

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.333:621.313.323:621.313.042

**НГО
Фыонг Ле**

**ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С
ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы

Минск, 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный
руководитель

ГУЛЬКОВ Геннадий Игнатьевич,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Электропривод и автоматизация промышленных установок и
технологических комплексов» Белорусского национального
технического университета (г. Минск)

Официальные
оппоненты:

ЗАБЕЛЛО Евгений Петрович,
доктор технических наук, профессор кафедры «Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий» Белорусского государственного аграрного технического университета (г. Минск);

ПЕТРЕНКО Юрий Николаевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск)

Оппонирующая
организация

Белорусский государственный технологический университет, кафедра «Автоматизации производственных процессов и электротехники» (г. Минск)

Защита состоится 25 мая 2018 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, тел. ученого секретаря (+37517) 296-65-14, адрес электронной почты: ponomarenkoeg@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » апреля 2018 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

Пonomаренко Е. Г.

© Нго Фьонг Ле, 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в оздоровлении экологической обстановки окружающей среды и энергетический кризис привели к ускоренному развитию транспортных средств с тяговым электроприводом.

В связи с этим особую актуальность приобретает задача развития транспортных средств с альтернативными источниками энергии, особенно электрическими, которые являются наиболее перспективными и экологически безопасными.

Вопросы проектирования электродвигателя и тягового электропривода для электромобиля исследовали многие авторы: Ефремов И. С., Пролыгин А. П., Машихин А. Д., Миндлин А. Б., Изосимов Д. Б., Ксенович И. П., Виноградов А. Б., Mehrdad Ehsani, Khwaja M. Rahman, Y. K. Chin, J. Soulard, Lee Seong Tek, Heikkilä Tanja, Chong Lester, Thelin Peter, Yao Duan, Qin Sun, M. Popescu, L. Evans, D. A. Staton, S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, T. Hirasa, M. Meyer, J. Bocker и др. Несмотря на многообразие разработок, во Вьетнаме до сих пор практически отсутствуют исследования в этой области. С другой стороны, не полностью использован потенциал современных методов оптимизации и возможностей компьютерной техники для проектирования электрических тяговых машин и тягового электропривода.

Применение современных вычислительных методов и методов оптимизации параметров синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами (СДИПМ) требует разработки специализированного программного обеспечения для автоматизации процесса проектирования, что позволяет повысить эффективность проектирования тягового электропривода электромобиля.

Вышесказанное позволяет считать актуальной диссертационную работу, направленную на разработку методик проектирования и автоматизированного программного обеспечения для проектирования СДИПМ и микропроцессорного управляющего устройства с целью повышения эффективности тягового электропривода электромобиля.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами и темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ:

1. «Список высокотехнологичных специальностей, приоритетных для инвестиций в развитие» (утвержден Премьер-министром Социалистической Республики Вьетнам по постановлению № 66/2014/QĐ-ТТг от 25.11.2014);
2. Программа аспирантуры по специальности автоматического управления и автоматизации, утвержденная Министром образования Вьетнама 14 февраля 2012 г., № 04/2012/ТТ-GD-ĐT);
3. Госбюджетная научно-исследовательская работа кафедры "Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов" (ЭАПУ-иТК) БНТУ ГБ № 11-257 «Совершенствование электротехнических систем на основе полупроводниковых преобразователей электроэнергии и бесконтактных электродвигателей»;

4. Госбюджетная научно–исследовательская работа кафедры "Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов" (ЭАПУ-иТК) БНТУ ГБ № 16–273 «Совершенствование электротехнических систем промышленных механизмов и транспортных средств».

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы заключается в повышении эффективности тягового электропривода электромобиля.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Определение требуемой тяговой характеристики электромобиля;
2. Сравнение электрических двигателей для электрического транспортного средства по возможности регулирования скорости при постоянной мощности нагрузки;
3. Разработка полной математической модели СДИПМ, включающей математические модели магнитной и электрической цепей;
4. Разработка методики расчета электрических параметров СДИПМ;
5. Разработка методики автоматизированного проектирования СДИПМ на основе генетического алгоритма;
6. Расчет оптимального вектора тока для реализации предельной и частичных тяговых характеристик;
7. Построение структурной схемы системы векторного управления тяговым электроприводом с СДИПМ;
8. Синтез регуляторов тока системы векторного управления тяговым электроприводом с СДИПМ;
9. Проведение имитационного моделирования системы векторного управления тяговым электроприводом с СДИПМ;
10. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для автоматизации проектирования СДИПМ.

Объект исследования: синхронный двигатель с инкорпорированными постоянными магнитами.

Предмет исследования: методики проектирования тягового электропривода с СДИПМ.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке:

1. Методики построения тяговой характеристики электромобиля, отличающейся возможностью определения минимальной необходимой мощности тягового электродвигателя, обеспечивающей движение электромобиля по заданному стандартному циклу;
2. Методики расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции в координатах АВС и dq на основе замещения реального ротора с инкорпорированными постоянными магнитами эквивалентным явнополюсным ротором, обеспечивающей точность до 11% по сравнению с методом конечных элементов;
3. Методики автоматизированного проектирования синхронных двигателей с инкорпорированными постоянными магнитами на основе генетического алгоритма оптимизации параметров, позволяющей рассмотреть множество вариантов конструкций ротора двигателя и значительно сократить время проектирования;

4. Алгоритмического и программного обеспечения для автоматизации проектирования СДИПМ, включающего в себя алгоритмы и компьютерные программы оптимизации параметров, расчета таблиц поиска оптимального вектора тока для обеспечения микропроцессорной реализации системы автоматического управления электромобиля, расчета и анализа рабочих характеристик, позволяющего повысить точность и сократить время проектирования.

Положения, выносимые на защиту

Автором защищаются:

1. Методика построения тяговой характеристики электромобиля, обеспечивающей движение электромобиля по заданному стандартному циклу;
2. Методика расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции в координатах ABC и dq на основе замещения реального ротора с инкорпорированными постоянными магнитами эквивалентным явнополюсным ротором;
3. Методика автоматизированного проектирования СДИПМ на основе генетического алгоритма оптимизации параметров СДИПМ;
4. Алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизации проектирования СДИПМ.

Личный вклад соискателя ученой степени

Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично автором или при его основном участии.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно–практических конференциях, форумах и симпозиумах: Международных научно–технических конференциях БНТУ «Наука – образованию, производству, экономике», Минск 2013–2016 г.; Международных научно–практических конференциях «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино– и приборостроении», Минск 2015, 2016 и 2017 г.; Международной научно–технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Гомельского государственного технического университета «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления», Гомель 2016 г.; Республиканской научной конференции студентов и аспирантов Гомельского государственного университета «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях», Гомель 2017 г.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликованы 4 статьи в научных журналах, включенных в перечень ВАК Беларуси (всего 1,9 авторского листа), 8 статей в сборниках научных работ международных научно–практических конференций и 1 в сборнике научных работ республиканской научно–технической конференции.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, библиографического списка (включающего 80 использованных источников и 13 публикаций автора) и 5 приложений.

Объем диссертации составляет 195 страниц, включая 140 рисунков и 20 таблиц. Объем приложений составляет 14 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** анализируются основные литературные источники по теме диссертации, обосновывается актуальность проводимых исследований, формулируются цели и задачи диссертационной работы.

В **главе 1** «Анализ технологических характеристик электрического транспортного средства и выбор вида электрического двигателя» установлены требования к тяговому электроприводу, приведены наиболее распространенные варианты его конструктивного исполнения, выбран вариант в котором дифференциал и редуктор объединены в единый конструктивный элемент.

Представлена методика построения тяговой характеристики, обеспечивающей движение электромобиля по заданному стандартному циклу с минимальной необходимой мощностью.

Уравнение движения электромобиля получено в виде:

$$M\eta_{\Pi} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2}\rho C_d A_f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2 - G \sin \alpha \frac{r}{i} = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

где ρ – удельная плотность воздуха; C_d – коэффициент сопротивления; A_f – площадь лобового сопротивления; η_{Π} – к.п.д. передачи от тягового электродвигателя к колесам; G – сила тяжести электромобиля; α – угол уклона дороги; δ – коэффициент трения качения коле; J_{Σ} – приведенный к валу тягового электродвигателя (ТЭД) момент инерции электромобиля; r – радиус колеса; i – передаточное отношение редуктора; $N = G \cos \alpha$ – нормальная составляющая давления электромобиля на дорогу; M – момент ТЭД; ω – скорость ТЭД.

Механическая характеристика $M = f(\omega)$ (рисунок 1) тягового электродвигателя (ТЭД) в системе автоматического управления (САУ), соответствующая тяговой характеристике, определяется на основе требуемого цикла движения и уравнения (1). Для её построения определяются следующие параметры: максимальный момент M_{\max} , ограничиваемый сцеплением колес с дорогой; минимальный момент M_{\min} при ω_{\max} , необходимый для обеспечения движения электромобиля с максимальной скоростью v_{\max} ; номинальные величины мощности P_H , момента M_H и скорости ω_H . Номинальные величины P_H , M_H должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить требуемое ускорение на всех интервалах цикла движения:

$$t_k = t_{\text{рг}}(\omega_H, \omega_k, P_H) \leq t_k^* \quad (2)$$

где ω_k – конечная скорость на интервале разгона k ; t_k^* – требуемое время разгона до скорости ω_k на интервале k ; $k = 1 \dots n_{\text{рг}}$; $n_{\text{рг}}$ – количество интервалов разгона; t_k – время разгона от 0 до скорости ω_k при номинальной скорости ω_H и номинальной мощности P_H .

Получены аналитические выражения для определения времени $t_{\text{пр}}(\omega_H, \omega_k, P_H)$:

$$t_{\text{пр}} = \int_0^{\omega_k} \frac{J_{\Sigma} d\omega}{\frac{P_H}{\omega_H} \eta_{\text{п}} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2} \rho C_d A f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2} \quad \text{если } \omega_k \leq \omega_H, \quad (3)$$

$$t_{\text{пр}} = \int_0^{\omega_H} \frac{J_{\Sigma} d\omega}{\frac{P_H}{\omega_H} \eta_{\text{п}} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2} \rho C_d A f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2} + \int_{\omega_H}^{\omega_k} \frac{J_{\Sigma} d\omega}{\frac{P_H}{\omega} \eta_{\text{п}} - \frac{N\delta}{i} - \frac{1}{2} \rho C_d A f \left(\frac{r}{i}\right)^3 \omega^2} \quad (4)$$

если $\omega_k > \omega_H$.

Для обеспечения минимально возможной массы и габаритов электродвигателя значения P_H и M_H должны быть минимальными. Минимальная номинальная мощность $P_H^{\text{МИН}}$, удовлетворяющая условию (2), определяется выражением:

$$P_H^{\text{МИН}} = \max\{P_k\}, \quad (5)$$

где P_k – решение уравнения

$$t_{\text{пр}}(\omega_H, \omega_k, P_k) = t_k^*. \quad (6)$$

Минимальный номинальный момент $M_H^{\text{МИН}}$, необходимый для обеспечения разгона на всех интервалах цикла движения, определяется выражением $M_H^{\text{МИН}} = \frac{P_H^{\text{МИН}}}{\omega_H}$.

$P_H^{\text{МИН}}$ и $M_H^{\text{МИН}}$ являются функциями от ω_H , представленными в графическом виде на рисунке 2.

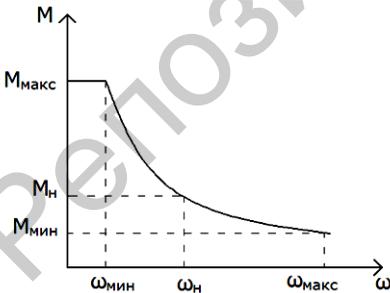


Рисунок 1. – Механическая характеристика ТЭД в САУ

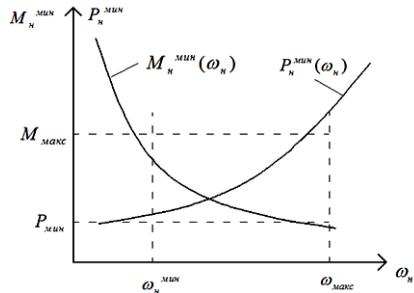


Рисунок 2. – Кривые минимальной мощности $P_H^{\text{МИН}}(\omega_H)$ и момента

$$M_H^{\text{МИН}}(\omega_H)$$

Из полученных графиков можно определить номинальные значения P_H , ω_H тягового электродвигателя следующим образом:

– задаем номинальный момент $M_H = M_{\text{макс}}$, определяем значение ω_H из пересечения линии $M_H = M_{\text{макс}}$ и кривой $M_H^{\text{МИН}}(\omega_H)$, определяем значение

$$P_H = P_H^{\text{МИН}}(\omega_H);$$

– если полученная номинальная мощность меньше $P_{\text{МИН}}$, то задаем номинальную мощность $P_H = P_{\text{МИН}}$, определяем значение ω_H из пересечения линии

$$P_H = P_{\text{МИН}} \text{ и кривой } P_H^{\text{МИН}}(\omega_H), \text{ определяем значение } M_H = M_H^{\text{МИН}}(\omega_H).$$

– если полученный диапазон регулирования не может быть достигнут, то задаем $d = \frac{\omega_{\text{макс}}}{\omega_H} = d_{\text{макс}}$, определяем $\omega_H = \frac{\omega_{\text{макс}}}{d_{\text{макс}}}$, $P_H = P_H^{\text{МИН}}(\omega_H)$, $M_H = M_H^{\text{МИН}}(\omega_H)$.

В главе 1 также проведено сравнение возможности регулирования скорости с постоянством мощности асинхронного двигателя (АД), синхронных двигателей с поверхностным расположением постоянных магнитов (СДППМ) и СДИПМ. Наличие в СДИПМ помимо основной составляющей реактивной составляющей момента позволяет расширить диапазон регулирования скорости по сравнению с АД и СДППМ.

Вторая глава «Математическое моделирование СДИПМ» посвящена разработке полной математической модели СДИПМ, включающей математические модели магнитной цепи и электрической цепи.

Математическая модель магнитной цепи СДИПМ построена с помощью метода эквивалентных схем магнитной цепи. В магнитную цепь входят четыре участка: постоянные магниты с полюсом из магнитомягкой стали; участки рассеяния магнитного потока, включающие воздушные барьеры и стальные мосты; воздушный зазор; зубцы и ярмо статора (рисунок 3).

Рассмотрен каждый участок магнитной цепи, получены для них аналитические уравнения, эквивалентные схемы и полная эквивалентная схема магнитной цепи (рисунок 4).

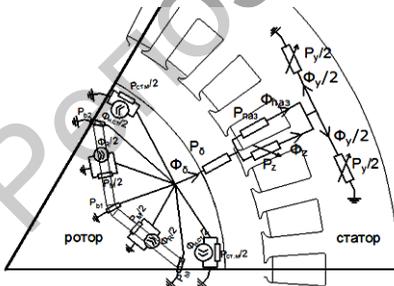


Рисунок 3. – Магнитная цепь

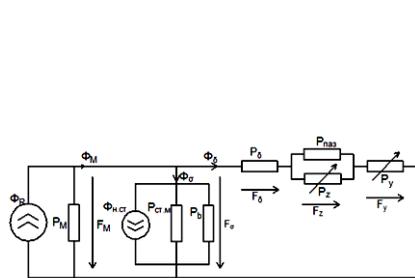


Рисунок 4. – Эквивалентная схема

На рисунках 3 и 4 введены следующие обозначения: P_M , $P_{\text{ст.м}}$, P_B , P_δ , P_ζ , $P_{\text{паз}}$, P_y – магнитные проводимости магнитов, насыщенных стальных мостов на полюс, воздушных барьеров, воздушного зазора, зубцов статора, пазов статора и

ярма статора, соответственно; ϕ_R – магнитный поток на полюс от остаточной индукции; ϕ_M – полный магнитный поток на полюс; $\phi_{н.ст}$ – магнитный поток, соответствующий насыщению стальных мостов на полюс; ϕ_δ , ϕ_z , ϕ_y – магнитный поток через воздушный зазор, зубцы статора и ярмо статора, соответственно; F_M – магнитодвижущая сила магнита; F_σ , F_δ , F_z , F_y – падение магнитного потенциала на цепи рассеяния, воздушном зазоре, зубцах и ярме статора, соответственно.

Математическая модель магнитной цепи позволяет:

- найти требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя;
- определить магнитный поток, рабочую точку магнита и потокосцепление от магнитов при известной конструкции ротора и статора.

Рассмотрены математическая модель СДИПМ в виде системы уравнений в координатах ABC и dq (таблица 1).

Таблица 1. – Математическая модель СДИПМ

Уравнения	Системы координат	
	ABC	dq
Электрической цепи	$u_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d\psi_{abc}}{dt}$	$\begin{cases} u_d = R i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \\ u_q = R i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \end{cases}$
Потокосцеплений	$\psi_{abc} = L_s i_{abc} + \psi_{Mabc}$	$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_M \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases}$
Момента	$M = p_{\Pi} \left(\frac{1}{2} i_{abc}^T \frac{\partial L_s}{\partial \theta} i_{abc} + i_{abc}^T \frac{\partial \psi_{Mabc}}{\partial \theta} \right)$	$M = \frac{3}{2} p_{\Pi} \left(\psi_M i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right)$

В таблице 1 введены следующие обозначения: u_{abc} – вектор напряжения фаз статора; ψ_{abc} – вектор потокосцепления; i_{abc} – вектор тока фаз статора; ψ_{Mabc} – вектор потокосцепления от постоянных магнитов; L_s – матрица собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции; R_s – матрица активного сопротивления; R – активное сопротивление; L_d , L_q – индуктивности в осях d,q; i_d , i_q – составляющие тока в осях d,q; u_d , u_q – составляющие напряжения в осях d,q; ψ_M – потокосцепление от постоянных магнитов; p_{Π} – число пар полюсов; θ – электрический угол поворота ротора; ω – электрическая скорость ротора; L_A , L_B , L_C – собственные индуктивности фаз двигателя; M_{AB} , M_{AC} , M_{BC} , M_{BA} , M_{CA} , M_{CB} – индуктивности взаимной индукции между соответствующими фазами двигателя;

$$L_s = \begin{bmatrix} L_A(\theta) & M_{AB}(\theta) & M_{AC}(\theta) \\ M_{BA}(\theta) & L_B(\theta) & M_{BC}(\theta) \\ M_{CA}(\theta) & M_{CB}(\theta) & L_C(\theta) \end{bmatrix}; R_s = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}.$$

Разработана методика расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции путем замещения ротора с инкорпорированными постоянными магнитами эквивалентным явнополюсным ротором (рисунок 5). Стальные мосты, барьеры и постоянные магниты в роторе замещаются эквивалентным воздушным зазором, соответствующим магнитной проводимости указанных участков.

Эквивалентный воздушный зазор описывается функцией:

$$\delta(\phi_r) = \begin{cases} \delta_{max} & \text{при } -\frac{\gamma_M}{2p} \leq \phi_r \leq \frac{\gamma_M}{2p} \\ \delta_{min} & \text{при } -\frac{\pi}{2p} \leq \phi_r \leq -\frac{\gamma_M}{2p} \text{ и } \frac{\gamma_M}{2p} \leq \phi_r \leq \frac{\pi}{2p} \end{cases} \quad (7)$$

где $\delta_{min} = l'_\delta = l_\delta k_c$ – минимальное значение эквивалентного воздушного зазора; $\delta_{max} = l'_\delta + \frac{\mu_0 w_\delta l_M}{P_M + P_{ст.М} + P_B}$ – максимальное значение эквивалентного воздушного зазора; $l'_\delta = k_c l_\delta$ – длина эквивалентного воздушного зазора с учетом влияния зубцов статора; k_c – коэффициент Картера; $w_\delta = \frac{\gamma_M r}{p}$ – ширина угла открытия магнитов; γ_M – угол открытия постоянных магнитов; l_δ – длина воздушного зазора; r – средний радиус зазора; l_M – длина магнита по направлению магнитной индукции; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

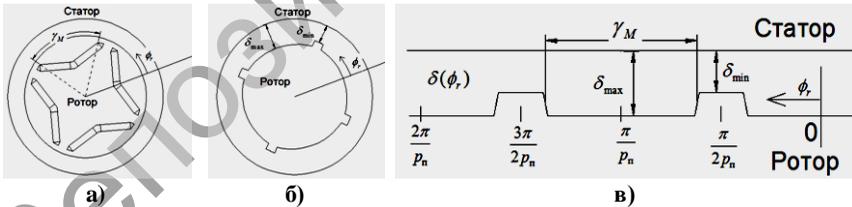


Рисунок 5. – а) Ротор с инкорпорированными магнитами; б) Эквивалентный явнополюсный ротор; в) Схема эквивалентного воздушного зазора

Получены выражения для расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции:

$$\begin{aligned} L_A(\theta) &= L_0 + L_1 - L_2 \cos 2\theta, \\ L_B(\theta) &= L_0 + L_1 - L_2 \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \\ L_C(\theta) &= L_0 + L_1 - L_2 \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right), \end{aligned}$$

$$M_{AB}(\theta) = M_{BA}(\theta) = -\frac{1}{2}L_1 - L_2 \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right),$$

$$M_{AC}(\theta) = M_{CA}(\theta) = -\frac{1}{2}L_1 - L_2 \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right),$$

$$M_{BC}(\theta) = M_{CB}(\theta) = -\frac{1}{2}L_1 - L_2 \cos 2(\theta + \pi),$$

где L_0 – индуктивность рассеяния обмотки; L_1, L_2 – постоянные величины, зависящие от числа витков обмотки статора, размеров ротора и зазора:

$$L_1 = \left(\frac{w_{\text{ГР}}}{2}\right)^2 \pi \mu_0 r l_p \lambda_0, \quad L_2 = -\frac{1}{2} \left(\frac{w_{\text{ГР}}}{2}\right)^2 \pi \mu_0 r l_p \lambda_1,$$

где $w_{\text{ГР}}$ – эквивалентное число витков группы катушки с учетом укорочения шага и распределения обмотки; l_p – длина ротора; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха;

$$\lambda_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\gamma_M}{\delta_{\max}} + \frac{\pi - \gamma_M}{\delta_{\min}} \right), \quad \lambda_1 = \frac{2}{\pi} \sin \gamma_M \left(\frac{1}{\delta_{\max}} - \frac{1}{\delta_{\min}} \right).$$

Индуктивности в осях d,q:

$$L_d = L_0 + \frac{3}{2}L_1 - \frac{3}{2}L_2, \quad L_q = L_0 + \frac{3}{2}L_1 + \frac{3}{2}L_2.$$

Результаты расчета представлены на рисунках 6, 7 и 8, на которых штриховая линия – результат расчета предложенным методом, а сплошная линия – методом конечных элементов (МКЭ). Отличие между ними не превышает 7% для собственных индуктивностей и 11% для индуктивностей взаимоиндукции.

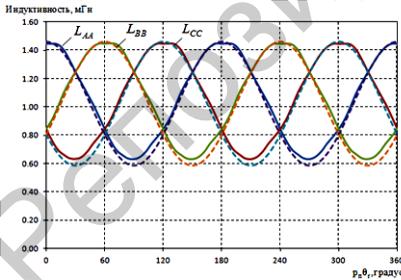


Рисунок 6. – Собственные индуктивности

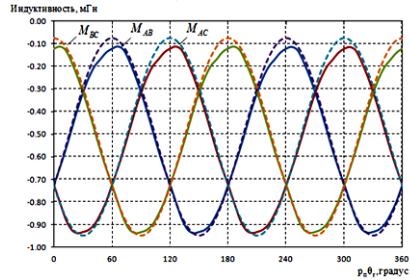


Рисунок 7. – Индуктивности взаимоиндукции

Так как индуктивность L_d практически не зависит от тока статора, отличие между аналитическим расчетом и методом конечных элементов незначительно и не превышает 10% (рисунок 8а). Численное отличие результатов аналитического расчета и МКЭ индуктивности L_d можно объяснить отсутствием учета насыщения ферромагнитных участков магнитной цепи. Значения момента, рассчитываемые

мого МКЭ и предложенным методом, на большей части кривой момента от тока практически совпадают (рисунок 8б).

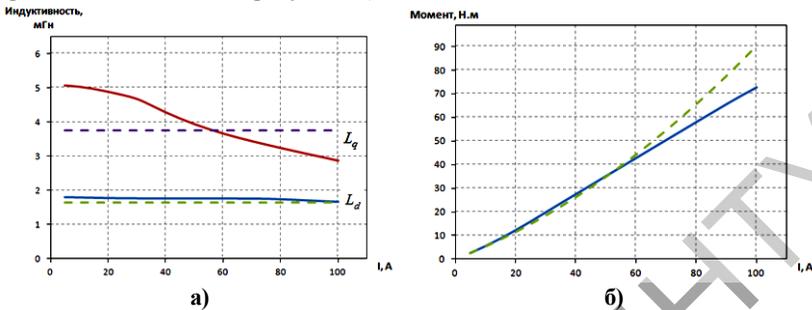


Рисунок 8. а) индуктивность L_d , L_q в зависимости от тока статора; б) момент в зависимости от тока статора.

В главе 3 «Проектирование синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами на основе асинхронного двигателя» разработана методика проектирования СДИПМ.

Проектирование на основе асинхронного двигателя включает следующие этапы: выбор прототипного асинхронного двигателя (АД); предварительный тепловой расчет СДИПМ с учетом нескольких вариантов охлаждения; определение геометрических размеров ротора и параметров обмоток статора путем решения задачи многокритериальной оптимизации (ЗМО); проверка результатов теплового расчета и результатов оптимизации и выбор оптимального варианта охлаждения.

Прототипный асинхронный двигатель выбирается на основе номинального момента требуемой тяговой характеристики. Предварительный тепловой расчет осуществляется с помощью метода конечных элементов. В результате расчета определяются температура постоянных магнитов и обмотки статора с двумя способами охлаждения. Для большинства электрических машин оценкой возможности по обеспечению номинального момента является температура нагрева обмотки статора t_1^0 . Для СДИПМ лимитирующим фактором является также температура нагрева постоянных магнитов t_2^0 .

Рассмотрены способы охлаждения – зависимое охлаждение («А») и независимое охлаждение («В»). В каждом варианте осуществляется тепловой расчет с рядом значений плотности тока $J = 0 \dots 15$ (А/мм²). В результате расчета получены зависимости температуры от плотности тока J . В варианте В также варьируется скорость охлаждающего воздуха $v_в$ и получены зависимости t_1^0 и t_2^0 от J и $v_в$. Существует допустимое значение плотности тока $J_{доп}$ до которого рассмотренные температуры не превышают допустимых значений.

В результате расчета для варианта А получено допустимое значение плотности тока $J_{доп}^A = 6$ (А/мм²). Для варианта В получена зависимость допустимого значения плотности тока $J_{доп}$ от скорости охлаждающего воздуха $v_в$ внешнего вентили-

лятора. Допустимое значение $J_{\text{доп}}$ используется для выбора варианта охлаждения на основе сравнения $J_{\text{доп}}$ с минимальным $J_{\text{мин}}$, полученным в результате оптимизации параметров.

Расчет геометрических размеров ротора и параметров обмотки статора осуществляется путем решения задачи многокритериальной оптимизации.

Задача многокритериальной оптимизации (МКО–задача) формулируется следующим образом: найти вектор параметров

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in S \quad (8)$$

с учетом m функций ограничения

$$g_i(\vec{x}) \leq 0, i = 1..m, \quad (9)$$

чтобы максимизировать вектор

$$\vec{f}(\vec{x}) = [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x})] \rightarrow \text{макс.} \quad (10)$$

Для решения задачи многокритериальной оптимизации выбран генетический алгоритм. Генетический алгоритм (ГА) представляет собой самый популярный алгоритм в группе эволюционных алгоритмов. ГА не требуют заданной отправной точки, также позволяет использовать нелинейные, дискретные целевые функции и условия ограничения.

Для постановки задачи оптимизации параметров СДИПМ необходимо определить следующие данные: исходные данные, оптимизируемые параметры, целевые функции и функции ограничения. Исходными данными являются технические данные постоянных магнитов и стали статора, геометрические размеры статора, пазов статора и вала ротора. Оптимизируемыми параметрами являются геометрические размеры магнитов, барьеров, стальных мостов ротора и параметров обмоток. Выбранные целевые функции – минимизация плотности тока J и минимизация массы магнита для уменьшения стоимости.

Один из методов учета ограничений типа неравенств (9) состоит в том, что составляется расширенный критерий вида

$$F_j(\vec{x}) = f_j(\vec{x}) - \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} g_i(\vec{x}), \quad (11)$$

где λ_{ij} – коэффициент штрафа для целевой функции $f_j(\vec{x})$, если ограничение $g_i(\vec{x}) \leq 0$ нарушено; $i = 1..m$; $j = 1..k$; m – число функций ограничения; k – число целевых функций.

Функции ограничения определяются следующими условиями:

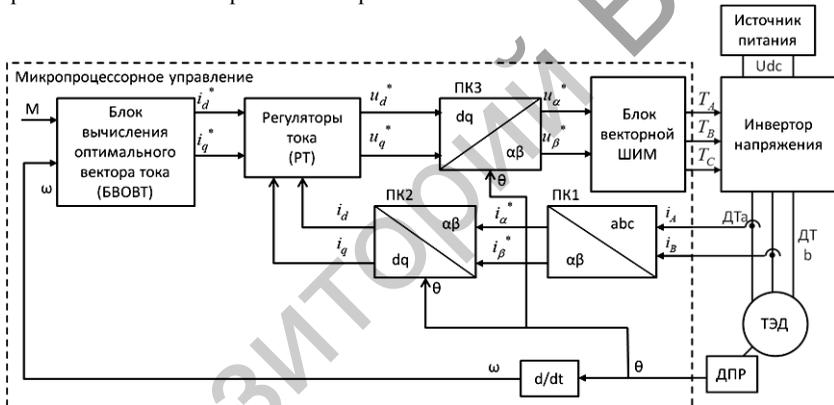
– требуемый номинальный момент: $M_m \geq M_{\text{треб}}$, где M_m – максимальное возможное значение; $M_{\text{треб}}$ – номинальный момент, полученный из необходимой тяговой характеристики;

– условие обеспечения устойчивости к размагничиванию постоянных магнитов: $I_m \leq I_{\text{м.р}}$, где I_m – допустимое значение тока; $I_{\text{м.р}}$ – предельное значение тока статора, при котором обеспечивается устойчивость к размагничиванию;

- максимизация диапазона регулирования: $\left| I_m - \frac{\Psi_M}{L_d} \right| \leq \Delta I$, где Ψ_M – потокосцепление обмотки статора от постоянных магнитов; ΔI – допустимая разность;
- уменьшение потерь в стали при холостом ходе: $|\gamma_M - 133,5^\circ| \leq \Delta\gamma_M$, где угол открытия постоянных магнитов на один полюс (электрический); $\Delta\gamma_M$ – допустимая разность.

В главе 4 «Векторное управление тяговым электроприводом электромобиля с СДИПМ» представлена структурная схема тягового электропривода (ТЭП) с СДИПМ (рисунок 9) с использованием микропроцессорного управления, описаны ее блоки и их микропроцессорная реализация.

БВОВТ осуществляет вычисление оптимального вектора тока на основании задающего значения момента M и текущего значения угловой скорости ω с учетом ограничения тока и напряжения якоря.



ДПР – датчик положения ротора; ШИМ – широтно-импульсная модуляция;
ПК – преобразователь координат

Рисунок 9. – Структурная схема ТЭП с микропроцессорным управлением

Алгоритм функционирования БВОВТ включает следующие этапы:

- построение кривых предельного значения тока и напряжения из условий ограничения тока и напряжения;
- построение оптимальных траекторий вектора тока $\left(\frac{M}{I} \right)_{\text{макс}}$ (при скорости до номинальной) и $P = P_{\text{макс}}$ (при скорости выше номинальной);
- формирование перемещения вектора тока для получения максимального момента и максимальной мощности (предельная характеристика);
- формирование оптимального вектора тока при задающем значении момента M и текущей скорости ω (частичные характеристики).

Для повышения точности алгоритма функционирования БВОТ в работе используется модель конечных элементов магнитной цепи СДИПМ, в которой учитывается насыщение в стали.

Для микропроцессорной реализации таблицы поиска оптимального вектора тока заранее вычисляются на ЭВМ. В микропроцессоре оптимальный вектор вычисляется путем интерполяции из таблиц поиска.

Осуществлен синтез микропроцессорной системы векторного управления с использованием трех вариантов регуляторов тока РТd и РТq: ПИ–регулятора; регулятора с конечным временем регулирования с обратной связью (РСКВР1); регулятора с конечным временем регулирования с обратной связью вектора состояний (РСКВР2). Для синтеза регуляторов тока построена дискретная модель электрической цепи СДИПМ в z -области:

$$zi(z) = \Phi i(z) + Hu(z) + \omega S_{\Delta} \quad (12)$$

$$\text{где } \Phi = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R}{L_d} T & T\omega \frac{L_q}{L_d} \\ -T\omega \frac{L_d}{L_q} & 1 - \frac{R}{L_q} T \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix}; S_{\Delta} = \begin{bmatrix} 0 \\ -T \frac{\Psi_M}{L_q} \end{bmatrix}; i = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}; T$$

– интервал дискретности.

Синтез ПИ–регулятора осуществляется путем выбора корней характеристического полинома. Получены выражения для расчета параметров регулятора:

$$K_{pd} = 2 \frac{L_d}{T} (1-a) - R, \quad K_{id} = L_d \frac{(a-1)^2 + b^2}{T^2}, \quad (13)$$

$$K_{pq} = 2 \frac{L_q}{T} (1-a) - R, \quad K_{iq} = L_q \frac{(a-1)^2 + b^2}{T^2}. \quad (14)$$

где K_{pd} , K_{pq} – коэффициенты усиления пропорциональной части регуляторов составляющих тока d, q , соответственно; K_{id}, K_{iq} – коэффициенты усиления интегрирующей части регуляторов составляющих тока d, q , соответственно; a, b – вещественная и мнимая части выбранных корней.

Синтез РСКВР1 и РСКВР2 осуществляется на основе метода «целевая передаточная функция», в котором передаточная функция регулятора определяется из желаемой динамической характеристики. Выбранная целевая передаточная функция:

$$G(z) = \frac{i(z)}{i^*(z)} = \left[z^{-(n+1)} + (1-z^{-1}) \sum_{v=1}^n \frac{v-1}{n} z^{-v} \right], \quad (15)$$

где n – желаемое число интервалов дискретности, соответствующее желаемому времени регулирования nT .

Для РСКВР1 получены передаточные функции регулятора:

$$R_1(z) = \frac{E_2 - z^{-1}\Phi}{1 - z^{-2}} \text{ при } n = 1$$

$$R_3(z) = \frac{1}{3} \frac{(1 + z^{-1} + z^{-2})(E_2 - z^{-1}\Phi)}{1 - \frac{1}{3}(z^{-2} + z^{-3} + z^{-4})} \text{ при } n = 3 \quad (16)$$

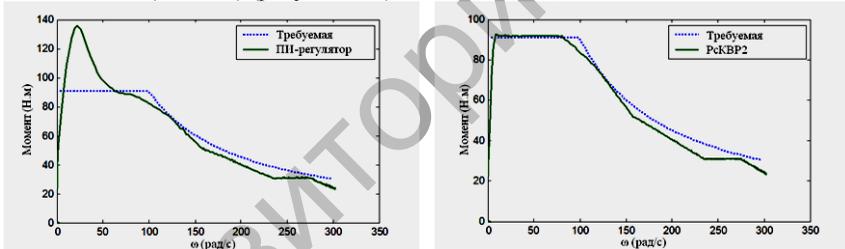
где E_2 – единичная матрица размера 2×2 .

Для РСКВР2 получена передаточная функция регулятора:

$$R_{\text{РСКВР2}}(z) = z\Phi. \quad (17)$$

Передаточная функция регулятора РСКВР2 содержит один оператор z . Это значит, что необходимо осуществить прогнозирование вектора тока на предшествующем интервале. Формула (12) может использоваться в качестве выражения прогнозирования вектора тока.

Проведено имитационное моделирование трех вариантов САУ, в результате которого получены переходные характеристики контура регулирования тока и динамические механические характеристики при пуске двигателя с номинальной нагрузкой. Установлено, что наилучшей является САУ с регулятором с прогнозированием тока (РСКВР2) (рисунок 10б).



а) ПИ–регулятор

б) РСКВР2

Рисунок 10. – Динамические механические характеристики ТЭП с СДИПМ

В главе 5 представлено алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизации проектирования СДИПМ (ПАПД), разработанное автором. ПАПД включает в себя следующие программы:

- программа для определения требуемой тяговой характеристики электродвигателя;
- программа для автоматизации тепловых расчетов;
- блок программы для автоматизации проектирования СДИПМ (БПАП), написанный на языке C#;
- программа построения таблиц поиска для блока вычисления оптимального вектора тока, написанная в среде *Matlab*.

БПАП позволяет рассчитывать математическую модель и модель конечных элементов, решать задачу оптимизации параметров генетическим алгоритмом, вычислять таблицы поиска оптимального вектора тока для микропроцессорного управления, создавать имитационные модели в *Matlab–Simulink*, рассчитывать ди-

намические характеристики при вращении ротора в различных режимах работы, рассчитывать графики искусственных механических характеристик двигателя, строить карты интенсивности потерь мощности, к.п.д., тока, напряжения, момента и т.д.

На рисунке 11 в качестве примера представлено окно изображения карт интенсивности к.п.д. двигателя, построенных БПАП.

На рисунке 12 представлены карты к.п.д. спроектированного СДИПМ, соответствующие заданному циклу движения. Рабочие точки изображены белыми кругами. Очевидно, что большинство времени двигатель работает в зонах с к.п.д. выше 91%.

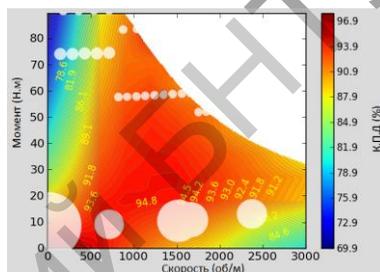
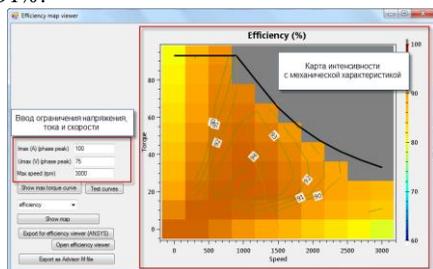


Рисунок 11. – Окно изображения карты интенсивности к.п.д. **Рисунок 12.** – Карты к.п.д. и рабочие точки спроектированного СДИПМ

Проведены экспериментальные исследования на физической модели электропривода с СДИПМ, в результате которых получены осциллограммы переходных характеристик при пуске двигателя от 0 до номинальной скорости (0,5 максимальной скорости) и при ускорении от 0,5 до 0,8 максимальной скорости, кривые токов $i_d(t)$, $i_q(t)$ и напряжений $u_d(t)$, $u_q(t)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика построения тяговой характеристики электромобиля, отличающаяся возможностью определения минимальной необходимой мощности тягового электродвигателя, обеспечивающей движение электромобиля по заданному стандартному циклу [2–А].

2. Получена эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами, отличающаяся учетом насыщения стали зубцов и ярма статора и позволяющая решить две задачи: определить магнитный поток, рабочую точку магнита при известной конструкции ротора и статора; определить требуемые размеры магнитов по заданному значению магнитного потока и заданным размерам ротора и статора двигателя [1–А].

3. Разработана методика расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции в координатах ABC и dq на основе замещения реального ротора с инкорпорированными постоянными магнитами эквивалентным явнополюсным ротором, обеспечивающая точность до 11% по сравнению с методом конечных элементов [3–А].

4. Разработана методика автоматизированного проектирования синхронных двигателей с инкорпорированными постоянными магнитами на основе генетического алгоритма оптимизации параметров, позволяющая рассмотреть множество вариантов конструкций ротора двигателя и значительно сократить время проектирования [4–А].

5. Осуществлен синтез и сравнительный анализ показателей качества микропроцессорной системы векторного управления с использованием трех вариантов регуляторов тока: ПИ–регулятора; регулятора тока с конечным временем регулирования с желаемой передаточной функцией; регулятора тока с конечным временем регулирования с прогнозированием тока, в результате которого установлено, что для микропроцессорной реализации ТЭП с СДИПМ наилучшими показателями качества обладает регулятор тока с конечным временем регулирования и прогнозированием тока с перерегулированием тока, не превышающим 0,42% и временем регулирования 1,5 мс [5–А].

6. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизации проектирования СДИПМ, включающее в себя алгоритмы и компьютерные программы оптимизации параметров, расчета таблиц поиска оптимального вектора тока для обеспечения микропроцессорной реализации системы автоматического управления электромобиля, расчета и анализа рабочих характеристик, позволяющее повысить точность и сократить время проектирования [4–А, 7–А, 13–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Методика определения тяговой характеристики электромобиля может быть использована на предприятиях электротехнической промышленности и в проектных организациях для расчета тяговой характеристики электрических транспортных средств для обеспечения движения по заданному стандартному циклу с минимальной необходимой мощностью.

2. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами с учетом насыщения стали зубцов и ярма статора и методика расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции в координатах АВС и dq могут быть использованы для предварительного проектирования СДИПМ.

3. Алгоритмическое и программное обеспечение для автоматизации проектирования СДИПМ, включающее в себя методику оптимизации параметров, позволяет повысить точность и сократить время проектирования, осуществить расчет и анализ рабочих характеристик СДИПМ, расчет таблиц поиска оптимального вектора тока для обеспечения микропроцессорной реализации системы автоматического управления электромобиля.

4. Для практической реализации системы автоматического управления электромобиля наиболее целесообразно применение регулятора тока с конечным временем регулирования и прогнозированием тока.

5. В дальнейшем ПАПД может быть доработано и использоваться для автоматизации проектирования не только СДИПМ, но и других видов двигателей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК Беларуси

1–А. Нго, Фьонг Ле. Эквивалентная схема магнитной цепи синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами / Фьонг Ле Нго, Г. И. Гульков // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2015. – № 4. – С. 13 – 24.

2–А. Фьонг Ле, Нго, Гульков Г. И. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электромобиля = Calculation of a Mechanical Characteristic of Electric Traction Motor of Electric Vehicle / Нго Фьонг Ле, Г. И. Гульков // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2017. – № 1. – С. 41 – 53.

3–А. Нго, Фьонг Ле. Расчет индуктивностей синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами = Calculation of Inductance of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor / Фьонг Ле Нго // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2017. – № 2. – С. 133 – 146.

4–А. Нго Фьонг Ле. Генетический алгоритм для оптимизации проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами = Genetic algorithm in optimization design of interior permanent magnet synchronous motor / Нго Фьонг Ле // Системный анализ и прикладная информатика. – 2017. – № 1. – С. 42 – 48.

Материалы конференций и тезисы докладов

5–А. Гульков, Г. И. Микропроцессорное управление с синхронным двигателем с постоянными магнитами / Г. И. Гульков, **Нго Фьонг Ле** // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 11–й Международной научно–технической конференции. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2013. – С. 235.

6–А. Гульков, Г. И. Расчет магнитной цепи синхронного двигателя с тангенциально намагниченными магнитами / Г. И. Гульков, **Нго Фьонг Ле**, А. Л. Руденя // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 12–й Международной научно–технической конференции. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2014. – С. 228.

7–А. Нго Фьонг Ле. Автоматизация проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами / Нго Фьонг Ле // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13–й Международной научно–технической конференции. Т. 1. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 256.

8–А. Нго Фьонг Ле. Рекуперативное торможение синхронного двигателя с постоянными магнитами в электромобилях / Нго Фьонг Ле // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 14–й Международной научно–технической конференции. – Минск : БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 288.

9–А. Нго Фьонг Ле. Проектирование синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами / Нго Фьонг Ле // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино– и приборостроении: материалы 3–й Международной научно–практической конференции/редкол.: Пантелеенко Ф.И. (гл.ред.)[и др.] Минск: Бизнесофсет, 2015. – С. 79 – 80.

10–А. Нго Фьонг Ле. Автоматизация проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами / Нго Фьонг Ле // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино– и приборостроении: мате-

риалы 4-й Международной научно-практической конференции/редкол.: Пантелеенко Ф.И. (гл.ред.) [и др.] Минск: Бизнесофсет, 2016. – С. 82 – 83.

11-А. Нго Фьонг Ле. Расчет и изображение распределения магнитных потерь в синхронном двигателе с инкорпорированными постоянными магнитами (СДИПМ) методом конечных элементов / Нго Фьонг Ле // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы 5-й Международной научно-практической конференции/редкол.: Пантелеенко Ф.И. (гл.ред.) [и др.] Минск: Бизнесофсет, 2017. – С. 79 – 80.

12-А. Нго Фьонг Ле. Применение генетического алгоритма в оптимизации параметров синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами / Нго Фьонг Ле // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2016 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – С. 214 – 217.

13-А. Нго Фьонг Ле. Программное обеспечение для автоматизации проектирования синхронного двигателя с инкорпорированными магнитами / Нго Фьонг Ле, Гульков Г.И. // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : материалы XX Республиканской научной конференции студентов и аспирантов Т. 1, Гомель, 20–22 марта 2017 года. – С. 168.

РЭЗІЮМЭ

Нго Фыонг Ле

Цягавы электрапрывад з сінхронным рухавіком з пастаяннымі магнітамі

Ключавыя словы: цягавы электрапрывад, сінхронны рухавік, пастаянны магніт, праектаванне, генетычны алгарытм, мікрапрацэсарнае кіраванне, сінтэз рэгулятараў.

Мэта працы: Павышэнне эфектыўнасці цягавага электрапрывада электрамабіля.

Аб'ект даследавання: сінхронны рухавік з інкарпарыраванымі пастаяннымі магнітамі.

Прадмет даследавання: методыкі праектавання цягавага электрапрывада з СДИПМ

Метады даследавання: сістэмны аналіз, палажэнні тэорыі электрапрывада і электрычных машын, метады сучаснай тэорыі аўтаматычнага кіравання, метады аптымізацыі параметраў электрычных машын, метады імітацыйнага мадэлявання.

Атрыманя вынікі:

- распрацавана методыка пабудовы цягавае характарыстыкі электрамабіля;
- атрыманы матэматычныя мадэлі магнітнага ланцуга і электрычнага ланцуга сінхроннага рухавіка з інкарпарыраванымі пастаяннымі магнітамі;
- распрацавана методыка разліку уласных індуктыўнасцей і індуктыўнасцей ўзаемаіндукцыі на аснове замяшчэння рэальнага ротара эквівалентным явна полюсным ротарам;
- распрацавана методыка аўтаматызаванага праектавання сінхронных рухавікоў з інкарпарыраванымі пастаяннымі магнітамі на аснове генетычнага алгарытму аптымізацыі параметраў;
- ажыццёўлены сінтэз і параўнальны аналіз паказчыкаў якасці мікрапрацэсарнай сістэмы вектарнага кіравання з выкарыстаннем трох варыянтаў рэгулятараў току;
- распрацавана методыка атрымання табліц пошуку вылічэння аптымальнага вектара току для мікрапрацэсарнай рэалізацыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: атрыманя вынікі могуць быць выкарыстаны пры праектаванні цягавага электрапрывада электрычных транспартных сродкаў.

РЕЗЮМЕ

Нго Фьонг Ле

Тяговый электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами

Ключевые слова: тяговый электропривод, синхронный двигатель, постоянный магнит, проектирование, генетический алгоритм, микропроцессорное управление, синтез регуляторов.

Цель работы: Повышение эффективности тягового электропривода электромобиля.

Объект исследования: синхронный двигатель с инкорпорированными постоянными магнитами.

Предмет исследования: методики проектирования тягового электропривода с СДИПМ

Методы исследования: системный анализ, положения теории электропривода и электрических машин, методы современной теории автоматического управления, методы оптимизации параметров электрических машин, методы имитационного моделирования.

Полученные результаты:

- разработана методика построения тяговой характеристики электромобиля;
- получены математические модели магнитной цепи и электрической цепи синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами;
- разработана методика расчета собственных индуктивностей и индуктивностей взаимной индукции на основе замещения реального ротора эквивалентным явно-полусным ротором;
- разработана методика автоматизированного проектирования синхронных двигателей с инкорпорированными постоянными магнитами на основе генетического алгоритма оптимизации параметров;
- осуществлен синтез и сравнительный анализ показателей качества микропроцессорной системы векторного управления с использованием трех вариантов регуляторов тока;
- разработана методика получения таблиц поиска вычисления оптимального вектора тока для микропроцессорной реализации.

Рекомендации по использованию: полученные результаты могут быть использованы при проектировании тягового электропривода электрических транспортных средств.

SUMMARY

Ngo Phuong Le

Traction electric drive with permanent magnet synchronous motor

Keywords: electric drive, synchronous motor, permanent magnet, electric motor design, genetic algorithm, microcontroller control, regulator synthesis.

Work objective: Improve traction electric drive of electric car.

Research object: Permanent magnet synchronous motor

Research subject: Methods of designing traction electric drive with permanent magnet synchronous motor

Research methods: systematic analysis, theoretical propositions of electric drives and electric machines, methods of modern automatic control theory, methods of optimizing parameters, methods of imitation modeling.

Obtained results:

- a method to calculate required traction characteristic of transportation vehicles;
- mathematical models of magnetic circuit and electrical circuit of permanent magnet synchronous motor (PMSM);
- a method to calculate self inductances and mutual inductances by substituting real interior permanent magnet rotor with an equivalent salient rotor;
- a method to design PMSM by solving a multi-objective optimization problem using genetic algorithm;
- synthesis microprocessor control system and comparison quality indices of three current regulator variants.
- a method to obtain look-up table for optimal current vector calculation for microcontroller implementation.

Recommendation on application: obtained results can be used in electrical transportation vehicle projects with help of the software program to automate design PMSM that developed by author.

Научное издание

НГО

Фьонг Ле

**ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С
ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать 12.04.2018. формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,28. Уч.–изд. л. 1,00. Тираж 100. Заказ 316.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.