для регулировочных и пульсационных характеристик. Они показаны в левых столбцах таблицы 3. Соответствующие им графики для схемы с $R_d = 0$ представлены на рисунке 1, в, г.

В ряде конкретных применений целесообразно усовершенствовать схемы на рисунке 1, а, б путём введения дополнительного резистора $R_d > 0$ последовательно с ИП. Эти усовершенствованные схемы, включая их регулировочные и пульсационные характеристики приведены на рисунке 2, соответствующие им формулы – в правых столбцах таблицы 3.

По этим данным могут быть реализованы предварительные расчёты при проектировании системы импульсного регулирования тока возбуждения.

В главе 3 выполнено сравнение выше предложенной автором универсальной методики расчёта регулировочных и пульсационных характеристик (вместе с обоснованными и принятыми допущениями) с известной (классической) расчётной моделью. Для этого рассмотрена классическая методика расчёта электромагнитных процессов для режима импульсного регулирования тока возбуждения, основанная на непосредственном решении соответствующих дифференциальных уравнений аналитическим способом. За основу этой методики приняты исследования и рекомендации, содержащиеся в монографиях профессоров Розенфельда В.Е. и Некрасова В.И., в кандидатской диссертации Вейцмана Л.Ю. Основным из этих допущений указанных авторов является принцип экспоненциального

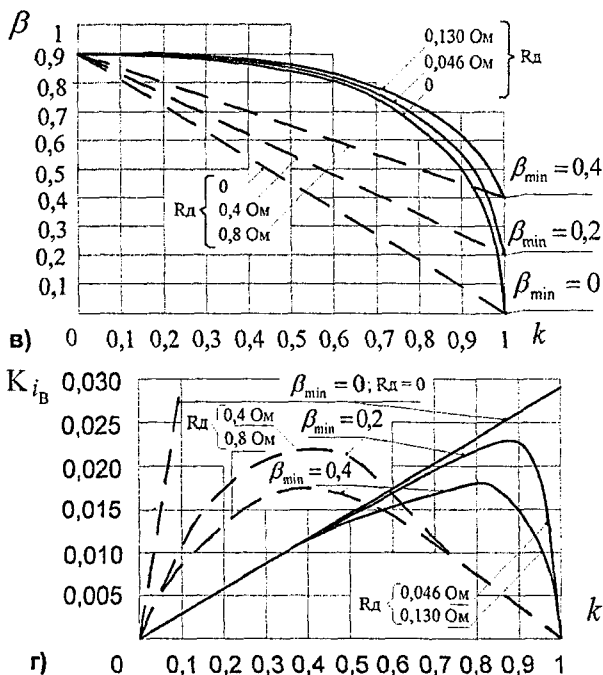
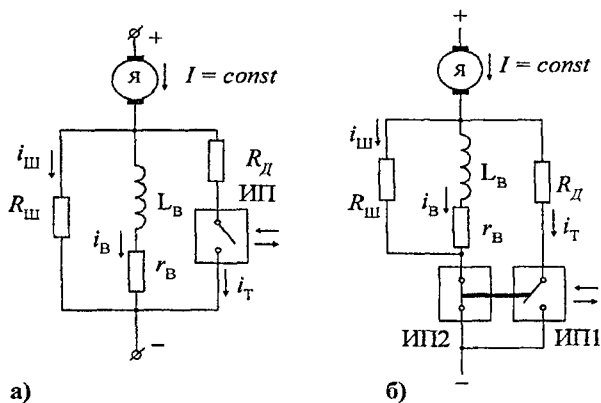


Рисунок 2 – Базовые схемы плавного ослабления тока возбуждения (а, б) с дополнительным сопротивлением ($R_d > 0$) и их регулировочные (в) и пульсационные (г) характеристики:

сплошная линия – с одним ИП; пунктирная – с двумя ИП

Таблица 3

Тип характеристики	Схема импульсного регулирования			
	Рис.1, а $R_D = 0$	Рис.1, б $R_D = 0$	Рис.2, а $R_D > 0$	Рис.2, б $R_D > 0$
$\beta(k)$	$\frac{1}{\frac{r_B}{(1-k)R_{Ш}} + 1}$	$\frac{1-k}{\frac{r_B}{R_{Ш}} + 1}$	$\frac{R_{Д} + R_{Ш}(1-k)}{R_{Д}\left(\frac{r_B}{R_{Ш}} + 1\right) + r_B + R_{Ш}(1-k)}$	$\frac{\left(1 + \left(\frac{R_{Д}}{R_{Ш}} - 1\right)k\right)}{\left(\frac{r_B}{R_{Ш}} + 1\right)}$
$\Delta I_B(k)$	$\frac{I_B k T r_B}{L_B}$	$\frac{I_B (r_B + R_{Ш}) k T}{L_B}$	$\frac{I T r_B R_{Ш} \left(\frac{R_{Д}}{R_{Д} + R_{Ш}} - 1\right)}{L_B \left[\frac{r_B + R_{Ш}}{k} - \frac{\left(r_B + \frac{R_{Д} R_{Ш}}{R_{Д} + R_{Ш}}\right)}{(1-k)} \right]}$	$\frac{I T}{L_B} (R_{Ш} - R_{Д})(1-k)k$
$K_{iB} = \frac{\Delta I_B}{I_B}$	$\frac{k T r_B}{L_B}$	$\frac{(r_B + R_{Ш}) k T}{L_B}$	$\frac{r_B R_{Ш} T k (1-k)}{L_B [R_{Д} + R_{Ш}(1-k)]}$	$\frac{\left(1 - \frac{R_{Д}}{R_{Ш}}\right) (1-k) T k \left(\frac{r_B}{R_{Ш}} + 1\right)}{L_B \left(1 - \left(1 - \frac{R_{Д}}{R_{Ш}}\right) k\right)}$

характера изменения тока в обмотках тягового электродвигателя.

Начальный этап решения этой задачи при любых допущениях — это запись дифференциальных уравнений отдельно для каждого характерного интервала импульсного цикла. Это соответствует первому этапу методики, предлагаемой в данной диссертации (см. гл. 2). Однако, далее указанные выше авторы переходят к непосредственному решению обыкновенных дифференциальных уравнений, которые являются линейными из-за принятых допущений. Решения получены в форме комбинации достаточно сложных экспоненциальных функций. Тем не менее расчёт регулировочных и пульсационных характеристик по конечным выражениям достаточно просто выполняется на персональном компьютере.

Учёт экспоненциального характера изменения тока упомянутыми выше авторами был обоснован только при малых частотах импульсного регулирования (они рассматривали частоты 50 – 400 Гц). Это было оправдано на начальном этапе развития силовой электроники.

При современных полупроводниковых приборах (одно- и двухоперационные тиристоры) могут быть реализованы частоты как минимум 400 Гц и выше, а при силовых транзисторах IGBT — до 3 – 4 кГц. Поэтому предлагаемая в данной диссертации методика вполне может быть использована в практических расчётах.

Для обоснования этого утверждения выполнены сравнительные расчёты для тягового электродвигателя УРТ-110 по двум методикам:

- классическая (Розенфельд В.Е., Некрасов В.И., Вейцман Л.Ю.);
- предложенная в данной диссертации (см. гл. 2).

Результаты, полученные по аналитическим выражениям для относительной пульсации тока возбуждения по двум рассматриваемым выше методикам, имеют хорошее совпадение. Но регулировочные характеристики по этим системам имеют расхождение 5 – 6 %.

В главе 4 обоснована методика расчёта потерь энергии при выборе вариантов практической реализации систем плавного бесконтактного регулирования тока возбуждения. С практической точки зрения применяемые реостатные позиции ослабления возбуждения являются ходовыми и экономичными, т.е. в классических схемах регулирования тягового электропривода при включении ослабления возбуждения суммарные потери энергии в обмотке возбуждения и в цепи её шунтирования будут меньше, чем потери в обмотке возбуждения на полном поле.

Однако, в системе импульсного регулирования необходим расчёт потерь с целью определения установленной мощности шунтирующего резистора, который всегда должен быть предусмотрен, и дополнительного резистора, если он установлен. Для схемы типа 1 получаем:

$$P_{\text{ш}} = I^2(1 - \beta)^2 R_{\text{ш}} \left[\frac{R_{\text{д}}^2}{(R_{\text{д}} + R_{\text{ш}})^2} k + (1 - k) \right], \quad (1)$$

$$P_{\text{д}} = I^2 \frac{R_{\text{ш}}^2 R_{\text{д}}}{(R_{\text{ш}} + R_{\text{д}})^2} (1 - \beta)^2 k. \quad (2)$$

Для схемы типа 2 аналогичные выражения имеют вид:

$$P_{\text{ш}} = I^2 R_{\text{ш}} [(1 - \beta)^2 (1 - k) + \beta^2 k], \quad (3)$$

$$P_{\text{д}} = I^2 R_{\text{д}} k. \quad (4)$$

Соответствующие графики показаны на рисунке 3.

Анализ этих зависимостей показывает, что в схеме типа 1 мощность $R_{\text{ш}}$ и $R_{\text{д}}$ меньше, чем в схеме типа 2. При этом максимум потерь в $R_{\text{ш}}$ для схемы типа 1 соответствует коэффициенту заполнения $k = 0,4 - 0,9$, для схемы типа 2 коэффициенту $k = 0,2 - 0,8$.

Потери в $R_{\text{д}}$ для схемы типа 1 максимальны при $k > 0,5$, а в схеме типа 2 они линейно растут в функции k .

Обобщение этих данных позволяет сделать вывод о том, что схема типа 1 (рисунок 2.10, и рисунок 2.15,а а) более экономична по суммарным потерям в $R_{\text{д}}$ и $R_{\text{ш}}$. К тому же эта схема проще, особенно при использовании тиристорov

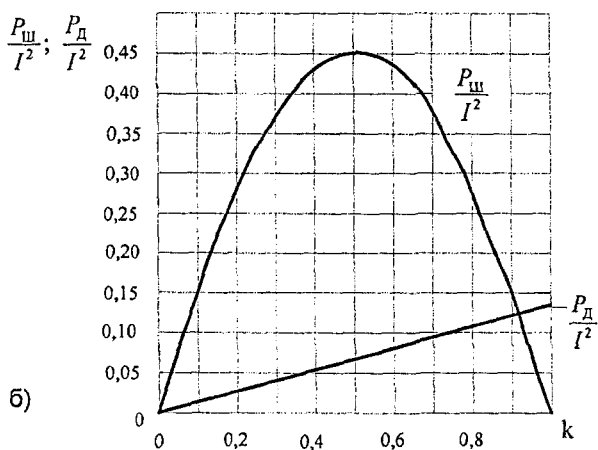
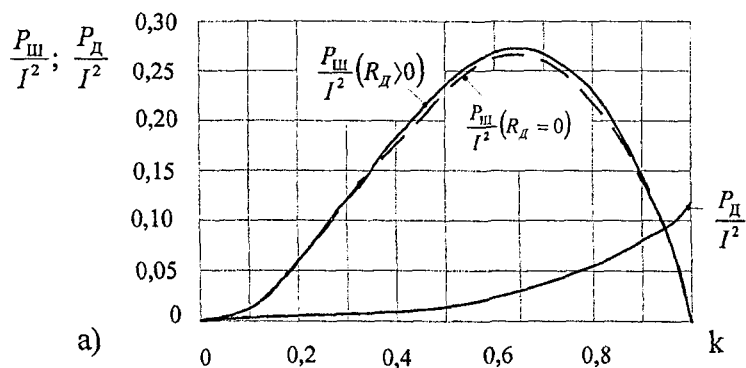


Рисунок 3 – Усреднённая за период импульсного цикла мощность резисторов:

а) схема типа 1; б) схема типа 2

ГТО или транзисторов IGBT. Ёе недостаток заключается в наличии существенно нелинейной регулировочной характеристики.

В главе 5 дана оценка влияния вихревых токов в магнитной системе тягового электродвигателя. Для этого использована эквивалентная схема замещения (рис. 4, а), принятая в большинстве работ по импульсному регулированию и по переходным процессам. Анализ выполнен в два этапа:

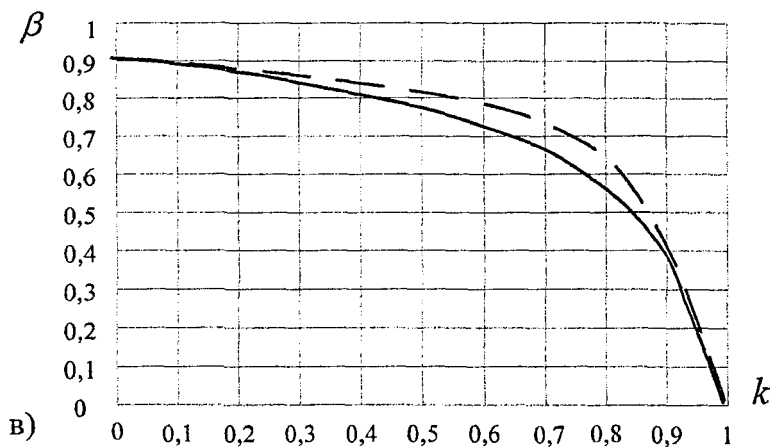
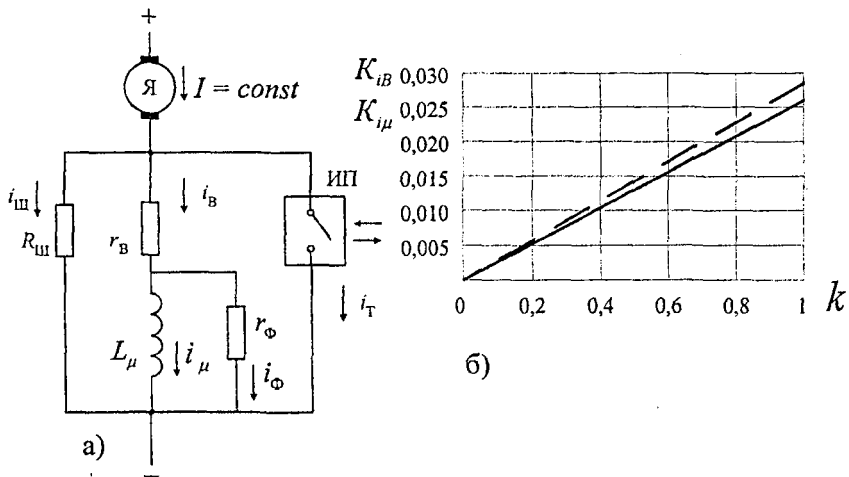


Рисунок 4 – Эквивалентная схема замещения $R_d = 0$ (а), пульсационные (б) и регулировочные (в) характеристики:
 сплошная линия – с учётом вихревых токов ($K_{i\mu}$);
 пунктирная линия – без учёта вихревых токов (K_{iB})

при $R_d = 0$ и при $R_d > 0$. Принятые ранее обоснованные допущения, сформулированные в гл. 2 позволили перейти от системы дифференциальных уравнений первого порядка к линейным алгебраическим уравнениям, которые представлены в матричной форме. Решая их с помощью правила Крамера, выводим следующие зависимости для регулировочных и пульсационных (абсолютная и относительная) характеристик с учётом вихревых токов (представлены в таблице 4 для $R_d = 0$ и $R_d > 0$).

Для $R_d = 0$ результаты расчётов представлены на рисунке 4, б, в. Для эквивалентной схемы с дополнительным сопротивлением $R_d > 0$ результаты расчётов (см. таблицу 4) представлены на рисунке 5.

Из анализа этих зависимостей следует, что при $\beta \geq 50\%$ (это характерно для мощных тяговых электродвигателей электровозов) расхождение расчётных данных в рассматриваемой методике при учёте и без учёта вихревых токов находится в пределах погрешности инженерных расчётов. Как и следовало ожидать, неучёт вихревых токов ведёт к завышению амплитуды пульсаций тока возбуждения. Кроме того, вихревые токи способствуют сглаживанию регулировочной характеристики.

Для более глубокого ослабления возбуждения (на электропоездах ЭР2Т, ЭР2Р, ЭД2, ЭД4 до $\beta = 19\%$) расхождение указанных данных становится существенным и поэтому учёт вихревых токов по схемам замещения (рисунки 4, 5) необходим.

В любом варианте расчётов по пульсационным характеристикам неучёт вихревых токов даёт несколько завышенные результаты. Поэтому эта универсальная методика, предложенная автором (таблица 3), вполне может быть использована на начальном этапе проектирования импульсных регуляторов для ослабления возбуждения при предварительном выборе основных параметров в системе импульсного регулирования, включая рабочую частоту f ($f = 1/T$), тип регулятора (с линейной или нелинейной регулировочной характеристикой, предельно допустимый уровень пульсаций

Таблица 4

Тип характеристики	Схема импульсного регулирования тока возбуждения с учётом вихревых токов	
	Рис. 4, $R_d = 0$	Рис. 5, $R_d > 0$
$\beta(k)$	$\frac{(r_B + r_\Phi)R_{III}(1-k)}{r_B(r_B + r_\Phi + R_{III}) + R_{III}r_\Phi(1-k)}$	$\frac{R_{III}(r_B + c + r_\Phi) + (r_B + r_\Phi)(c - R_{III})k}{R_{III}(r_B + c + r_\Phi) + r_B(r_B + c + r_\Phi) + (c - R_{III})r_\Phi k}$ где $c = \frac{R_{III}R_d}{R_{III} + R_d}$
$\Delta I_\mu(k)$	$\frac{IR_{III}}{r_\Phi T \left[\frac{(r_B + R_{III})(r_B + r_\Phi)}{r_B k} + \frac{(r_B + R_{III} + r_\Phi)}{(1-k)} \right]}$	$\frac{I T r_\Phi r_B (R_{III} - c)(1-k)k}{L_\mu [(r_B + R_{III})(r_B + c + r_\Phi)(1-k) + (r_B + c)k(1 + r_\Phi)]}$
$K_{i\mu} = \frac{\Delta I_\mu}{I_\mu}$	$\frac{T r_\Phi r_\Phi k}{(r_B + r_\Phi)L_\mu}$	$\frac{T r_\Phi r_B (R_{III} - c)(1-k)k}{L_\mu [(r_B + R_{III})(r_B + c + r_\Phi)(1-k) + (r_B + c)k(1 + r_\Phi)]\beta}$

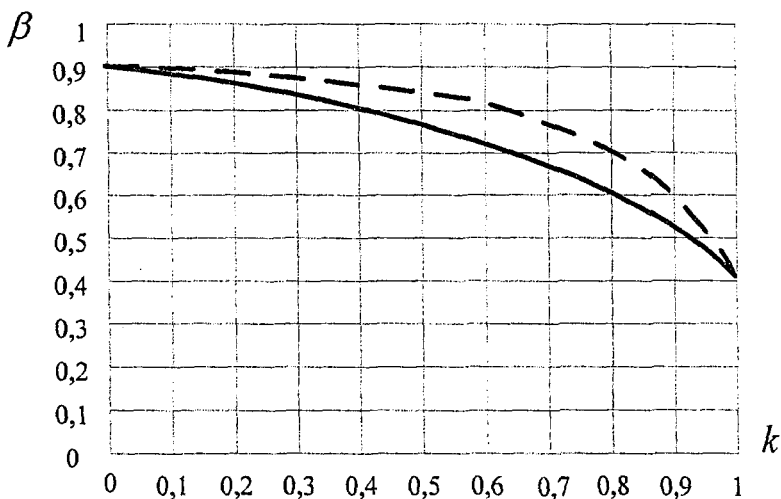
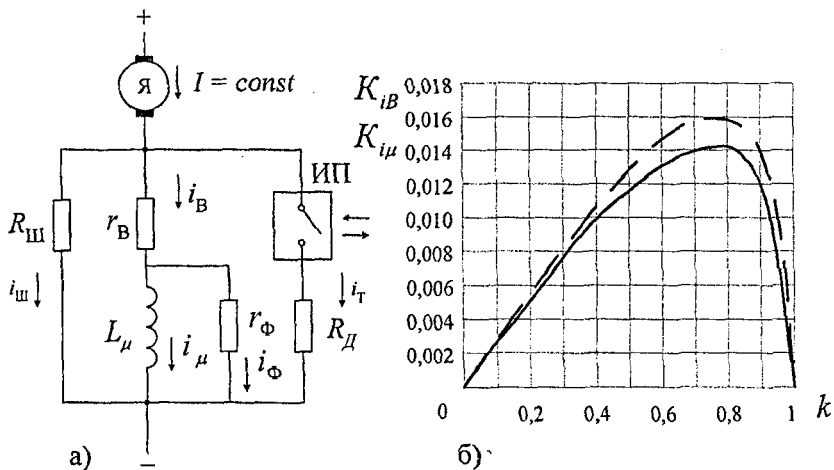


Рисунок 5 – Эквивалентная схема замещения $R_D > 0$ (а), пульсационные (б) и регулировочные (в) характеристики:
 сплошная линия – с учётом вихревых токов ($K_{i\mu}$);
 пунктирная линия – без учёта вихревых токов (K_{iB})

тока возбуждения). На следующем этапе проектирования следует уточнить результаты по формулам таблицы 4 (с учётом вихревых токов), а на окончательном этапе необходимо выполнить расчёт выбранного варианта путём численного решения дифференциальных уравнений при помощи пакета прикладных программ (Math). Завершающим этапом является проверка на испытательном стенде с выполнением замеров регулировочных и пульсационных характеристик.

В приложении 1 обобщены данные по предельным ограничениям режима ослабления возбуждения с учётом пульсаций тока возбуждения. Эти данные чётко регламентированы в технических характеристиках тяговых электродвигателей.

В приложении 2 приведена методика расчёта пульсационных потерь энергии в тяговых электродвигателях при импульсном регулировании. Показано, что потери при этом увеличиваются на 3 – 4 % по отношению к активным и магнитным потерям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проанализированы, обобщены и классифицированы схемные решения по регулированию тока возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока. Соответствующие системы несмотря на разнообразие схемных решений могут быть отнесены к двум базовым типам – с линейной и нелинейной регулировочными характеристиками. Система с линейной характеристикой предпочтительна для регулирования тяговых электроприводов, но она более сложна по силовой части.
2. На основе анализа ранее предложенных классических расчётных моделей тягового электропривода с импульсным регулированием в диссертации обоснованы допущения, позволяющие алгебраизировать исходные дифференциальные уравнения. Таким путём получены обобщённые

аналитические выражения для регулировочных и пульсационных характеристик системы, которые рекомендованы для использования на этапах выбора варианта и эскизного проектирования системы импульсного регулирования.

3. Проанализирована возможность усовершенствования базовой схемы импульсного регулирования с целью исключения импульсного режима и соответственно пульсационных потерь в зоне предельного ослабления возбуждения. Соответствующая математическая модель получается сложнее исходной, но тем не менее она позволила получить обобщённые выражения для регулировочных и пульсационных характеристик.
4. Обоснован способ учёта вихревых токов в магнитной системе тягового электродвигателя в квазистационарном режиме импульсного регулирования. Для удобства расчёта и компьютерного моделирования эта математическая модель представлена в матричной форме. Учёт вихревых токов ведёт к сглаживанию пульсаций тока возбуждения, а регулировочные характеристики в схемах первого типа, т. е. с одним импульсным преобразователем, при этом изменяются с уменьшением их кривизны.
5. Практические рекомендации сводятся к обоснованию схемных решений для применения на электроподвижном составе постоянного тока. Это обеспечивает необходимое быстродействие применяемых систем регулирования (стабилизация пускового тока) и защиты тягового электропривода в зоне ослабления возбуждения, позволяет снизить массу электрооборудования за счёт исключения индуктивных шунтов.

ПЕРЕЧЕНЬ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Дудченко Д.Н. Плавное регулирование тяговых электродвигателей электропоездов, как средство повышения их надёжности // Труды VIII Научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ,

2007.

2. Дудченко Д.Н. Анализ процессов при импульсном регулировании возбуждения тягового электродвигателя постоянного тока // Вестник МИИТа, Научно-технический журнал. – Вып. 18.: МИИТ, 2008.

3. Дудченко Д.Н. Плавное регулирование поля тяговых электродвигателей постоянного тока // Труды V международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «*TRANS-MECH-ART-CHEM*». – М.: МИИТ, 2008. с. 60.

4. Дудченко Д.Н. Снижение электромагнитного мешающего влияния в системе импульсного регулирования возбуждения тяговых электродвигателей // Труды IX Научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, 2008.

5. Дудченко Д.Н. Совершенствование систем регулирования тяговых электродвигателей постоянного тока при помощи импульсных преобразователей // Международная научно – практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и молодёжь в начале нового столетия»: Сб. научн. Тр. – Белгородская обл., г. Губкин, 2008.

6. Дудченко Д.Н. Плавное регулирование возбуждения тяговых электродвигателей постоянного тока // Неделя науки – 2008 «Наука МИИТа транспорту – 2008»: М., 2008.

7. Дудченко Д.Н. Импульсное регулирование тока возбуждения тяговых электродвигателей на электроподвижном составе постоянного тока // Научно – технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта»: Московская обл., п.Томилино, 2008, №2.

8. Дудченко Д.Н. Анализ систем плавного ослабления возбуждения для тяговых электродвигателей постоянного тока // Труды X Научно-практической конференции «Безопасность движения поездов». – М.: МИИТ, 2009

9. Дудченко Д.Н. Плавное регулирование магнитного потока тяговых электродвигателей постоянного тока последовательного возбуждения // Научно

– технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта»: Московская обл., п.Томилино, 2009, №1

10. Дудченко Д.Н. Регулирование тяговых электродвигателей постоянного тока // Вестник МИИТа, Научно-технический журнал. – Вып. 20.: МИИТ, 2009.

11. Дудченко Д.Н. Развитие электрической тяги в период финансово – экономического кризиса // Труды VII международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «*TRANS-MECH-ART-CHEM*». – М.: МИИТ, 2010.

Дудченко Дмитрий Николаевич

**ПЛАВНОЕ БЕСКОНТАКТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА В
ОБМОТКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
ПРИ ПОМОЩИ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать - 14.09.10.

Заказ № 544.

Объем 1,5 п.л.

Формат бумаги 60x84 1/16

Тираж 80

127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9, Типография МИИТ