

На правах рукописи



Мин Ту Аунг

**ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ДВИГАТЕЛЯМИ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Специальность 05.09. 03. – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Комсомольск-на-Амуре – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

Научный руководитель: **Суздорф Виктор Иванович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «КнАГУ».

Официальные оппоненты: **Сарваров Анвар Сабулханович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированный электропривод и мехатроника» ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (МГТУ).

Мальшева Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

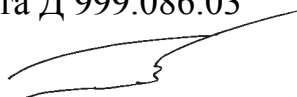
Ведущая организация: Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), г. Томск

Защита диссертации состоится «26» сентября 2019 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.086.03 в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д.27, ауд.201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/115. Отзывы на автореферат присылать в двух экземплярах, заверенных печатью организации по адресу: Россия, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, Комсомольский на- Амуре государственный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 999.086.03, e-mail: eraru@knastu.ru

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 999.086.03
кандидат технических наук, доцент



А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Энергосбережение – одна из актуальных областей исследований в энергетическом секторе. Известно, что потери электрической энергии происходят в секторе потребления – до 90%, потери на ее передачу 9 – 10% (в США – 8%, в ФРГ и Японии – 5%). При этом более 60% электроэнергии потребляется электроприводами. Если разделить указанных потребителей по группам мощностей (по открытым данным ЕС), то на долю приводов с мощностью более 75 кВт приходится 23%, от 2 до 7,5 – 38% и до 2 кВт – 39%. Если сравнить данные по продажам электроприводов в Европе (International Energy Agency), то в 2016 году соотношение составило: электроприводы с двигателями мощностью 0,2 – 2 кВт - 932 тыс. единиц, свыше 75 кВт – 33 тыс. единиц. Соответственно распределение электроприводов между промышленным применением и сферой бытового использования составило 60/40%. При разработке систем электропривода большинство ученых обращают внимание на исследования мощных электроприводов. Мощные электроприводы имеют высокий КПД, поэтому добиться значительного энергосберегающего эффекта трудно. Несмотря на то, что электроприводы с малой потребляемой мощностью и с двигателями последовательного возбуждения (ДПВ) широко используются во многих бытовых электроприборах, электрифицированном инструменте, строительном оборудовании и медицинских инструментах, КПД составляет только 30-60%. Таким образом, повышение эффективности этих мало-мощных электроприводов позволит сэкономить мегаватты часов электроэнергии из-за их массового использования.

Наличие нелинейностей и непредсказуемой нагрузки на валу делает ДПВ сложным объектом для управления и для математического описания. Поэтому, многие вопросы остаются открытыми для исследователей сегодняшнего дня. В этом аспекте энергосберегающее управление ДПВ, используемого в основном в массовом электроприводе малой мощности, является важной научной и практической задачей.

Диссертационная работа посвящена разработке энергосберегающих способов управления на базе критериев оптимальности, оптимизации динамического КПД нелинейных электромеханических систем, устройств управления ДПВ малой мощности путем синтеза структуры и алгоритмов управления, анализа динамических свойств системы управления электроприводом с ДПВ. Основным приоритетом исследования является снижение потерь именно за счет эффективного управления в динамических режимах.

Работа выполнялась в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники: в Российской Федерации - критическая технология согласно перечню (Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899): Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная

энергетика; Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

Степень проработанности темы исследования. Диссертационная работа выполнена с учетом результатов отечественных и зарубежных ученых, полученных в ходе исследований в области энергоэффективности электроприводов с двигателями последовательного возбуждения. В работах ученых Ильинского Н.Ф., В.П., Кагана В.Г., Лебедева Г.В., Малинина Л.И., Власьевского С.В., Мельниченко О.В., Суздорфа В.И., Алехина А.Е., Бейнаровича В.А., Петрова Ю.П., Бельмана М.Х., Fujimaki T., Dubey G.K., Мешкова А.С. и других - показана неоднозначность получаемых решений задачи оптимизации с точки зрения потерь для ДПВ. Многие ученые внесли значительный вклад в развитие энергосбережения за счет улучшения свойств устройств преобразовательной техники, конструкционных решений в области электромеханики, поэтому в настоящей работе эти аспекты не стоят в качестве решаемых задач. На наш взгляд, открытым стоит вопрос оптимизации КПД именно за счет оптимизации управления. В задаче оптимизации управления основной проблемой осталась зависимость параметров электропривода в динамических процессах от скорости двигателя. Поэтому поиск оптимального решения, с точки зрения энергосбережения, наиболее актуален в научном и практическом значении именно в динамических режимах работы. В диссертационной работе автор придерживается термина «энергетический КПД», введенного профессором Ильинским Н.Ф.

Целью диссертационной работы является повышение энергетического КПД электроприводов с ДПВ в динамических режимах работы.

Значимость результатов заключается в развитии теоретических подходов к оптимизации энергосберегающих режимов работы приводов на основе двигателей последовательного возбуждения за счет повышения динамического энергетического КПД. Значительная часть электропривода промышленного назначения и еще большая в сфере строительства, медицины и быта использует двигатели последовательного возбуждения, являясь объектом приложения результатов исследования. Решаемая задача на сегодня не имеет общего решения в мировой и отечественной науке.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы следующие **задачи**:

1. Выявить наличие существенных функциональных связей переменных параметров ДПВ с координатами движения в переходных режимах работы электропривода с учетом их физической реализуемости.

2. Исследовать энергетический КПД привода с ДПВ, найти оптимальные траектории движения в пространстве управляемых параметров.

3. Решить задачу инвариантности динамических свойств ДПВ от режимов работы в диапазоне регулирования скорости.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена новая математическая модель электропривода с двигателями последовательного возбуждения, позволившая установить функциональные зависимости переменных параметров системы регулирования от координат движения, что позволило упростить поиск оптимальных траекторий управления.
2. Предложен алгоритм нелинейной коррекции параметров электропривода с двигателями последовательного возбуждения, обеспечивающий условия выполнения классической вариационной задачи оптимизации.
3. Синтезирован алгоритм оптимального управления электроприводом с ДПВ с точки зрения минимизации потерь электрической энергии в динамических режимах работы и предложен способ его реализации.

Практическая значимость работы:

1. Предложены пути реализации новых функциональных свойств и повышения энергетических показателей электропривода. Результаты исследований позволяют повысить качество ручного электрифицированного инструмента, бытовых машин и приборов, сложной бытовой техники, могут использоваться при разработке отечественных устройств с улучшенными энергетическими показателями, повышая их конкурентоспособность; результаты работы могут также использоваться при проектировании тяговых электроприводов
2. Даны рекомендации по инженерной методике расчета структуры и параметров электропривода в различных вариантах практического использования.

Объектом исследования является

электропривод на базе двигателя последовательного возбуждения.

Предметом исследования являются

оптимальные по критерию максимального энергетического КПД функциональные зависимости переменных движения, алгоритмы управления и техническая реализация требуемых характеристик электропривода.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием методов математического моделирования, динамического программирования, дифференциального и интегрального исчисления, оптимального управления, экспериментальных исследований.

Реализация работы осуществлена в рамках научного направления кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок и технологических комплексов ФГБОУ ВО «КнАГУ»: «Энергосбережение и энергоэффективность». Результаты работы переданы в форме методик проектирования и разработанных алгоритмов энергосберегающего управления, используется в дисциплине «Энергосберегающие системы электроприводов» основной профессиональной образовательной программы подготовки бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехни-

ка», профиль «Электропривод и автоматика» в лекционных занятиях и практических заданиях.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, форумах и конкурсах:

- Уфимский Государственный Авиационный технический университет. – Уфа: РИК УГАТУ, 2017.

- 4-й международный форум молодых ученых и аспирантов, Томск, ТПУ, 2016

- Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г.

- II Всероссийская научно-практическая конференция «Электропривод на транспорте и в промышленности». (Хабаровск, 20–21 сентября 2018г.), ДВГУПС, 2018.

- III ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС научно-исследовательских работ студентов и аспирантов вузов и научных академических институтов России по естественным, техническим и гуманитарным наукам «Шаг в науку», Томск, ТПУ, 2018;

- 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon).

Публикации. По результатам исследований, отраженных в диссертации опубликовано 15 работ, из них 13 – научные статьи и тезисы докладов, включая 3 статьи в журналах рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в журналах, индексируемых в наукометрической системе Web of Science, 2 статьи в Scopus, а также 2 патента на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 161 наименований и приложения. Основная часть диссертации изложена на 142 страницах, в том числе 58 рисунков и 2 таблицы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в открытой печати. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы в области исследований: «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается информация о задачах исследования двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Формулируются цели и основные задачи в области энергосбережения и динамической коррекции систем управления при изменяющихся заданиях на скорость и переменной нагрузке. Рассматриваются научная и практическая значимость работы.

В первой главе представлен анализ работ ученых, изучающих вопросы энергосбережения в электроприводах. Показано, что в динамических режимах работы оценка эффективности энергетических процессов по соотношению полезной и потребляемой мощности не удовлетворяет установленному критерию. Этот подход позволяет оценить только статический, но не динамический режим. Энергия, потребленная системой, определяется путем интегрирования по времени потребляемой мощности.

Анализ результатов исследований позволил сформулировать следующие задачи:

1. Выявить наличие существенных функциональных связей переменных параметров ДПВ с координатами движения в переходных режимах с учетом физической реализуемости.
2. Исследовать энергетический КПД привода с ДПВ, найти оптимальные траектории движения в пространстве управляемых параметров.
3. Решить задачу инвариантности динамических свойств ДПВ от режимов работы в диапазоне регулирования.

Во второй главе представлено исследование электромагнитных процессов в ДПВ. Проведен анализ различных подходов к математическому моделированию динамических процессов систем электропривода, предложена обоснованная стратегия проводимого исследования. Сформулирована задача поиска функциональных связей между параметрами движения электропривода.

Для составления алгоритма анализа двигателя как объекта управления при детерминированных входных воздействиях и начальных условиях выведены выражения для двухмерных нестационарных передаточных функций и нестационарных спектральных характеристик выходных переменных: скорости вращения двигателя $\Omega(t)$, момента $M(t)$ и тока цепи якоря $I(t)$. Учитывая, что выходные координаты описываются кусочно-гладкими, монотонными функциями, целесообразно в качестве базисной принять систему нестационарных ортонормированных тригонометрических функций, при этом получают наиболее простые выражения для спектральных характеристик. Учитывая свойства линейности нестационарных спектральных характеристик, производной функции времени при ненулевых начальных условиях и произведения функций времени, получим (здесь и далее нижний индекс «с» будет указывать на спектральную характеристику соответствующей функции):

$$\left. \begin{aligned} E_c(t) - P_{cc}(t,t)\psi_c(t) - R_d I_c(t) &= U_c(t) + \psi_0 \Delta_c(t); \\ J^{-1} P_{cc}^{-1}(t,t)\Omega_c(t) - M_c^c(t) &= J^{-1} \Omega_0 \Delta_c(t) - M_c^c(t) \Delta_c(t); \\ E_c(t) &= k \psi_c^M(t) \Omega_c(t); \\ M_c(t) &= \psi_c^M(t) I_c(t); \\ U_c(t) &= A_{cc}(t,t) U_c^0(t), \end{aligned} \right\}$$

где $P_{cc}(t, t)$ – двумерная нестационарная передаточная функция дифференцирующего звена; $A_{cc}(t, t)$ – двумерная нестационарная передаточная функция преобразователя, представленного звеном с переменным коэффициентом усиления; $V_{ccc}(t, t)$ – трехмерная передаточная функция множительного звена; $\Omega_c(t)$, $I_c(t)$, $U_c(t)$, $E_c(t)$, $\psi_c(t)$, $\psi_c^M(t)$, $M_c(t)$, $M_c^c(t)$ – нестационарные спектральные характеристики частоты вращения, тока, выходного напряжения преобразователя, э.д.с. вращения, полного потокосцепления, потокосцепления взаимной индукции обмоток якоря и возбуждения, электромагнитного момента и момента сопротивления на валу двигателя, соответственно; Ω_0 , ψ_0 – начальные условия; $\Delta_c(t)$ – нестационарная спектральная характеристика дельта-функции; $U_c^0(t)$ – нестационарная спектральная характеристика модулирующей функции входного напряжения; J – момент инерции системы электропривода, приведенный к валу электродвигателя. Для составления многомерной передаточной функции исследуемой системы были упорядочены внешние воздействия и выходные сигналы в виде матриц-столбцов $g(\tau)$ и $x(\tau)$:

$$g(t) = \begin{bmatrix} U(\tau) & M^c(\tau) & t_0(\tau) & \Omega_0 & \psi_0 \end{bmatrix}^T; \\ x(t) = \begin{bmatrix} \Omega(\tau) & M(\tau) & I(\tau) \end{bmatrix}^T,$$

где $M^c(\tau)$ – статический момент на валу двигателя; t_0 – начальное значение времени на рассматриваемом интервале.

Приведенные зависимости позволили построить структурную схему системы (рис.1). Операторные изображения здесь заменены спектральными характеристиками сигналов.

Нелинейность, связанная с кривой намагничивания двигателя, аппроксимирована усеченным ортонормированным рядом. С учетом симметричности нелинейности магнитную проницаемость можно выразить:

$$\mu_j = a_1 I + a_3 I^3 + a_5 I^5, \quad 0 < I < I_{max}.$$

Результат анализа соотношений тока и скорости двигателя при исследовании электромагнитных процессов в ДПВ, приведен на рисунке 2.

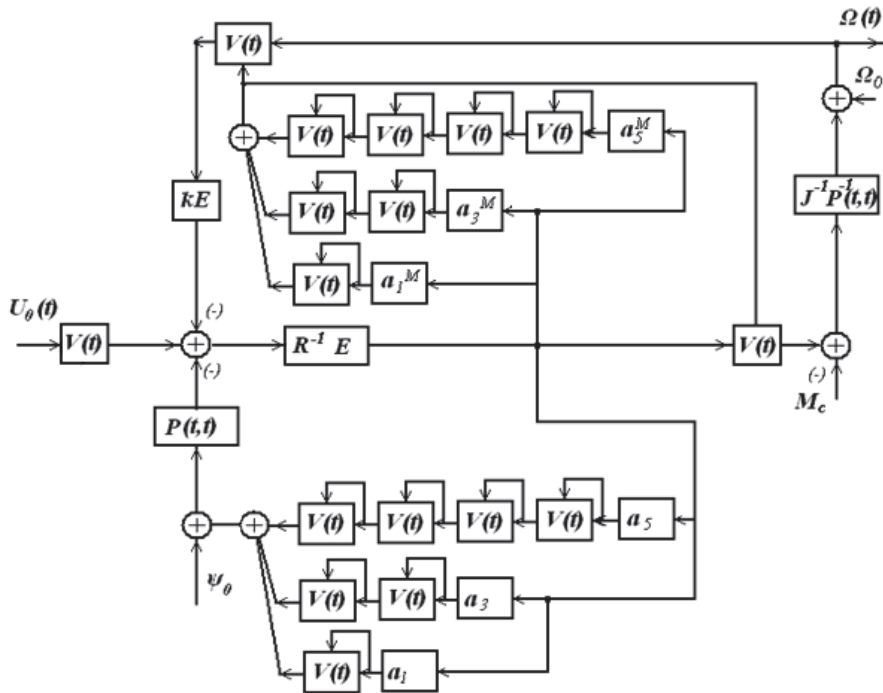


Рис. 1. Структурная схема ДПВ с «гладким» питанием

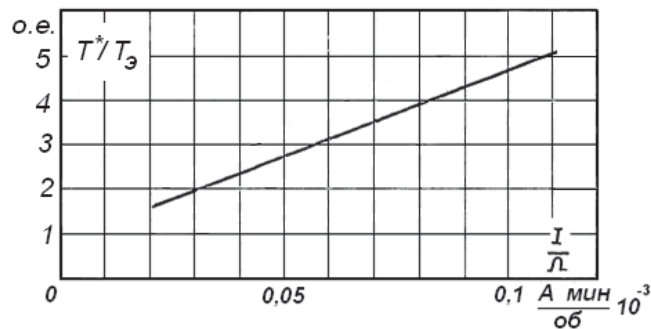


Рис. 2. Относительное значение «постоянной времени» тока двигателя T^* в зависимости от соотношения скорости вращения вала Ω и тока I двигателя ($T_3 = L/R$)

Для математического описания преобразователя удобно использовать единичные функции как временную последовательность импульсов. Такое описание позволяет исследовать поведение преобразователя в мгновенных величинах и, что важно, в режимах прерывистого тока, которые являются типичными для рассматриваемых систем электропривода при однофазном питании.

Выходное напряжение преобразователя (неревверсивный управляемый мостовой выпрямитель):

$$U(\tau, \theta) = U_m \sum_{n=0}^{\infty} \sin\left(\tau - \frac{2\pi n}{m}\right) \left[1\left(\tau - \frac{2\pi n}{m} - \theta\right) - 1\left(\tau - \frac{2\pi n}{m} - \theta - \lambda_n\right) \right],$$

где U_m – амплитуда питающего напряжения; n – номер вентиля, отсчитываемого от момента подачи первого сигнала управления; θ – угол управления n -го включенного вентиля; τ – текущая угловая координата питающего напряжения; λ_n – угол проводимости включенного вентиля; $1(F)$ – единичная функция, которая равна 1, при $F > 0$ и равна 0 при $F \leq 0$.

Обобщенная функция $U(\tau, \theta)$ может быть представлена в спектральном виде множительным звеном, на один вход которого поступает непрерывный сигнал $U_m \sin(\tau - \frac{2\pi n}{m})$, а на другой – последовательность импульсов

$\sum_{n=0}^{\infty} 1(\tau - \theta)$. Слагаемое λ_n учитывается тем, что нестационарная спектральная характеристика выходного напряжения преобразователя за пределами нестационарного отрезка $t_n = \tau - \frac{2\pi n}{m} - \theta - \lambda_n$ равна нулю.

Блок-схема расчета нелинейной системы с учетом преобразователя приведена на рисунке 3.

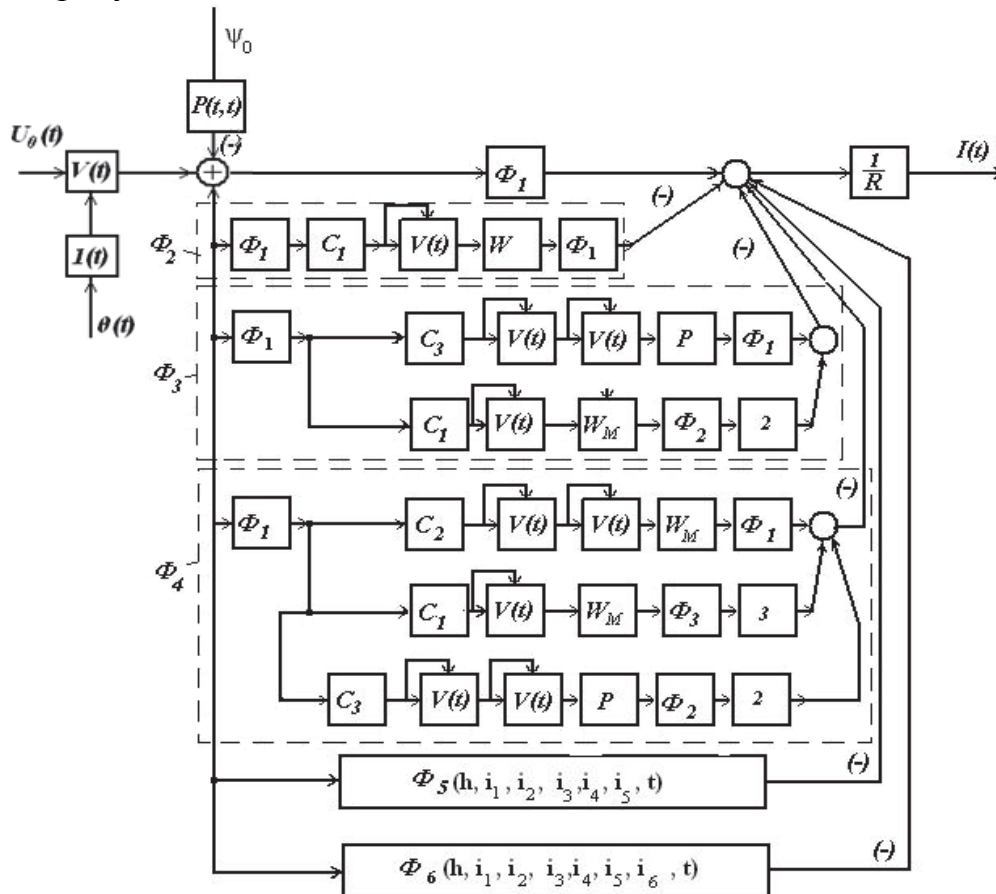


Рис. 3. Блок-схема расчета нелинейной системы с учетом преобразователя

Для решения задачи анализа системы на всем интервале динамического процесса может быть использован предлагаемый алгоритм расчета системы регулирования на основе спектрального метода В.В. Солодовни-

кова с использованием метода припасовывания. Вначале определялись начальные условия в системе, далее на основе принятой системы базисных ортонормированных функций их спектральные характеристики. Аналогично определялись спектральные характеристики других входных сигналов и передаточные функции всех звеньев системы. Алгоритм расчета приведен на рисунке 4.

Расчет поведения системы производился на выбранном интервале времени, при этом конечные значения выходных координат движения являлись начальными для последующего интервала времени. Расчет выполнен по одним и тем же уравнениям, менялись лишь начальные условия на каждом интервале.

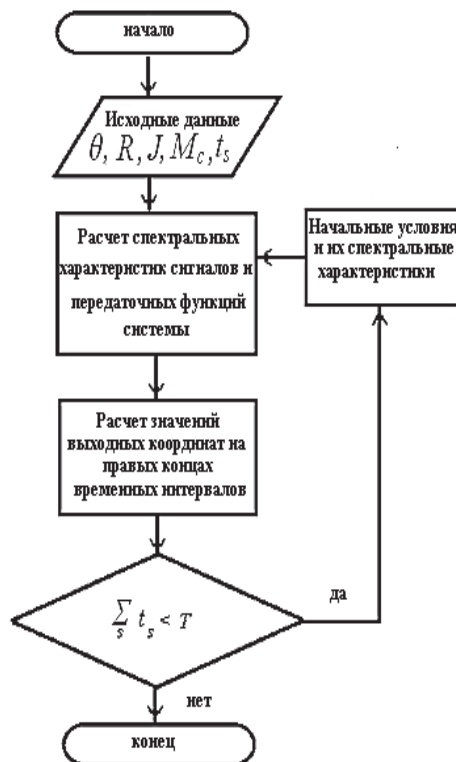


Рис. 4. Алгоритм численного расчета электромагнитных процессов

Разработанный алгоритм позволяет исследовать совместную работу вентильного преобразователя и ДПВ. Анализ результатов показал, что время проводимости вентиля зависит от угла управления θ , частоты ω , тока якоря I и скорости вращения Ω . Причем при увеличении скорости вращения двигателя время проводящего состояния вентиля уменьшается. Выявлена зависимость угла проводимости вентиля от соотношения тока якоря к скорости вращения двигателя при разных углах управления, которая имеет линейный характер. На рисунке 5 приведены результаты электромагнитного расчета системы при различных углах управления преобразователем θ . Полученные зависимости угла проводимости вентиля ωt при различных значениях скорости вращения двигателя Ω и его нагрузки I на

валу можно использовать в приближенных расчетах систем с ДПВ. Линейный характер зависимостей повышает их практическую значимость.

На рисунке 6, приведены результаты анализа соотношений тока и скорости двигателя при наличии статического преобразователя на входе двигателя для оценки его влияния на величину периода проводимости вентилей в зависимости от угла регулирования.

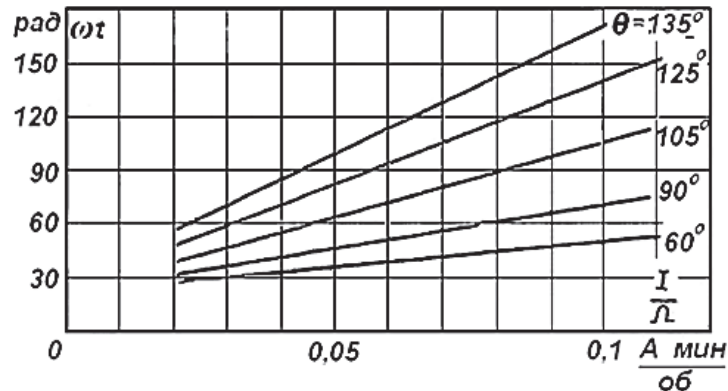


Рис. 5. Результаты анализа электромагнитного расчета с учетом преобразователя

Если представить функциональную зависимость угла проводимости в виде выражения $\lambda_n = K \cdot \theta$, то ее графическая интерпретация представлена на рисунке 6.

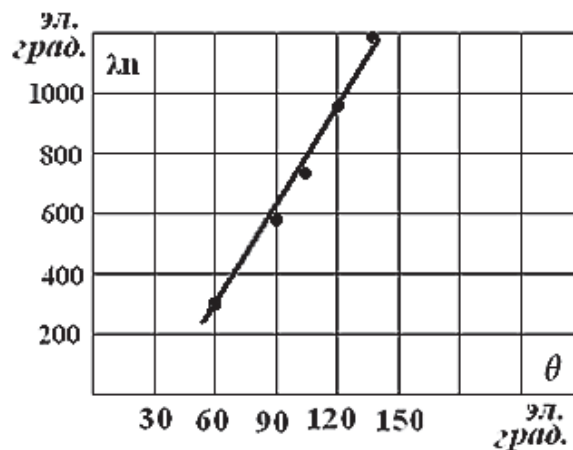


Рис. 6. Зависимость угла проводимости λ_n для различных углов регулирования преобразователя θ (точками отмечены расчетные значения λ_n , сплошной линией – аппроксимированная зависимость)

Таким образом, учет поправочного коэффициента модели (определяется углом наклона прямой на графике рис. 6.) обеспечивается введением последовательного усилительного звена в канал управления.

Для лучшей демонстрации изложенного, на рисунке 7 приведены кривые переходных процессов при скачке входного воздействия и различных значениях установившейся скорости. При частоте питания двигателя

100 Гц (однофазное выпрямленное напряжение), время переходного процесса легко определять по количеству пульсов тока (один пульс соответствует 0,01 с.). Из графиков видно, что зависимость времени переходного процесса то току весьма существенно зависят от скорости двигателя. Для двигателя с параметрами серии КОО 561 увеличилось практически в 8 раз при разгоне на скорость 30 рад/с и на 1200 рад/с.

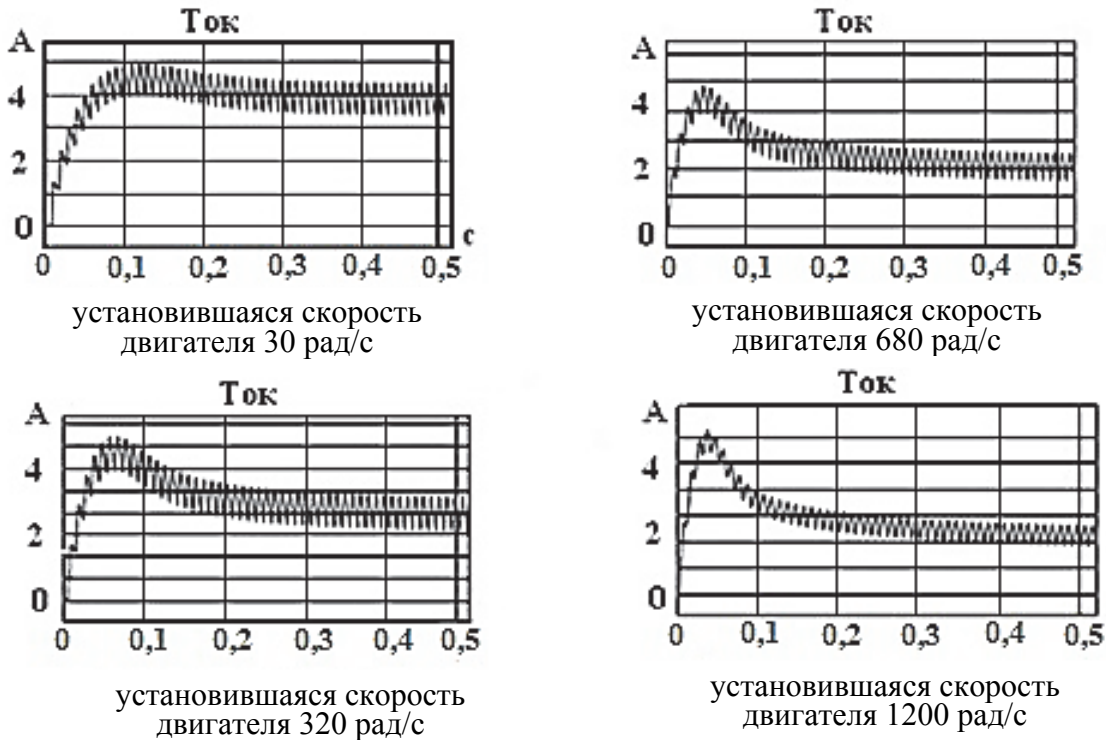


Рис. 7. Кривые переходного процесса по току двигателя при отработке ступеньки управляющего воздействия

Основным следствием отмеченного факта (в плане исследования энергетического КПД) является то, что время реакции по току электропривода существенно зависит от рабочей точки (от скорости), следовательно, и быстродействие также зависит от скорости двигателя. Этот факт существенно усложняет поиск физически реализуемого оптимального управления с точки зрения быстродействия и, соответственно, энергоэффективности в переходных режимах работы. Кроме того, указанная зависимость влияет и на устойчивость замкнутой системы управления. Устранение данного противоречия является главной задачей при постановке и решении задачи оптимизации динамического энергетического КПД.

Проведенные исследования на основе полученной математической модели ДПВ, показали, что рационально вести моделирование объектов регулирования, отличающихся наличием существенных нелинейностей типа «кривая намагничивания», «множительное звено», а также элементов с за-

висимыми от времени параметрами, на базе спектрального метода расчета нелинейных нестационарных систем.

Полученные зависимости между скоростью нарастания тока и скоростью вращения вала двигателя упрощают синтез корректирующего сигнала для управления динамикой по оптимальным траекториям в различных режимах работы ДПВ.

В третьей главе представлен функциональный синтез законов оптимального управления. Согласно принципу взаимности изопериметрических задач, одним из возможных решений может быть алгоритм синтеза управления на основе метода динамического программирования и критерия быстродействия. В работах Ильинского Н.Ф. показано, что за счет оптимизации управления динамических режимов потребление электрической энергии может уменьшаться в 40...100 раз. Предварительные исследования, результаты которых приведены в главе 1, также подтверждают этот вывод. Кроме того, в работах Кагана В.Г. также приводятся аналогичные выводы. С учетом ограничений на координаты движения, связанных с максимально допустимыми значениями напряжения питания и тока якоря, авторами исследованы предельные динамические характеристики ДПВ на основе предложенного алгоритма. Результаты исследования позволили определить закон изменения напряжения на двигателе для предельного быстродействия. На интервале поддержания максимального значения тока закон управления может обеспечить ПИ регулятор, однако длительность интервала нарастания тока при ограничении на напряжение питания двигателя нелинейно зависит от скорости двигателя и его нагрузки на валу. Анализ динамических процессов в электроприводах с ДПВ показывает, что основной проблемой обеспечения оптимального закона управления является зависимость параметров системы от тока и, главным образом, от скорости двигателя. Указанные причины приводят к тому, что статические и динамические процессы в замкнутой системе электропривода с ДПВ зависят от режима работы. Для обеспечения устойчивости такой системы необходимо обеспечить нелинейную коррекцию.

Переходный процесс по току двигателя имеет постоянную времени: $T^* = T_3 / (1 + k \Omega)$, где T_3 – электромагнитная постоянная обмоток двигателя (зависит только от индуктивности и активного сопротивления обмоток двигателя), Ω – скорость вращения вала, а k – коэффициент, учитывающий коэффициент ЭДС якоря и аппроксимирующую кривую намагничивания. Решением уравнения электрического равновесия для ДПВ является выражение:

$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T^*}} \right),$$

где U – напряжение питания двигателя, а R – активное сопротивление обмоток двигателя.

Заменяя экспоненту степенным рядом, получим для первых двух членов (учитывая, что ток растет лишь до значения I_{max} , заданного ограничением, который меньше, чем U/R). Тогда выражение можно записать:

$$i(t) = \frac{U_{max}}{R} \left(t - \left(t - \frac{t}{T^*} \right) \right) = \frac{U_{max}}{R} \frac{t}{T^*},$$

откуда, с учетом, что $i(t) = I_{max}$, получим для времени нарастания тока t_p и, следовательно, поддержания максимального значения напряжения U_{max} на двигателе:

$$t_p = \frac{I_{max}}{U_{max}} \frac{R}{U_{max}} \frac{T^*}{U_{max}}.$$

Более точная зависимость t_p может быть получена решением системы, описываемой дифференциальными уравнениями с переменными параметрами. Для электроприводов, находящихся постоянно в переходных режимах, решение данной задачи является актуальной.

Предложенное решение заключается во введении корректирующего сигнала путем использования функциональной зависимости производных тока двигателя от скорости (структурная схема коррекции приведена на рисунке 8). Поставленная цель достигается тем, что во время переходного процесса управляющий преобразователь формирует напряжение питания двигателя на уровне максимального значения на все время нарастания тока двигателя, которое прямо пропорционально постоянной времени двигателя, а в дальнейшем формирует напряжение питания в соответствии с требуемым законом регулирования (например, по пропорционально-интегральному закону).

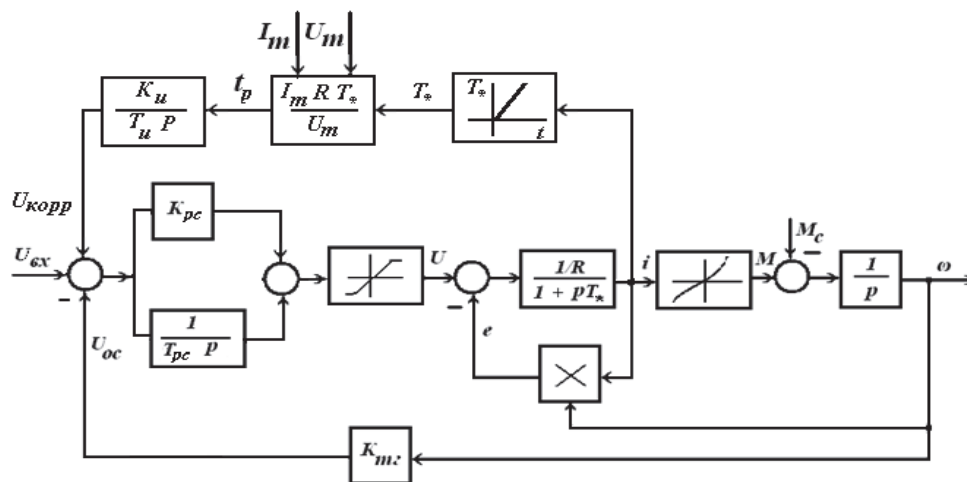


Рис. 8. Структурная схема электропривода с динамической коррекцией

Анализ электромагнитных процессов в ДПВ позволил найти функциональные связи между внутренними и внешними параметрами системы. Найденные зависимости позволяют упростить математическое описание системы, состоящей из ДПВ и статического преобразователя, и использовать известные пакеты моделирования, например – MatLab Simulink.

Согласно представленным положениям, величину постоянной времени можно определить двумя способами: прямым расчетом, или измеряя темп спада тока самоиндукции в момент, когда проводящий клапан выключен и двигатель отключен от сети (или фаза напряжения больше 180 эл. градусов для тиристорного преобразователя). В разработанной модели применяется второй способ. Для этой цели используется блок обнуляемого дискретного интегратора. На рисунке 9 представлен блок измерения темпа спада ЭДС двигателя последовательного возбуждения.

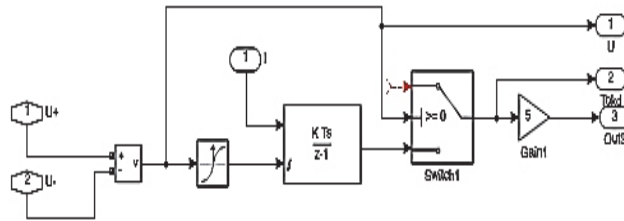


Рис. 9. Блок измерения темпа спада ЭДС ДПВ

На рисунке 10 показана разработанная схема модели электропривода. Задающий сигнал *Signal Builder* через блок ограничения *Saturation Dynamic* задает ток двигателя. Максимальное значение ± 10 В соответствует предельному значению тока двигателя.

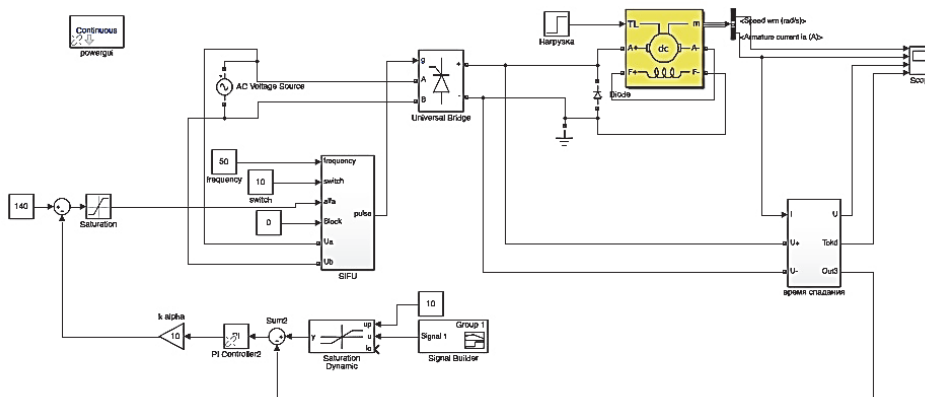


Рис. 10. Схема модели управления двигателем последовательного Возбуждения

На рисунке 11 представлены результаты моделирования системы управления ДПВ. Анализ полученных результатов фиксирует наличие четырех пульсов тока двигателя при отработке различных приращений скорости (соответствует 0, 04 с). Таким образом, можно констатировать, что предложенный способ коррекции позволяет обеспечить независимость динамики электромагнитных процессов от скорости двигателя во всем диапазоне регулирования.

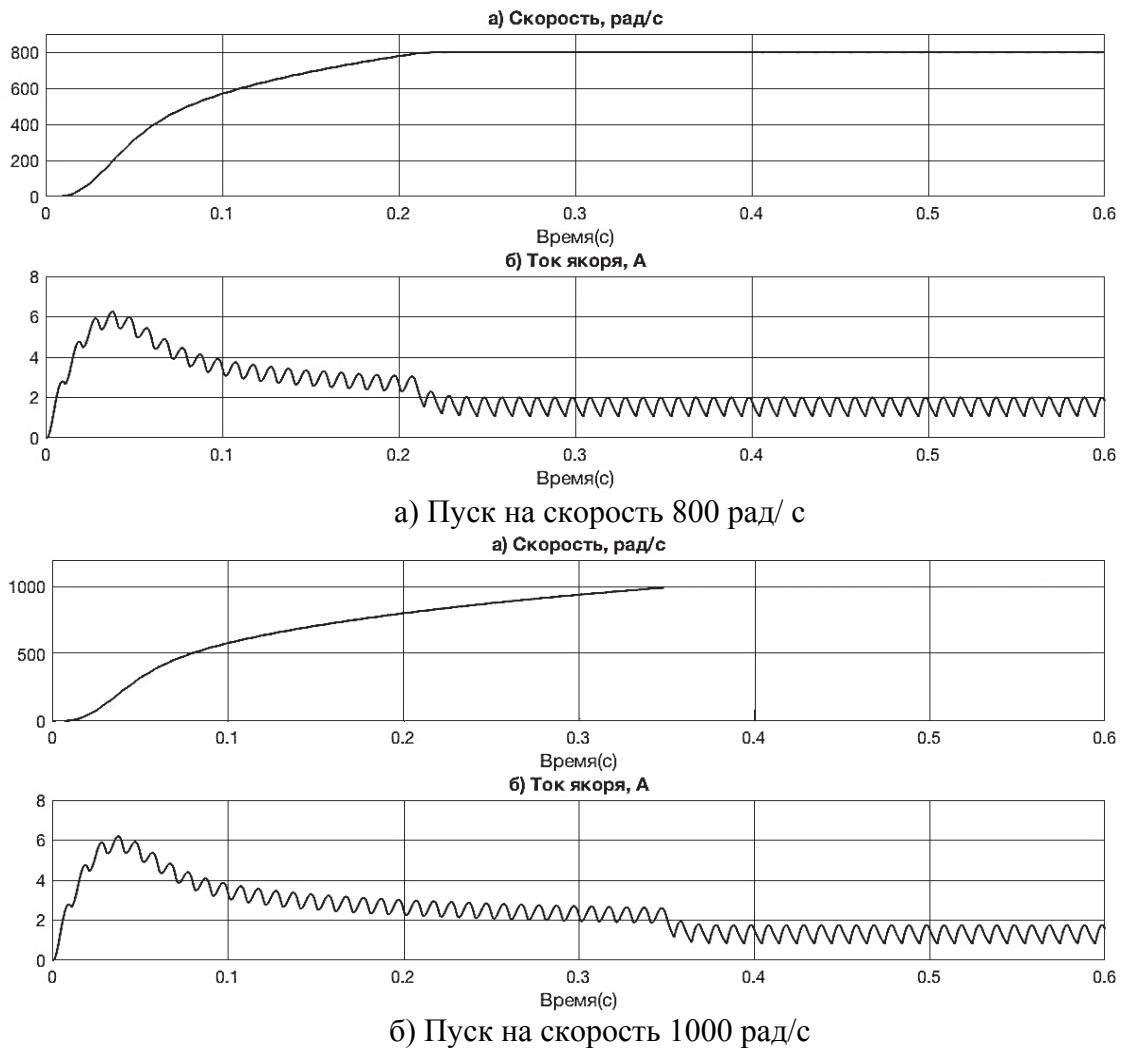


Рис. 11. Результаты моделирования метода управления ДПВ

Введенный в закон управления корректирующий сигнал стабилизирует динамические свойства системы, скорость нарастания тока зависит только от величины токоограничения. Полученная коррекция обеспечивает оптимальное управление приводом для всех режимов работы.

Четвёртая глава посвящена логико-алгоритмической реализации оптимального управления электроприводом на основе микроконтроллерных средств. ДПВ является нелинейным объектом управления, кроме того, многие авторы предлагают методы стабилизации скорости с помощью косвенных методов управления скоростью. Последнее может быть вызвано относительно высокими частотами вращения вала двигателя малой мощности, например однофазные коллекторные электродвигатели. В работе предложен способ управления, основанный на измерении электромагнитной постоянной времени.

Предложенное решение заключается в повышении эффективности электропривода при управлении скоростью. Способ энергосберегающего управления ДПВ с динамической коррекцией движения, предполагает

наличие двигателя, шунтируемого обратным диодом и разрядным резистором, коммутационного устройства и полууправляемого выпрямителя (блок-схема представлена на рисунке 12).

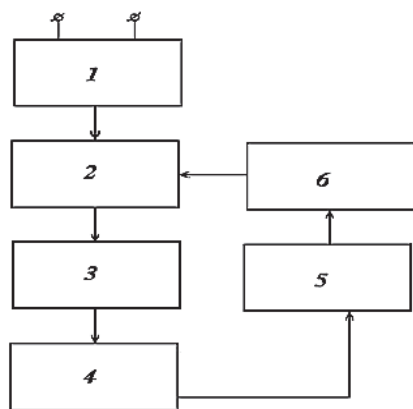


Рис. 12. Блок – схема системы управления ДПВ

1. Фильтр.
2. Полууправляемый мостовой выпрямитель.
3. Однофазный коллекторный двигатель (с последовательной обмоткой возбуждения).
4. Датчик тока.
5. Контроллер.
6. Драйвер.

Согласно предложенному способу датчик тока подключают к входу микропроцессорного узла для формирования управления преобразователем. Сигнал с датчика тока формируют путем вычисления разности между значениями в момент соответствующий заднему фронту импульса напряжения на двигателе и в момент заданный таймером контроллера (в примере принят 0, 00001 с). Полученный сигнал используют, согласно принципа управления по отклонению.

На рисунках 13,14 и 15 показаны результаты практического исследования. При анализе эти результаты исследования совпадают с теоретическими. Легко увидеть, что для всех значений скорости время реакции по току двигателя одинаково (на рисунках четко просматривается по 2 пика тока).

Обратную связь формируют, согласно принципу регулирования по отклонению, следующим образом: по заднему фронту импульса ЭДС преобразователя запускают таймер с уставкой времени Δt , одновременно считывают с датчика мгновенное значение тока. После отсчета заданного интервала времени Δt считывают значение тока I_1 (это значение, как было указано выше, зависит от скорости двигателя), затем вычисляют $\Delta I = I - I_1$ и это значение (пропорциональное скорости двигателя) используют с соответствующим коэффициентом пропорциональности в качестве сигнала отрицательной обратной связи.

Обозначения, принятые на рисунке 12:

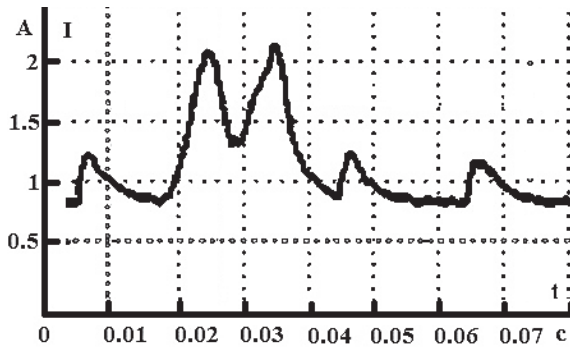


Рис. 13. Скачок управляющего воздействия ($\omega_{\text{нач}} = 600$ рад/с, $\omega_{\text{кон}} = 800$ рад/с)

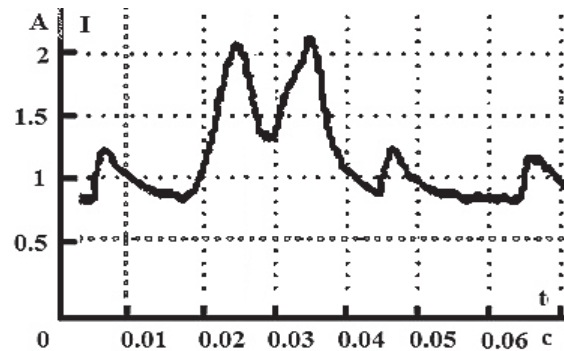


Рис. 14. Скачок управляющего воздействия ($\omega_{\text{нач}} = 400$ рад/с, $\omega_{\text{кон}} = 600$ рад/с)

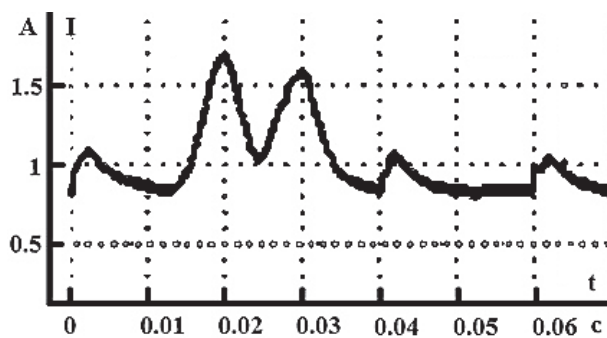


Рис. 15. Скачок управляющего воздействия ($\omega_{\text{нач}} = 200$ рад/с, $\omega_{\text{кон}} = 400$ рад/с)

Показано, путем сравнения экспериментальных и расчетных кривых динамических электромагнитных процессов в электроприводе, что предложенный способ коррекции динамики электропривода эффективно стабилизирует длительность переходных процессов по току двигателя (за счет регулирования) и делает ее независимой от скорости вращения вала двигателя.

На рисунке 16 приведены экспериментально снятые зависимости потребленной энергии при пуске электропривода, а на рисунке 17 – при переменной нагрузке на валу двигателя (режим перфоратора).

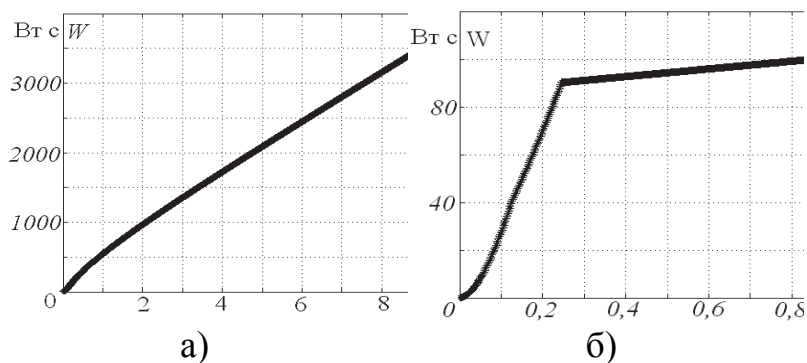


Рис. 16. Кривые потребляемой энергии при пуске на скорость $\omega_{\text{уст}} = 400$ рад/с (а) – прямой пуск, б) оптимальная траектория)

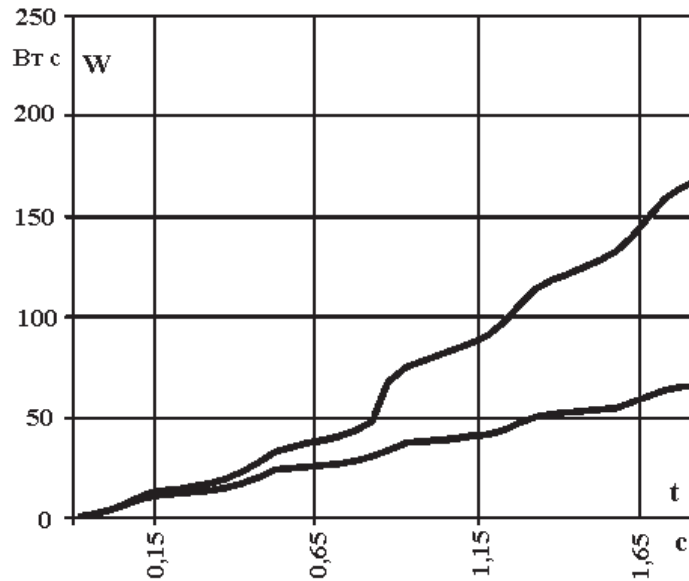


Рис. 17. Характеристики потребления электрической энергии для системы электропривода перфоратора с ПИ- регулятором (верхняя кривая) и потребляемой электрической энергии для разработанной системы (нижняя кривая)

Анализ полученных экспериментальных данных подтвердил, что разработанные способы и устройства управления снижают энергопотребление в рабочем диапазоне нагрузок. При помощи эксперимента подтверждено, что разработанные способы и устройства управления обеспечивают снижение энергопотребления при работе в рабочем диапазоне нагрузок, потребление энергии разработанной системой управления уменьшилось в 2,4 раза за рассматриваемый период работы, а в режиме пуска на скорость двигателя 300 рад/с – уменьшилось в 36 раз.

Заключение.

В диссертационной работе выполнены комплексные исследования систем управления электроприводов с двигателями последовательного возбуждения, направленные на повышение энергетического КПД в динамических режимах работы.

Основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. Проведен анализ существующих систем управления электроприводами на основе ДПВ, применяемых в бытовых и промышленных объектах, который выявил недостаточную степень исследования и разработок энергоэффективных систем управления в динамических режимах работы. Выявлено, что электромагнитная постоянная времени может существенно изменяться в диапазоне регулирования скорости, учет данного фактора является главной задачей при постановке и решении задачи оптимизации динамического энергетического КПД. По результатам математического моделирования электромагнитных процессов в ДПВ получены аппроксими-

рующие зависимость между электромагнитной постоянной времени и скоростью вращения вала двигателя, что упрощает синтез корректирующего сигнала для управления динамикой по оптимальным траекториям в различных режимах работы.

2. Предложен способ энергосберегающего управления ДПВ с динамической коррекцией движения обеспечивающий устойчивость системы при заданных ограничениях на координаты движения по оптимальному закону управления в диапазоне регулирования скорости двигателя, а также независимую от скорости двигателя длительность переходных процессов по току двигателя при соблюдении ограничений на координаты движения.

3. Синтезирован алгоритм оптимального управления электроприводом с ДПВ с точки зрения минимизации потерь электрической энергии в динамических режимах работы.

4. Предложены схемные реализации разработанных способов и устройств управления на аналоговых и цифровых элементах. Принцип управления с динамической коррекцией и оптимальным по динамическому КПД алгоритмом управления позволяет повысить энергоэффективность широкому классу электроприводов от ручного инструмента до приводов бытового назначения – везде, где используется двигатель последовательного возбуждения.

5. Экспериментально подтверждено, что разработанные способы и устройства управления обеспечивают снижение энергопотребления при работе в рабочем диапазоне нагрузок, потребление энергии разработанной системой управления уменьшилось в 2,4 раза за рассматриваемый период работы, а в режиме пуска на скорость двигателя 300 рад/с – уменьшилось в 36 раз.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК:

1. *Мин Ту Аунг* Энергоэффективное управление двигателем последовательного возбуждения/ М.Т. Аунг, В.И. Суздорф //Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2017. №5 (123).- С. 137-145.

2. *Мин Ту Аунг* Динамическая коррекция электропривода с двигателем последовательного возбуждения/ М.Т.Аунг, В.И. Суздорф //Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2018. №1, - С.54 – 60.

3. *Мин Ту Аунг* Функциональный синтез управления в однофазных электроприводах малой мощности / Ю.Н. Дементьев, А.С. Мешков, М.Т. Аунг, В.И. Суздорф // Вестник южно-уральского государственного университета Серия «ЭНЕРГЕТИКА», Том 18, № 3, - С. 98 - 105

Статьи, индексируемые в наукометрической базе Web of Science:

4. *Aung, M.T.* Design of series-wound motor control / V.I. Susdorf , M.T. Aung, A.S. Meshkov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Electronic resource, 2017.

5. *Aung, M.T.* Energy saving control of series excitation motor / Y.N. Dementyev, K.N. Negodin, M.T. Aung , V.I. Susdorf // MATEC Web of Conferences 4. "4th International Youth Forum "Smart Grids 2016", 2016.

Статьи, индексируемые в наукометрической базе Scopus:

6. *Aung, M.T.* Functional Control Synthesis of Single-Phase Low Power Motor Drives/ Yu.N. Dementyev, V.I. Susdorf , N.V. Koyain, A.S. Meshkov// Energy Web and Information Technologies 18, e 7, 2018.

7. *Aung, M.T.* Microcontroller Control of Series Excitation Motor/V.I. Susdorf , M.T. Aung //2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018.

Прочие публикации:

8. *Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.* Способ энергосберегающего управления однофазным коллекторным двигателем с динамической коррекцией движения//В кн. Электротехнические комплексы и системы. В 2 т./ Уфимск. Гос. Авиац. Техн. ун-т. – Уфа: РИК УГАТУ, 2017. – Т.1. С. 48-51.

9. *Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.* Энергосберегающее управление двигателем последовательного возбуждения// 4-й международный форум молодых ученых и аспирантов, Томск, ТПУ, 10.10.2016

10. *Мин Ту Аунг, Суздорф В. И.* Энергосберегающее управление двигателем последовательного возбуждения // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 10-21 апреля 2017 г. / редкол.: Э.А. Дмитриева (отв. ред.) [и др.]. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017.- С.753 - 758

11. *Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.* Способ управления двигателем последовательного возбуждения// Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов (с международным участием) / отв. ред. В.А. Шабанов; редкол.: С.Г. Конесев, В.М. Сапельников, М.И. Хакимьянов, П.А. Хлюпин, Р.Т. Хазиева.– Уфа: Изд-во Энергодиагностика, 2018. - С. 41-44.

12. *Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.* Стабилизация скорости двигателя последовательного возбуждения// Электропривод на транспорте и в промышленности : тр. II Всерос. науч.-практ. конф. (Хабаровск, 20–21 сентября 2018 г.) / под ред. С.В. Власьевского. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2018. – С.244-247.

13. *Мин Ту Аунг, Суздорф В.И.* Электромагнитные моменты магнитного редуктора с обмоткой переменного тока на статоре// Электрооборудование: эксплуатация и ремонт №12, 2018.- С. 15-21.

Патенты на изобретения:

14. *Мин Ту Аунг* Устройство для стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного электродвигателя / Ю.Н. Дементьев, А.С.Мешков, Мин Ту Аунг, В.И. Суздорф // Пат. 2663239 Российская Федерация, МПК H02P7/29. (RU). - № 2017112421; заявл. 11.04.2017; 03.08.2018. Бюл. №22

15. *Мин Ту Аунг* Способ энергосберегающего управления однофазным коллекторным двигателем с динамической коррекцией движения /Мешков А.С., Мин Ту Аунг, Суздорф В.И // Пат. 2666151 Российская Федерация, МПК H02P25/00. (RU). - № 2017132122; заявл. 13.09.2017; 06.09.2018. Бюл. №25

Мин Ту Аунг

**ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ДВИГАТЕЛЯМИ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 15.07.2019.

Формат 60 ´ 84 1/16. Бумага 65 г/м². Ризограф EZ 570E
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 29734.

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.