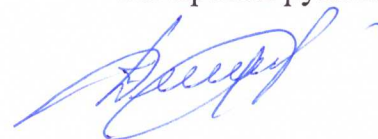


На правах рукописи



Конохов Дмитрий Владимирович

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТОМ
АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет» на кафедре «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы».

Научный
руководитель: **Федяева Галина Анатольевна,**
доктор технических наук, доцент

Официальные
оппоненты: **Макаров Лев Николаевич,**
доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Русэлпром», генеральный конструктор

Слепцов Михаил Александрович,
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кафедра «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрического транспорта», профессор

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «26» декабря 2018 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.02 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)» по адресу: 127994, ГСП-4, Москва, Образцова, 9, стр.9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ (МИИТ) и на сайте: www.miiit.ru

Автореферат разослан «15» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

 Гречишников Виктор Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Высокая потребность в энергоэффективных системах управления (СУ) общепромышленными и тяговыми электроприводами с асинхронными двигателями (АД) являются определяющими факторами актуальности темы диссертационного исследования. Современная СУ должна обладать высоким быстродействием, пониженной чувствительностью к возмущениям и изменению параметров системы при эксплуатации, а также одной из важных конкурентных особенностей - применимость к широкому спектру электроприводов различной мощности.

В качестве основополагающих систем управления асинхронным электроприводом при реализации энергоэффективных алгоритмов, зачастую, применяют скалярные и векторные системы. По ряду технических показателей вышеприведенные СУ уступают системам прямого управления моментом асинхронных электродвигателей, иначе, системам DTC (Direct torque control). Системам прямого управления моментом присущи такие преимущества как:

- высокое быстродействие системы ввиду наличия релейных регуляторов момента и потокосцепления статора;
- стабильность функционирования при наличии погрешности данных о наблюдаемых параметрах объекта управления;
- стабильность функционирования при различных возмущениях в процессе регулирования координат объекта управления.

Эти преимущества особенно важны для СУ асинхронных тяговых двигателей (АТД) железнодорожного транспорта, работающих в тяжёлых, изменяющихся в широких пределах условиях эксплуатации. Для систем прямого управления моментом на сегодняшний день недостаточно проработаны энергосберегающие алгоритмы управления двигателями, и это является весьма перспективным направлением исследований, которое позволит более полно использовать все преимущества систем DTC для достижения высоких показателей энергоэффективности электроприводов с асинхронными тяговыми электродвигателями.

Цель работы – повышение энергоэффективности тягового электропривода с прямым управлением моментом асинхронных электродвигателей.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Изучение существующих энергоэффективных систем управления электроприводами и обоснование выбора базовой системы для создания энергоэффективного способа и алгоритмов управления.
2. Разработка энергоэффективного способа и алгоритмов управления на базе системы с прямым управлением моментом АТД и создание функциональной схемы, реализующей данный алгоритм;

3. Разработка математической и компьютерной модели системы энергоэффективного управления асинхронным тяговым электроприводом;
4. Анализ на компьютерной модели введения в структуру системы DTC узлов оптимизации задания потокосцепления статора с целью снижения потребления тока статора;
5. Оценка на основе моделирования влияния на динамические характеристики асинхронного тягового электропривода энергосберегающих алгоритмов управления.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны способ и система энергоэффективного прямого управления моментом асинхронных тяговых электродвигателей.
2. Разработан энергосберегающий алгоритм управления асинхронным тяговым электроприводом в системе прямого управления моментом по критерию минимума тока статора, реализованный на основе оптимального регулирования задания потокосцепления статора в зависимости от задания момента АТД.
3. Предложен блок логики переключений системы управления на энергосберегающий алгоритм формирования задания потокосцепления для тягового электропривода локомотивов с учётом контроля текущего режима и условий работы электропривода.
4. Определены оптимальные по критерию минимума тока статора зависимости потокосцепления статора и угла между векторами тока и потокосцепления статора (моментаобразующими векторами) от нагрузки для асинхронных тяговых электродвигателей тепловозов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Предложенный способ и алгоритмы управления асинхронным электроприводом позволяют за счет оптимизации потребления тока статора снизить потери в электродвигателе и, как следствие, повысить к.п.д.

Созданные математические и компьютерные модели энергосберегающего тягового электропривода локомотивов могут использоваться на стадии проектирования для анализа режимов энергоэффективного регулирования электропривода.

Разработанная система управления применима для широкого спектра электроприводов, где используются частотные преобразователи с прямым управлением моментом.

Результаты работы приняты Людиновским тепловозостроительным заводом (ЛТЗ) и используются при проектировании энергосберегающего тягового электропривода перспективных тепловозов, а также внедрены в учебный процесс Брянского государственного технического университета и используются в преподаваемых дисциплинах «Моделирование динамики электромеханических систем» и «Мехатроника» магистратуры 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Методология и методы исследования. При проведении исследований и разработке математических моделей применялись основные положения теории электропривода, электрических машин, автоматического управления, метод экспериментального подтверждения аналитических результатов. Компьютерные исследования энергосберегающей системы и алгоритмов управления проводились при помощи моделирования электромеханических процессов асинхронного электропривода в основной библиотеке программного комплекса Matlab/Simulink и программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ).

Положения, выносимые на защиту:

- система и алгоритмы энергоэффективного регулирования электропривода с прямым управлением моментом;
- аналитические зависимости для энергосберегающего регулирования потокосцепления статора и угла между векторами тока и потокосцепления статора от задания на момент для асинхронных тяговых электродвигателей тепловозов;
- алгоритм работы блока логики переключений системы управления на энергосберегающее формирование задания потокосцепления для тягового электропривода локомотивов;
- методика и результаты математического и компьютерного моделирования системы энергоэффективного регулирования тягового электропривода с прямым управлением моментом;
- результаты экспериментальной проверки предложенного принципа энергоэффективного регулирования асинхронного электропривода с прямым управлением моментом.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается сопоставлением и удовлетворительной сходимостью результатов расчёта энергоэффективной системы с прямым управлением моментом асинхронного электродвигателя с экспериментальными данными, полученными на лабораторной установке кафедры ЭРЭиЭС БГТУ, а также соответствием результатов положениям теории электропривода и теории электрических машин.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на Всероссийской научно-практической конференции «Автоматизированный электропривод и автоматика» (Липецк, 2014); VIII Международном симпозиуме «Элтранс-2015» (Санкт-Петербург, 2015); на X Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (Санкт-Петербург, 2015), на 69, 70, 72 и 73-й научно-технических студенческих конференциях БГТУ (Брянск, 2014, 2015, 2017, 2018); на III и IV Международном научно-техническом семинаре «Компьютерное моделирование в железно-

дорожном транспорте» (Брянск, 2016, 2018); на I Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (Брянск, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в числе которых 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 3 патента на изобретения и 4 – на полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 105 наименований, и 3-х приложений. Работа включает в себя 135 страниц основного текста, содержит 48 иллюстраций и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки энергоэффективных систем управления асинхронными электродвигателями, определены решаемые в диссертационной работе научно-технические проблемы и задачи, показаны новизна и практическая ценность работы, выделены основные защищаемые положения.

В первой главе проведен сравнительный анализ существующих систем управления электроприводами с асинхронными двигателями. Выявлено, что наибольшими преимуществами для построения энергоэффективной системы управления электроприводом с АД является система ДТС, она имеет высокое быстродействие, менее восприимчива к неточности данных о наблюдаемых параметрах объекта управления и возмущениям в процессе регулирования координат. Определен критерий оптимизации, как наиболее эффективный для любых топологий систем управления электроприводом с АД (в частности и для систем ДТС), основанный на достижении минимума потребления тока статора от источника электроэнергии. В системе ДТС данный критерий наиболее удобно реализуем при регулировании задания потокосцепления статора в зависимости от текущего задания на момент АД.

Проблему повышения энергетических показателей систем управления асинхронными электроприводами рассматривали в своих трудах такие исследователи как А.Е. Козярук, В.В. Рудаков, Л.Н. Макаров, И.Я. Браславский, Н.А. Ротанов, В.В. Литовченко, В.М. Перельмутер, Н.Ф. Ильинский, Б.Ю. Васильев, Б.С. Лезнов, А.Г., Мищенко В.А., Мещеряков В.Н., А.Г. Гарганеев, а также зарубежные авторы: Т. Noguchi, I. Takahashi D.W. Novotny, F. Blaschke, J. Holtz, M. Depenbrok и другие учёные, однако энергоэффективное прямое управление моментом АД пока исследовано недостаточно и требует дальнейшей проработки.

Во второй главе представлена методика графоаналитического расчета зависимости задания потокосцепления статора от задания на момент и угла между моментобразующими векторами тока и потокосцепления статора в системе ДТС, оптимизированной по критерию минимума тока статора АД. В данной работе расчёт производился для АД АД917УХЛ1, которые установлены на магистральных грузовых тепловозах 2ТЭ25А и гибридном маневровом тепловозе ТЭМ9Н.

При оптимальном регулировании задания потокосцепления статора в зависимости от задания на момент изменяется и угол между моментобразующими векторами. Предварительно была произведена приближенная оценка угла между векторами тока и потокосцепления статора, оптимального по критерию минимума тока статора, с использованием векторной диаграммы (рисунок 1).

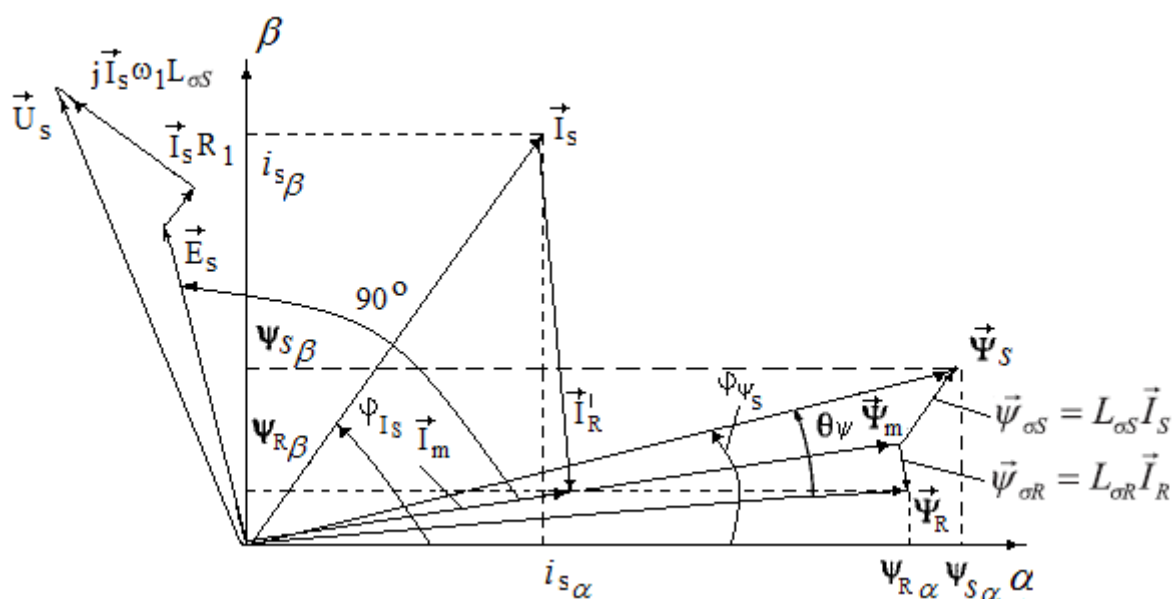


Рисунок 1 - Векторная диаграмма напряжений, потокосцеплений и токов АД

В ряде работ показано, что в отсутствии насыщения магнитной цепи АД, при минимуме тока статора, проекции вектора тока статора на оси координатной системы, связанной с потокосцеплением ротора Ψ_R , равны по величине, то есть угол между векторами тока статора I_S и потокосцепления ротора составляет 45 градусов. Из диаграммы видно, что при этом угол между потокосцеплением и током статора должен быть меньше на величину угла между потокосцеплениями статора и ротора θ_ψ , который зависит от потокосцеплений рассеяния статора $\psi_{\sigma s}$ и ротора $\psi_{\sigma r}$, определяемых индуктивностями рассеяния статора $L_{\sigma s}$ и ротора $L_{\sigma r}$ и токами статора I_S и ротора I_R . В диапазоне токовых нагрузок, характерных для частотно-регулируемых электроприводов, индуктивности рассеяния статора и ротора можно принять постоянными, поэтому можно считать, что угол между потокосцеплениями статора и ротора изменяется только за счёт изменения нагрузки двигателя. Исходя из этого, в отсутствие насыщения и при очень малых нагрузках (в пределах до

0,1 номинальной нагрузки) оптимальный угол между током и потокосцеплением статора должен приближаться к 45 градусам, а затем при небольшом увеличении нагрузки и отсутствии насыщения должен постепенно снижаться на величину, зависящую от параметров АД, но незначительно, - не более, чем до 40 градусов, так как индуктивности рассеяния весьма малы.

Далее, по мере увеличения момента на валу двигателя и потокосцепления статора выше 0,5 номинального значения, возникает и растёт насыщение магнитной цепи и соответственно в системе координат, ориентированной по потокосцеплению ротора, нарушается пропорциональность между продольной составляющей тока статора и потокосцеплением ротора, и увеличивается оптимальный угол между векторами тока статора и потокосцепления ротора в зависимости от параметров двигателя до 55-60 градусов при номинальной нагрузке. Угол θ_{ψ} между потокосцеплениями статора и ротора при номинальной нагрузке также зависит от параметров двигателя. Например, для АД локомотивов он лежит в пределах 9-11 градусов, поэтому для АД при номинальной нагрузке оптимальный по критерию минимума тока угол между током и потокосцеплением статора должен лежать в пределах 44 - 51 градус.

Методика графоаналитического расчета оптимальной по критерию минимума тока статора зависимости задания потокосцепления статора и угла между моментобразующими векторами от задания на момент АД предполагает использование нелинейной зависимости взаимной индуктивности L_m от тока намагничивания I_m для учета насыщения магнитной цепи АД (рисунок 2).

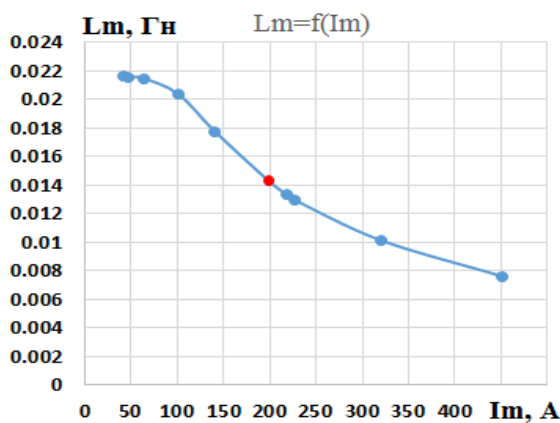


Рисунок 2 –Зависимость главной индуктивности асинхронного двигателя АД917УХЛ1 от тока намагничивания

Расчет оптимальной зависимости задания потокосцепления статора от задания на момент производится на основе Т-образной и Г-образной схем замещения АД с учетом коэффициента C_1 , отражающего взаимосвязь между параметрами схем замещения.

Задаваясь для требуемого значения момента и f_1 определенной величиной U_s (предварительно из закона $U_s/f_1 = \text{const}$), рассчитываем скольжение АД, выразив его из формулы:

$$M = \frac{p m_1 U_s^2 \frac{R'_R}{S}}{2\pi f_1 \left[(R_s + C_1 \frac{R'_R}{S})^2 + (X_s + C_1 X'_R)^2 \right]}; \quad (1)$$

Коэффициент C_1 рассчитывается следующим образом, причём потери в магнитной цепи не учитываются, C_1 считается далее действительным числом:

$$C_1 = 1 + \frac{Z_s}{X_m}; \quad (2)$$

Затем предварительно с использованием Г-образной схемы замещения АД определяется ток ротора, приведенный к цепи статора, по известному из теории электрических машин выражению:

$$\dot{I}'_R = \frac{\dot{U}_S}{(R_S + C_1 \frac{R'_R}{S}) + j(X_S + C_1 X'_R)}; \quad (3)$$

Далее предварительно принимаем величину L_m для рассчитываемой точки, опираясь на данные зависимости главной индуктивности от тока намагничивания (рисунок 1) после чего можно приблизительно рассчитать ток намагничивания:

$$\dot{I}_m \approx \frac{\dot{U}_S}{jX_m}; \quad (4)$$

Получившееся значение I_m сопоставляем со значением, которое будет соответствовать принятому значению L_m по рисунку 2. При большом рассогласовании выбираем другое значение L_m и повторяем расчет тока намагничивания. Подбираем до наиболее близкого совпадения значений тока намагничивания расчетного и полученного по кривой $L_m=f(I_m)$.

После определения тока намагничивания необходимо вычислить значение тока статора, что реализуется в соответствии с Т-образной схемой замещения:

$$\dot{I}_S = \dot{I}_m + \dot{I}'_R; \quad (5)$$

Вычислив I_S , определяем по Т-образной схеме замещения величину ЭДС:

$$\dot{E} = \dot{U}_S - \dot{I}_S \dot{Z}_S; \quad (6)$$

Далее корректируем значение тока намагничивания:

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{E}}{jX_m}; \quad (7)$$

Корректируем значение тока ротора по вычисленному значению ЭДС (6), опираясь на Т-образную схему замещения:

$$\dot{I}'_R = \frac{\dot{E}}{\frac{R'_R}{S} + jX'_R}; \quad (8)$$

Проводим повторно расчет по формулам 5-7, учитывая уточненное значение тока ротора по формуле (8), до тех пор, пока скорректированное значение I_m будут незначительно отличаться друг от друга.

Потом необходимо вычислить потокосцепления статора, сложив вектор главного потокосцепления и вектор потокосцепления рассеяния статора:

$$\vec{\psi}_S = \vec{\psi}_m + \vec{\psi}_{\sigma S}; \quad \vec{\psi}_m = L_m \vec{I}_m; \quad \vec{\psi}_{\sigma S} = L_{\sigma S} \vec{I}_S; \quad (9)$$

После чего для выбранного значения момента АД и частоты f_1 изменяем величину напряжения статора U_s (сначала вниз от исходной величины, затем вверх по несколько значений) и для каждого повторяем расчёт по формулам (1-9).

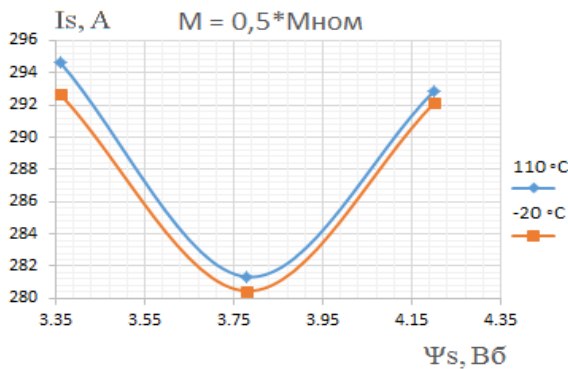


Рисунок 3 – U-образная кривая минимума тока статора для $M = 0,5M_{ном}$

Совокупность всех точек данного расчёта сформируют U-образную кривую отражающую зависимость тока статора от потокосцепления статора для заданного момента АД. На рисунке 3 представлена U-образная кривая, показывающая минимум тока статора для момента равного $M = 0,5M_{ном}$ при температуре обмоток $+110^{\circ}\text{C}$ и -20°C .

Далее необходимо повторить вычисления по данной методике для каждого значения момента (таблица 1), выбранного для расчёта. После чего получится совокупность опорных точек для построения необходимой энергоэффективной зависимости потокосцепления статора от момента (рисунок 4) при реализации управления по критерию минимума тока статора в системе прямого управления моментом АД.

Параллельно в процессе расчёта по данной методике определялась также величина угла между векторами тока и потокосцепления статора при оптимальной величине потокосцепления статора для различных нагрузок (оптимального угла между моментобразующими векторами). Для номинальной нагрузки АД оптимальный угол составил 50° , что входит в интервал значений, полученных при предварительной приближённой оценке с использованием рисунка 1.

Таблица 1 - Опорные точки зависимости оптимального задания потокосцепления статора от задания момента АД

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
$M/M_{ном}$	0,1	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5
$\Psi/\Psi_{ном}$	0,55	0,75	0,9	1	1,1	1,1	1,15

Расчеты были выполнены для температуры обмоток равной $+110^{\circ}\text{C}$ и -20°C . Энергоэффективные зависимости $\Psi^*_{\text{зад}} = f(M^*)$ для этих температур (рисунок 3) практически совпадают. При снижении температуры несколько снижаются токи АД (рисунок 3) из-за уменьшения скольжения, но при этом оптимальные значения задания потокосцепления статора практически сохраняются, что подтверждает довольно низкое влияние температуры обмоток АД на величину оптимального задания потокосцепления статора.

Для наглядного представления достигаемого эффекта снижения тока статора были построены совмещенные зависимости тока статора от момента нагрузки при реализации энергоэффективного управления и при традиционном построении системы прямого управления моментом для тягового асинхронного электродвигателя АД917УХЛ1, представленные на рисунке 5.

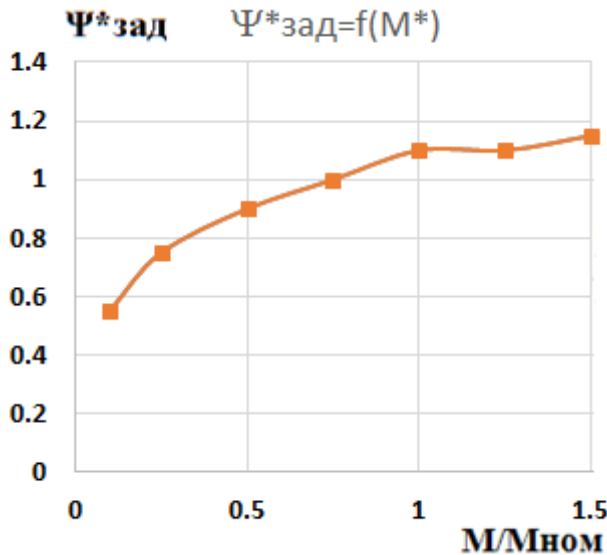


Рисунок 4 – Зависимости оптимального по критерию минимума тока статора задания потокосцепления статора от задания на момент АД

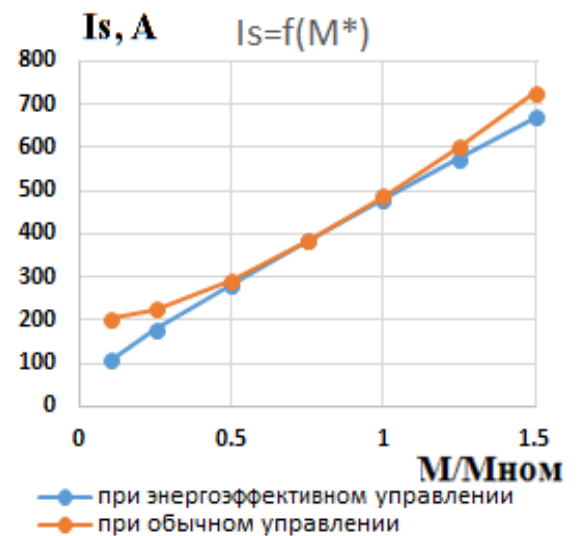


Рисунок 5 – Совмещенные зависимости тока статора от задания на момент АД в относительных единицах при энергоэффективном и обычном управлении

Зависимости оптимального потокосцепления и угла были аппроксимированы для более удобного их использования при реализации энергоэффективной системы управления. Функции полиномов имеют вид:

$$\psi_s^* = 0,5991 \cdot M^{*3} - 1,7982 \cdot M^{*2} + 1,851 \cdot M^* + 0,3634 \quad (10)$$

$$\theta_s = -3,7671 \cdot M^{*3} + 1,9468 \cdot M^{*2} + 17,9069 \cdot M^* + 41,5311 \quad (11)$$

В третьей главе разработан способ энергоэффективного управления тяговым электроприводом с асинхронными двигателями в системе DTC. Реализована функциональная схема системы управления (рисунок 6) и алгоритм управления

АТД локомотива, основанный на регулировании величины задания потокосцепления статора с целью достижения минимума тока статора. Определены функционалы блоков, реализующих энергоэффективный алгоритм, приведена математическая модель энергоэффективной системы DTC, проверена адекватность модели АТД АД917УХЛ1, выполненной в основной библиотеке MatLab/Simulink.

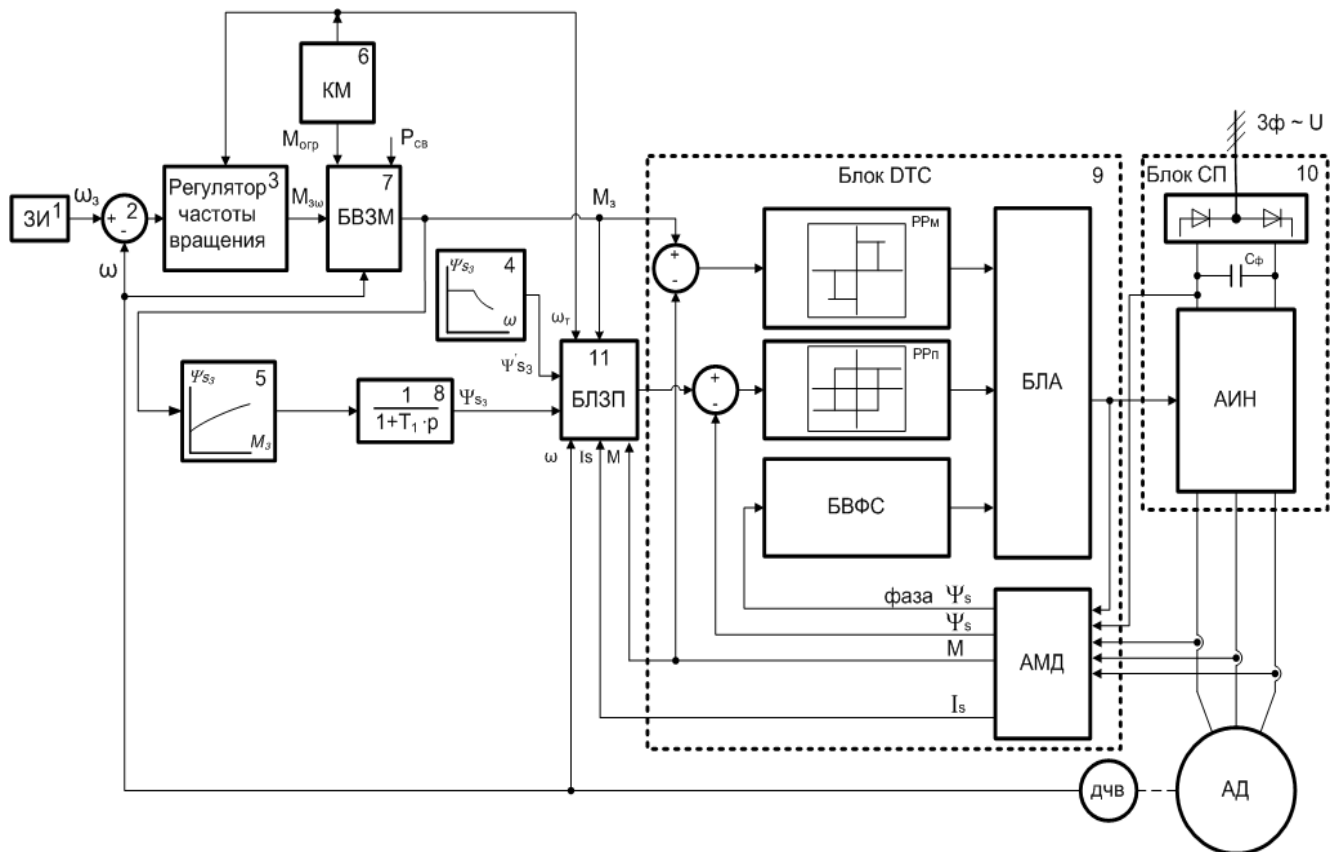


Рисунок 6 - Функциональная схема энергоэффективной системы прямого управления моментом асинхронного тягового электродвигателя

Энергоэффективная система прямого управления моментом, аналогично традиционной архитектуре DTC, содержит трёхпозиционный релейный регулятор момента (РРМ) и двухпозиционный релейный регулятор потокосцепления (РРП), адаптивную модель двигателя (АМД), блок логического автомата (БЛА) и блок вычисления фазового сектора (БВФС). На вход двухпозиционного релейного регулятора потокосцепления статора подается сигнал от блока логики задания потокосцепления (БЛЗП). На вход трехпозиционного релейного регулятора момента подается сигнал от блока вычисления задания на момент АТД (блок 7, рисунок 6). После чего уже в типовой структуре системы прямого управления моментом происходит вычисление текущего положения вектора напряжения на фазовой плоскости и изменение его положения в зависимости от полученной информации от релейных регуляторов по таблице переключений. Далее сформированный вектор напряжения

подаётся на систему управления автономного инвертор напряжения (АИН) формируя необходимую комбинацию ключей для реализации энергоэффективного управления асинхронного тягового двигателя локомотива.

Задатчик потокосцепления статора включает энергоэффективную зависимость $\Psi_{S_3}=f(M_{\text{зад}})$, заложенную в блоке 5 (рисунок 6). Поскольку задание электромагнитного момента двигателя является определяющим для вычисления задания потокосцепления статора и может резко изменяться в процессе работы электропривода, то в узел вычисления задания потокосцепления статора был включен блок фильтрации пульсаций с выхода задатчика момента. Данный блок представляет собой апериодическое звено 1-го порядка и предотвращает недопустимое повышение тока АД при переходном процессе изменения потокосцепления.

Переключение между обычным Ψ'_{S_3} и энергосберегающим заданием потокосцепления Ψ_{S_3} происходит под контролем БЛЗП, анализирующего режим работы электропривода. Блок логики БЛЗП предусмотрен для адаптации энергоэффективной СУ (рисунок 7) к различным типам привода, он обеспечивает переход от традиционного изменения потокосцепления статора к энергосберегающему (и обратно).

Алгоритм функционирования БЛЗП зависит от конкретного типа привода и условий его работы, но во всех случаях намагничивание АД (при пуске и начале его разгона) происходит при традиционном номинальном задании потокосцепления. В случае резкого изменения задания на потокосцепление, например, при переключении между традиционным и энергосберегающим заданием потокосцепления (или обратно) в БЛЗП предусмотрено плавное сглаживание недопустимых бросков тока. Для тягового электропривода алгоритм функционирования БЛЗП представлен на рисунке 7.

Алгоритм блока логики задания потокосцепления предусматривает энергоэффективное управления только в режиме тяги: при разгоне АД с постоянным заданным моментом $M_{z_{cp}}$ (с допуском ΔM_z) и при установившемся движении с относительным постоянством скорости (с допуском $\Delta \omega_T$) и заданного момента АД $M_{z_{cp}}$ (с допуском ΔM_z) в течение некоторого определённого промежутка времени Δt_3 . Переход на обычное (традиционное) задание потокосцепления предусмотрен при пониженном задании потокосцепления и изменении заданного момента (например, при наезде на масляное пятно, окончании разгона). Кроме того, в БЛЗП предусмотрен контроль нарушения процесса регулирования момента в системе ДТС.

Это может произойти, в частности, из-за снижения перегрузочной способности двигателя (критического момента) при уменьшении потокосцепления статора. В блоке логики задания потока возникновение подобных режимов контролируется условием перехода к традиционному заданию потокосцепления:

$M_3 > M$ на величину большую ΔM в регуляторе момента (РМ) в течение Δt_{31} .

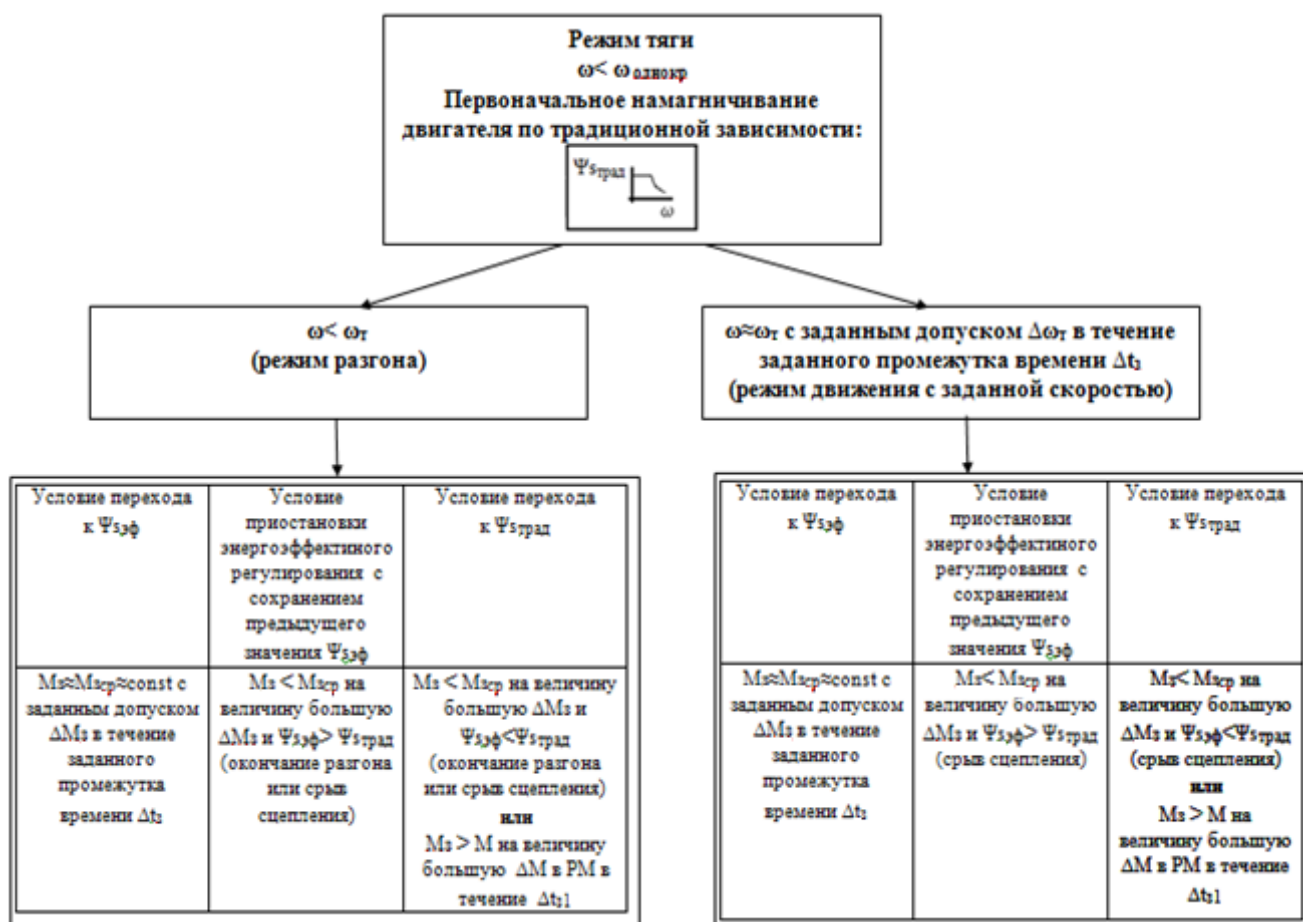


Рисунок 7 - Алгоритм функционирования блока логики задания потокосцепления статора для АТД локомотивов

То есть, если задание момента тягового двигателя выше фактического значения момента, вычисленного по модели АТД, на величину большую, чем гистерезисный допуск РМ в течение некоторого заданного времени Δt_{31} , то это говорит о том, что нарушилось регулирование момента и надо перейти к обычному заданию потокосцепления от сниженного энергоэффективного задания (форсировать поток).

Также в третьей главе описана реализация математической и компьютерной модели энергоэффективной системы DTC. Адаптивная модель двигателя разработана в системе координат α, β , связанной со статором. Релейные регуляторы, блок вычисления фазового сектора (БВФС) и блок логического анализа (БЛА), входящие в ядро системы DTC, описаны с помощью систем стандартных логических выражений и таблицы переключений, энергоэффективное задание потокосцепление в функции задания момента и БЛЗП также реализованы с использованием блоков основной библиотеки MatLab/Simulink.

Была выполнена проверка адекватности разработанной модели АТД путем моделирования номинального режима АТД АД917УХЛ1 и сравнения результатов

моделирования со справочными данными АТД, при номинальном моменте расхождение по току и скорости не превышает 0,3 %.

В четвертой главе разработана комплексная электромеханическая модель ТЭП с энергоэффективной СУ, выполнено моделирование статических и динамических режимов системы, а также проверена правильность аналитических положений и выбранных принципов построения энергосберегающей системы электропривода с прямым управлением моментом АТД на лабораторном стенде.

Для более подробного исследования динамики процессов в электроприводе при реализации энергосберегающего алгоритма была разработана комплексная электромеханическая модель тепловоза ТЭМ9Н с АТД АД917УХЛ1 при объединении с помощью специального интерфейса CoSimulation электрической подсистемы, разработанной в ПК Matlab/Simulink, и механической подсистемы, разработанной в ПК «Универсальный механизм» при участии сотрудников лаборатории Вычислительной механики Брянского государственного технического университета. С целью проверки целесообразности применения предлагаемых энергоэффективных алгоритмов для ТЭП локомотивов выполнено моделирование тягового привода грузового тепловоза в различных режимах. Исследовались режимы разгона тепловоза, как с определённой, заданной машинистом силой тяги, не превышающей предельную по сцеплению, так и с реализацией предельных усилий. Разгон производился до заданной машинистом скорости с последующим установившимся режимом.

В качестве примера приведены результаты моделирования разгона ТЭП оси тепловоза с составом 2000 т на пределе по сцеплению до заданной скорости 15 км/ч и движения по перегону с той же заданной скоростью (рисунок 8). В начале пуска и разгона потокосцепление статора устанавливается в блоке 4 (рисунок 6) равным номинальному значению ($\Psi_{S3} = \Psi_{SH}$), и локомотив начинает разгоняться, достигая в заданных условиях предела по сцеплению, что сопровождается вибрацией колёс (рисунок 8а), при этом устанавливается действующее значение тока статора на уровне 538 А (максимальное 760,7 А, рисунок 8б). Условия сцепления приняты хорошими, потенциальный коэффициент сцепления высок, поэтому электромагнитный момент при разгоне превышает номинальное значение.

Далее БЛЗП, анализируя стабильность режима разгона, производит переключение на энергоэффективное регулирование (на рисунке 8 это момент времени $t=15$ с), то есть, переключение на энергосберегающее задание потокосцепления в блоке 5. Действующее значение тока статора при этом снижается на 4 %. Средняя величина потокосцепления статора фиксируется на уровне $\Psi_{S3} = 1,1\Psi_{SH}$, средняя величина угла между векторами тока и потокосцеплением статора устанавливается на значении $\theta_s = 52,4$ градуса. Электромагнитный момент при этом регулируется на уровне 12000 Н·м (то есть 1,14 M_n , рисунок 8в).

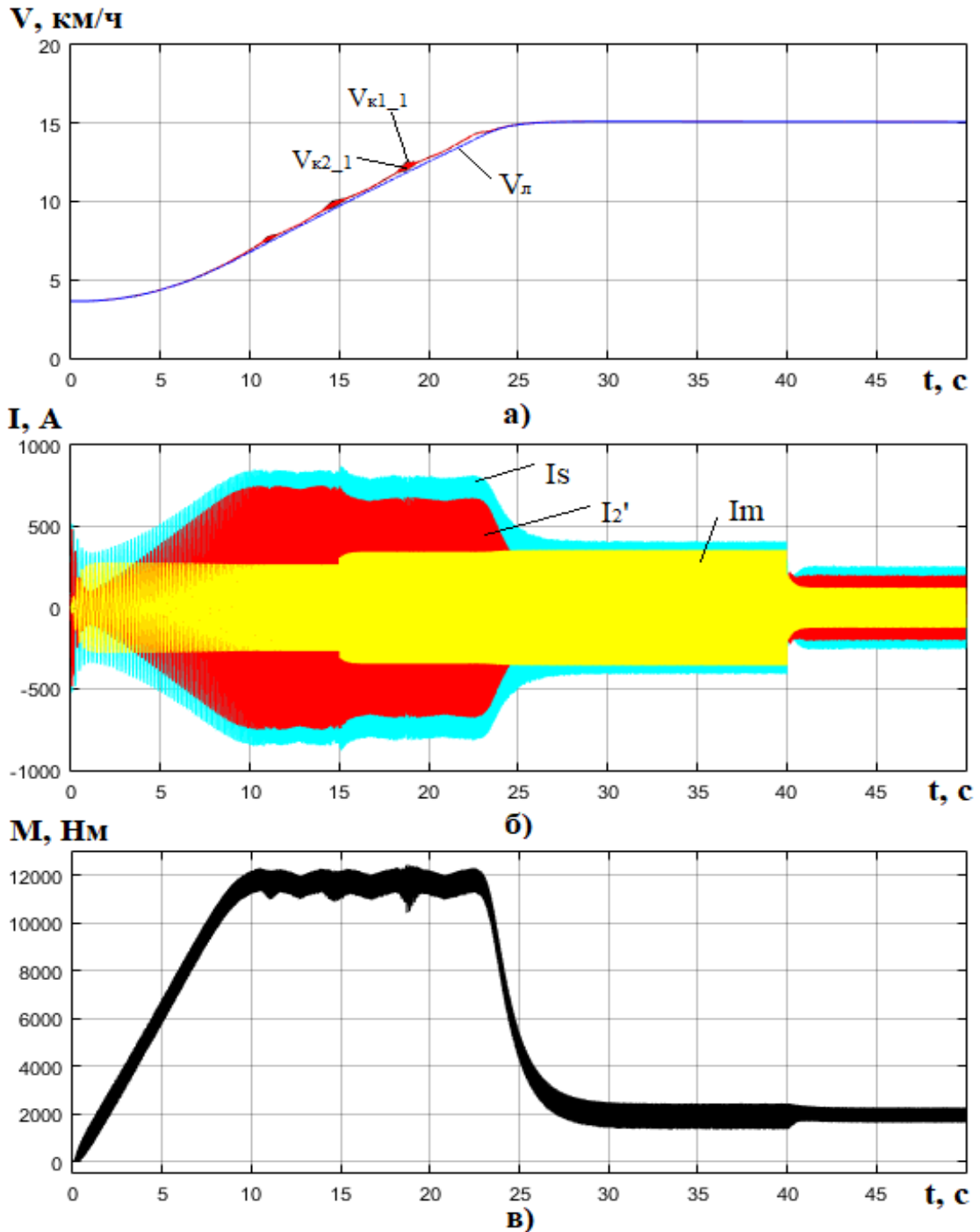


Рисунок 8 - Результаты моделирования разгона ТЭП тепловоза с АТД на пределе по сцеплению до заданной скорости с применением энергоэффективного управления двигателями:

- а) скорости колес 1-й оси ($V_{к1_1}$ и $V_{к2_1}$) и локомотива ($V_{л}$); б) ток фазы статора (I_1), приведённый ток фазы ротора (I_2') и ток намагничивания (I_m);
- в) электромагнитный момент (M)

Как видно из графиков, при переходе на энергоэффективный режим при больших нагрузках ТЭП потокосцепление статора увеличивается, снижаются токи статора и ротора, и возрастает ток намагничивания.

Это приводит к снижению электрических потерь в обмотках статора и ротора, которые пропорциональны квадратам соответствующих токов, и некоторому возрастанию магнитных потерь, которые пропорциональны квадрату индукции и частоте тока. Но в целом к.п.д. АД возрастает на 1-1,5 %, так как суммарные потери снижаются, что тоже в совокупности со снижением тока статора весьма положительно. Относительно небольшое увеличение к.п.д. вызвано тем, что в режимах, близких к номинальным нагрузкам, ТЭП работает в условиях, приближенных к условию максимума к.п.д., которое обычно соблюдается вблизи номинального режима.

При реализации энергоэффективного алгоритма в системе управления, оптимизированной по критерию минимума тока статора, параллельно снижению тока снижается и поток, как следствие снижаются потери. Наибольший эффект достигается в первой зоне регулирования при моментах нагрузки ниже 0,6 от номинальной величины. Уменьшение потокосцепления по энергосберегающему закону в подобных условиях (например, в опыте на рисунке 8 такое снижение выполнено при $t=40$ секунд, установившийся момент АД составляет при этом $0,19M_n$) приводит к существенному уменьшению тока статора и росту к.п.д., несмотря на то, что ток ротора при этом возрастает. В частности, в модельном эксперименте (рисунок 8) ток статора уменьшился на 30 %, к.п.д. возрос на 7,6 % по отношению к режиму с той же пониженной нагрузкой и номинальным заданием потокосцепления, величина задания потокосцепления статора при этом составила $\Psi_{S3} = 0,68\Psi_{Sn}$.

На рисунке 9 для номинальной частоты вращения АД приведены зависимости к.п.д. от нагрузки при обычном и энергоэффективном управлении, на рисунке 10 – зависимости процентного снижения тока статора от нагрузки при энергоэффективном управлении по сравнению с традиционным управлением. Зависимости к.п.д. от нагрузки были рассчитаны на основе известных электрических, магнитных, механических и добавочных потерь в двигателе АД917УХЛ1 в номинальном режиме и полученных данных по изменению тока и потокосцепления при энергоэффективном регулировании.

При создании Людиновским тепловозостроительным заводом (ЛТЗ) тепловоза ТЭМ9Н рассматривалось два варианта регулирования АД: совместное в пределах тележки при функционировании двух АД от одного АИН с общей СУ, а также индивидуальное – с отдельным АИН и СУ для каждого АД. В данной работе моделировалось преимущественно индивидуальное регулирование АД.

Предложенные принципы энергоэффективного прямого управления моментом АД и правильность методики расчета оптимальной по критерию минимума тока зависимости потокосцепления статора от задания момента были проверены на лабораторной установке.

Установка оборудована преобразователем частоты ACS850 фирмы АВВ с DTC с подключенным к нему асинхронным электродвигателем АО2-42-4У3. Также для проведения эксперимента к преобразователю частоты ACS850 подключен ПК с установленным специальным программным обеспечением DriveStudio v1.5. Дополнительно к электродвигателю был подключен тахогенератор для отображения текущей частоты вращения и сравнения с показаниями модели системы управления, которые отображаются в среде DriveStudio.

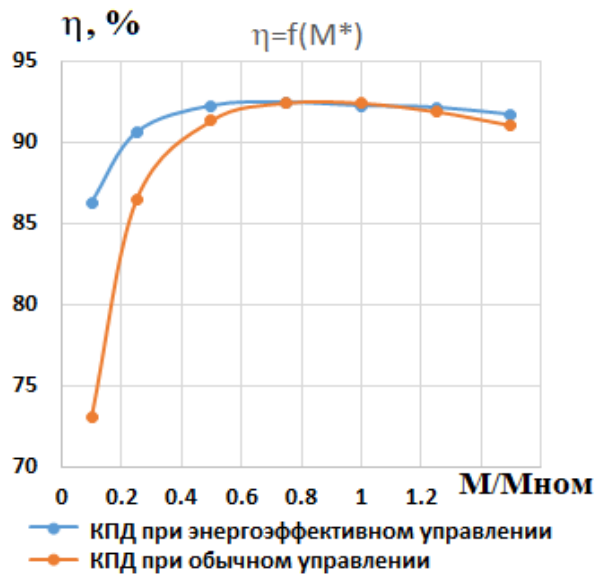


Рисунок 9 – Зависимость к.п.д. от момента при энергосберегающем и обычном управлении ТЭП с АД

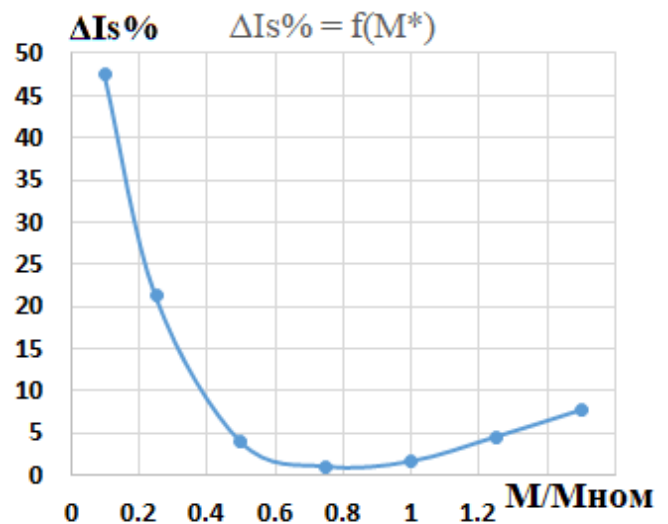


Рисунок 10 – Зависимость процентного снижения тока статора от момента в энергосберегающей СУ

Подробно исследовался процесс определения оптимального задания потокосцепления статора. При этом контролировался ток статора, электромагнитный момент и потокосцепление АД.

Для двигателя АО2-42-4У3, используемого на лабораторной установке, предварительно была снята характеристика намагничивания. Характеристика намагничивания получена на основе опыта холостого хода, при регулировании питающего напряжения двигателя индукционным регулятором.

Далее по методике, описанной в главе 2, был произведен расчет оптимальной энергоэффективной зависимости задания потокосцепления статора от задания момента. На рисунках 11 и 12 приведены характеристика намагничивания асинхронного двигателя АО2-42-4У3 и энергоэффективная зависимость задания потокосцепления статора от момента в относительных единицах соответственно. На кривую рисунок 12, рассчитанную аналитически, нанесены три экспериментальные точки (красным), полученные в ниже описанных лабораторных опытах.

Для проверки разработанной методики расчета оптимальной зависимости задания потокосцепления статора от момента АД и энергоэффективного алгоритма

было проведено три основных опыта:

1. Запуск двигателя на частоту вращения вала равную 750 об/мин при моменте нагрузки равном 25% номинального значения;
2. Запуск двигателя на частоту вращения вала равную 750 об/мин при моменте нагрузки равном 50% номинального значения;
3. Запуск двигателя на частоту вращения вала равную 750 об/мин при моменте нагрузки равном 72% номинального значения.

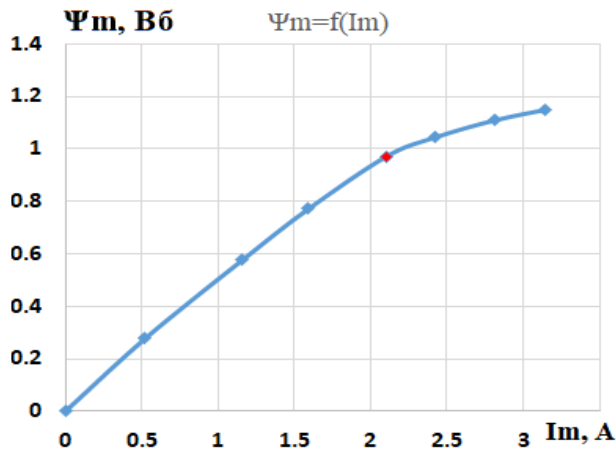


Рисунок 11 – Характеристика намагничивания асинхронного двигателя АО2–42–4У3

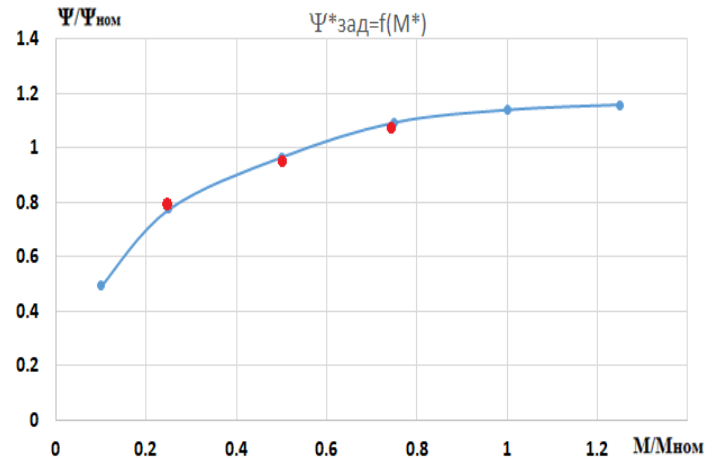


Рисунок 12 – Энергоэффективная зависимость задания потокосцепления статора от момента АД АО2–42–4У3

В первом опыте ($M = 0,25 \cdot M_{ном}$) снижение тока статора достигло 10-11% относительно величины тока при номинальном задании потокосцепления статора. При этом задание потокосцепления статора было снижено до $\Psi = 0,78 \cdot \Psi_{ном}$ (первая точка, рисунок 13).

Во втором опыте ($M = 0,5 \cdot M_{ном}$) снижение тока статора достигло 1-2% относительно величины тока при номинальном задании потокосцепления статора. При этом задание потокосцепления статора было снижено до $\Psi = 0,96 \cdot \Psi_{ном}$ (вторая точка, рисунок 13)

В третьем опыте ($M = 0,72 \cdot M_{ном}$) снижение тока статора достигло 3-4% относительно величины тока при номинальном задании потокосцепления статора. При этом задание потокосцепления статора было повышено до $\Psi = 1,07 \cdot \Psi_{ном}$ (третья точка, рисунок 13).

Результаты эксперимента показали высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных и тем самым подтвердили правильность аналитических положений и выбранных принципов построения энергоэффективной системы электропривода с прямым управлением моментом АД, оптимизированной по критерию минимума тока статора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана энергоэффективная система прямого управления моментом тягового электропривода с асинхронными двигателями, оптимизированная по критерию минимума тока статора.

2. Разработана методика расчета оптимальных значений задания потокосцепления статора по критерию минимума тока статора и угла между моментобразующими векторами в зависимости от задания момента АД в системе прямого управления моментом.

3. Рассчитаны оптимальные зависимости задания потокосцепления статора и угла между моментобразующими векторами тока и потокосцепления статора от задания момента тягового электродвигателя тепловозов ТЭМ9Н и 2ТЭ25А для реализации энергоэффективного регулирования по критерию минимума тока статора в системе прямого управления моментом.

4. Получены аналитические выражения, аппроксимирующие оптимальные зависимости потокосцепления статора и угла между моментобразующими векторами тока и потокосцепления статора от момента двигателя для АД тепловозов.

5. Разработаны алгоритмы функционирования блока логики переключений системы прямого управления моментом на энергоэффективный алгоритм формирования задания потокосцепления для тягового электропривода локомотивов с учётом контроля текущего режима и условий работы электропривода.

6. Разработана математическая и компьютерная модель энергоэффективной системы ТЭП локомотива с прямым управлением моментом асинхронных электродвигателей, позволяющая исследовать статические и динамические режимы работы ТЭП для оценки его функционирования в различных режимах движения локомотива и различных условиях сцепления.

7. При пониженных нагрузках электропривода энергосбережение в предложенной системе достигается за счёт снижения задания потокосцепления статора по рассчитанной оптимальной зависимости и соответствующего уменьшения реактивной составляющей тока статора асинхронного двигателя, а также магнитных и электрических потерь.

8. При повышенных нагрузках электропривода энергосбережение достигается за счёт повышения задания потокосцепления статора по рассчитанной оптимальной зависимости преимущественно за счёт уменьшения скольжения и снижения активной составляющей тока статора и электрических потерь; при этом повышение потокосцепления более чем на 20% нецелесообразно из-за роста насыщения магнитной цепи и тока намагничивания.

9. Наибольший энергосберегающий эффект в системе тягового электропривода тепловозов достигается при пониженных нагрузках и движении в диапазоне

скоростей, соответствующих 0,8 – 1,2 номинальной скорости вращения АД: так при моменте нагрузки АД 0,1 от номинального значения ($M=0,1M_n$) снижение тока статора составляет до 46% от значения тока при том же режиме движения и отсутствии энергоэффективного управления; к.п.д. повышается при энергоэффективном управлении в данном режиме на 12%.

10. Разработанные математические и компьютерные модели тягового электропривода локомотива с прямым управлением моментом асинхронных двигателей могут использоваться на стадии проектирования для отработки энергоэффективных алгоритмов управления.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

а) в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Конохов, Д.В. Энергоэффективное двухзонное регулирование электропривода с прямым управлением моментом асинхронных двигателей / Г.А. Федяева, Ю.М. Иньков, Д.В. Конохов, А.Н. Тарасов // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2018. - № 1. - С. 31 - 36.

2. Конохов, Д.В. Совершенствование системы управления тягового электропривода гибридного маневрового тепловоза / Г.А. Федяева, Ю.М. Иньков, А.Н. Тарасов, Д.В. Конохов // Электроника и электрооборудование транспорта. - 2017. - № 1. - С. 30 - 36.

3. Конохов, Д.В. Моделирование системы энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного электропривода с прямым управлением моментом / Конохов Д.В., Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В // Вестник Брянского государственного технического университета – 2016. - №1(49). - С. 127-133.

4. Конохов, Д.В. Частотно-токовая система релейно-векторного управления асинхронным электроприводом механизма передвижения мостового крана / Г.А. Федяева, Т.В. Смородова, Д.В. Кочевин, Д.В. Конохов // Вестник БГТУ. – 2015. - №4. - С. 91-99.

б) патенты:

5. Система энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя с прямым управлением моментом: Пат. РФ на полезн. модель RU 159422// Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В. //Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. – Опубл. 10.02.16, Бюл. № 4.

6. Система энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя с прямым управлением моментом без датчика скорости: Пат. РФ на полезн. модель RU 159869// Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В. //Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. – Оpubл. 20.02.16, Бюл. № 4.

7. Система регулирования асинхронного тягового электропривода локомотива на пределе по сцеплению колес с рельсами. Патент РФ на полезную модель RU 161280/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.04.2016. - Бюл. № 11.

8. Система автоматизированного управления электроприводом передвижения с коррекцией поперечного смещения. Патент РФ на полезную модель RU 164799/ Федяева Г.А., Кочевин Д.В, Смородова Т.В., Конохов Д.В., Бойко В.Н.//Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.09.2016. - Бюл. № 26.

9. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного двигателя в системе прямого управления моментом. Патент РФ на изобретение RU 2587162/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.06.2016. - бюл. № 17.

10. Способ энергоэффективного двухзонного регулирования скорости асинхронного электропривода с гибким ограничением мощности. Патент РФ на изобретение RU 2605458/ Федяева Г.А., Тарасов А.Н., Смородова Т.В., Конохов Д.В.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.12.2016. - бюл. № 35.

11. Способ автоматизированного управления электроприводом передвижения с коррекцией поперечного смещения. Патент РФ на изобретение RU 2605233/ Федяева Г.А., Смородова Т.В., Конохов Д.В., Кочевин Д.В., Бойко В.Н.// Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели. Оpubл. 20.12.2016.

в) в других изданиях и материалах конференций:

12. Конохов, Д.В. Моделирование асинхронного электропривода с системой экстремального управления / Д.В. Конохов, А.А. Пугачев // Материалы X Международной научно-практической конференции, 29-30 апреля 2013 г. – Переяслав–Хмельницкий - 2013. - №1. - С. 147-150.

13. Конохов, Д.В. Моделирование энергоэффективной системы управления асинхронным тяговым электроприводом / Д.В. Конохов Д.В., Г.А. Федяева, А.Г. Надточей // Тезисы докладов IV Научно-технического семинара «Компьютерное

моделирования в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ». – Брянск: Изд-во БГТУ, 2018. – С. 48-51.

14. Конохов, Д.В. Моделирование системы энергоэффективного регулирования асинхронного электропривода с прямым управлением моментом / Д.В. Конохов Д.В., Г.А. Федяева // Тезисы докладов I Международной научно-практической конференции «САПР и моделирование в современной электронике». – Брянск: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 203-207.

15. Федяева, Г.А. Снижение динамической наруженности асинхронного тягового электропривода маневрового локомотива / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Д.В. Конохов, В.Н. Бойко // Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». – С-Пб: Изд-во ПГУПС, 2015. – С. 95-96.

16. Федяева, Г.А. Энергосберегающие алгоритмы управления тяговым электроприводом гибридного маневрового тепловоза / Г.А. Федяева, А.Н. Тарасов, Д.В. Конохов, Т.В. Смородова // Тезисы докладов VIII Международного симпозиума «Элтранс-2015». - С-Пб: ПГУПС. - 2015.- С. 78.

17. Конохов, Д.В. Уменьшение суммарных потерь в асинхронном электроприводе при применении самонастраивающейся адаптивной оптимальной системы управления/ Д.В. Конохов, А.А. Пугачев// Материалы 68-й научной конференции. – Брянск: БГТУ, 2013. – С. 133-134.

18. Конохов, Д.В. Снижение динамических нагрузок в тяговых электроприводах локомотивов с асинхронными двигателями/ Г.А. Федяева, Д.В. Конохов, И.Д. Захарова // Автоматизированный электропривод и автоматика: сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции 1-4 июля 2014 г. – Липецк, 2014. - С. 9-10.

19. Федяева, Г.А. Электромеханическая модель системы управления передвижением мостового крана / Г.А. Федяева, Т.В. Смородова, Р.В. Ковалев, Д.В. Конохов // Тезисы докладов III Научно-технического семинара «Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ». – Брянск: Изд-во БГТУ, 2016. – С. 90-93.

Конохов Дмитрий Владимирович

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТОМ
АСИНХРОННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать 25.10.2018 Заказ № 1949 Формат 60X90/16
Усл. печ. л. – 1,5 Тираж 80 экз.

УПЦ ГИ РУТ (МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, дом 9, стр.9.