

На правах рукописи



Аль Махтури Фуад Шараф Ибрахим Ахмед

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С
БЕСКОНТАКТНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), на кафедре Робототехники и автоматизации производственных систем.

Научный руководитель:

кандидат технических наук, **Самохвалов Дмитрий Вадимович**, доцент кафедры Робототехники и автоматизации производственных процессов ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)».

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, **Козярук Анатолий Евтихиевич**, профессор кафедры Электроэнергетики и электромеханики Электромеханического факультета ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургского горного университета»;

кандидат технических наук, **Лукичев Дмитрий Вячеславович**, доцент кафедры Электротехники и прецизионных электромеханических систем ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО».

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ" (г. Москва)».

Защита диссертации состоится «24» ноября 2021 г. в 17:00 на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

Автореферат разослан «23» сентября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.238.05,
к.т.н., доцент



/Скакун А. Д./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) являются основным конкурентом вентильным двигателям и асинхронным электроприводам в области легкового электротранспорта. В качестве тяговых электроприводов (ТЭП) мощностью до 10 кВт БДПТ являются подходящим решением благодаря их высокой удельной мощности, дешевизне и наличию конструкций синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) с внешним или с внутренним ротором, что позволяет использовать прямой привод в виде мотор-колес. Простота конструкции БДПТ (сосредоточенная обмотка) упрощает и удешевляет технологию серийного производства.

Теоретическую базу для исследования электропривода с БДПТ заложили российские и зарубежные ученые, в том числе Н.П. Адволоткин, Н.И. Лебедев, А.А. Афанасьев, С.Г. Герман-Галкин, И.Е. Овчинников, J.C. Moreira, K.J. Binns.

Большой вклад в теорию ТЭП внесли И.С. Ефремов, А.П. Пролыгин, Ю.М. Андреев, T.D. Batzel, G. Pistoia и J. Lowry.

Анализ имеющихся работ показывает, что одной из самых актуальных проблем усовершенствования и модернизации ТЭП с БДПТ является повышение КПД.

Созданию и усовершенствованию систем управления (СУ) и повышению КПД электроприводов переменного тока посвящены труды А.С. Анучина, А.Е. Козярука, Ю.П. Коськина, М.В. Пронина, Г.Г. Соколовского, С.Е. Рывкина, В.А. Флоренцева, Д.В. Корельского, Д.В. Лукичева, В.К. Bose, R. Krishnan, P. Pillay, D. Todd, K. Hasse, F. Blaschke, P. Vas, S. Bouchiker, E. Kaliappan, K. Mohamed, J.H. Kang, D.H. Kim, L. Zhong, M.A. Rahman, M.N. Uddin.

Вопросам повышения КПД БДПТ посвящены публикации Г.Г. Соколовского, И.Е. Овчинникова, J.H. Kim, B.V. R. Kumar, M.N. Uddin, D. Todd, E. Kaliappan).

Задача повышения КПД особенно актуальна для БДПТ, работающих в составе ТЭП, питающихся от автономных источников постоянного тока (аккумуляторные батареи) из-за ограниченной емкости доступных накопителей электроэнергии.

Цель работы: Разработка и исследование способов повышения КПД тягового электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих методов повышения КПД электропривода с БДПТ.
2. Анализ источников (причин) энергетических потерь в системе «статический преобразователь (инвертор) – электрическая машина».
3. Разработка законов управления СДПМ, обеспечивающих минимизацию энергетических потерь в системе «инвертор-машина».
4. Разработка метода ШИМ, обеспечивающего минимизацию потерь за счет подавления высших гармоник токов статора БДПТ.
5. Создание испытательного стенда для исследования эффективности предложенных методов минимизации энергетических потерь.

Объект исследования: тяговый электропривод с бесконтактным двигателем постоянного тока малой мощности (до 10 кВт, наилегчайшая тяга).

Предмет исследования: методы повышения КПД тягового электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен метод определения потерь в БДПТ, отличающийся от известных учетом влияния времени нарастания напряжения t_{ru} на энергетические потери в системе «инвертор-машина».
2. Предложен метод управления, обеспечивающий минимизацию энергетических потерь тягового БДПТ, отличающийся от известных комбинацией изменения t_{ru} и частоты коммутации f_s полевых транзисторов силовой части БДПТ.
3. Предложен способ минимизации гармонических потерь в БДПТ, питаемого от трёхуровневого автономного инвертора напряжения, за счет применения ШИМ с оптимизированной частотой коммутации (Switching Frequency Optimal, SFO-PWM).
4. Разработана математическая модель БДПТ, нагружаемого асинхронным электроприводом с функцией управления моментом, используемым для бездатчикового управления моментом БДПТ.

Практическая ценность диссертационной работы состоит в следующем:

1. Предложен метод идентификации параметров математической модели БДПТ и ее верификации с помощью паспортных и экспериментальных данных.
2. Предложен способ создания нагрузочного стенда с бездатчиковым управлением моментом БДПТ, на основе асинхронного двигателя, питающегося от преобразователя частоты (ПЧ) с функцией управления моментом.
3. Разработана процедура проведения авто-настройки ПЧ для определения параметров асинхронного двигателя нагрузочного стенда. Разработан алгоритм перевода ПЧ в режим управления моментом.
4. Разработана методика проектирования коммутатора (статического преобразователя и блока управления) БДПТ с учетом процедуры оптимизации энергопотребления с помощью изменения параметров инвертора.

Методы исследования:

Для решения поставленных задач применялись такие теоретические методы исследования, как поиск, накопление и обработка научной информации, численное интегрирование, метод трапеций, теория электрических машин и электропривода, математический анализ, математическое моделирование, теория гармонического анализа и теория автоматического управления. Применялись такие экспериментальные методы исследования как основы теории случайных ошибок и методов оценки случайных погрешностей, методы графической обработки результатов измерений, оценка адекватности теоретических решений, элементы теории планирования эксперимента и вычислительный эксперимент.

Исследования базируются на теоретической электротехнике, теории цифровой обработки сигналов, алгебре логики. Применяются численные методы в виде пакетов программ SimInTech, Matlab/Simulink.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения потерь в БДПТ с учетом влияния времени нарастания напряжения на энергетические потери в системе «инвертор-машина».
2. Метод оптимизации энергетических потерь тягового БДПТ на основе изменения времени нарастания напряжения и частоты коммутации полевых транзисторов АИН.

3. Метод минимизации гармонических потерь в БДПТ, питаемом от трёхуровневого автономного инвертора напряжения за счет применения ШИМ с оптимизированной частотой коммутации (SFO-PWM).

4. Математическая модель БДПТ, нагружаемого асинхронным электроприводом с функцией управления моментом для бездатчикового управления моментом БДПТ.

Достоверность результатов подтверждена результатами моделирования, верификацией используемых математических моделей БДПТ с помощью паспортных данных и данных эксперимента, использованием апробированных библиотечных блоков среды визуального моделирования динамических систем Matlab/Simulink и корректным использованием математического аппарата.

Апробация

Основные положения диссертации и ее отдельные результаты обсуждались на ряде конференций, в том числе:

- 2018 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference 1-3 February 2018, St-Petersburg, Russia.
- 2019 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference 28-30 January 2019, St-Petersburg, Russia.
- 72-ая научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 5-12 февраля 2019, Санкт-Петербург.
- XXII International Conference on Soft Computing and Measurement (SCM'2019) 23-25 May 2019, St-Petersburg, Russia.
- IOP Conference Series: The Fourth Scientific Conference for Engineering and Postgraduate Research, 16-17 December 2019, Baghdad, Iraq.
- 2021 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. 2021, 26-27 January 2021, St-Petersburg, Russia.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления» паспорта специальности 05.09.03 электротехнические комплексы и системы.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, в т. ч. 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, и 5 включенных в международную базу цитирования Scopus (цитирование которых в 20 статьях зарубежных ученых обеспечило автору индекс Хирша, равный 3).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 172 наименований. Её содержание изложено на 146 страницах, включая 11 таблиц и 54 иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи и методы исследования, научная новизна, практическая значимость, достоверность и апробация результатов диссертации. Дана характеристика публикаций, структуры и объема работы.

В первой главе выполняется анализ источников энергетических потерь в тяговом электроприводе (ТЭП) с бесконтактным двигателем постоянного тока (БДПТ). Проведен обзор существующих методов повышения энергетической эффективности тягового электропривода с бесконтактным двигателем постоянного тока.

Анализ источников энергетических потерь в системе инвертор-машина показывает, что минимизация энергетических потерь в инверторе может привести к увеличению потерь в машине и наоборот – минимизация потерь в машине может дать увеличение потерь в инверторе, поэтому при разработке методов повышения КПД следует рассматривать комбинированные потери в системе "инвертор-машина".

Большинство существующих методов определения магнитных потерь в сердечнике основаны на использовании уравнения К. Штейнмеца (Charles P. Steinmetz), которое предназначено для определения потерь в электродвигателях с синусоидальным напряжением. Показатели степени в уравнении Штейнмеца существенно меняются при изменении частоты ШИМ и формы напряжения, от которых зависят основные механизмы потерь в сердечнике (гистерезис, классические вихревые токи и дополнительные вихревые токи). Для более точного определения потерь БДПТ в системе "инвертор-машина", необходимо учесть влияния частоты и формы напряжения ШИМ на магнитные потери.

Оптимизация параметров ТЭП с БДПТ, по критерию энергетических потерь, во многих работах проводится для фиксированной нагрузки. Однако при изменении нагрузки, потери могут значительно увеличиться. Поэтому при разработке методов оптимизации параметров БДПТ, по критерию энергетических потерь, необходимо учитывать диапазон изменения нагрузки.

Во второй главе предложены методы идентификации параметров и верификации математической модели БДПТ с помощью паспортных данных и данных эксперимента.

Рассмотрены методы вычисления коэффициента ЭДС, коэффициента момента и амплитуды потокосцепления. Эти параметры используются как входные параметры математической модели БДПТ.

Коэффициент ЭДС определяется из данных опыта холостого хода (рисунок 1, n_0 – скорость холостого хода). Это возможно при принятии допущения о том, что на холостом ходу напряжение V_0 на зажимах двигателя примерно равно ЭДС E .

Коэффициент момента БДПТ C_t определяется из режима максимального КПД (рисунок 1), при принятии допущения о том, что ток статора в этом режиме равен проекции тока статора на ось q , $I_s \approx i_{sq}$. Данное допущение вполне оправдано, поскольку в режиме максимального КПД потери в стали минимальны и проекция тока статора по главной магнитной оси d создает потери в стали. На блок-схеме используются обозначения: T – момент нагрузки, I_s – ток статора в режиме максимального КПД, C_t – коэффициент момента, p – число пар полюсов, m – число фаз.

Для верификации математической модели удобно использовать динамические характеристики и сравнивать их характерные точки с паспортными данными. С помощью переходного процесса по скорости, установившееся значение сравниваем с паспортным (в номинальном режиме), как показано на рисунке 2.

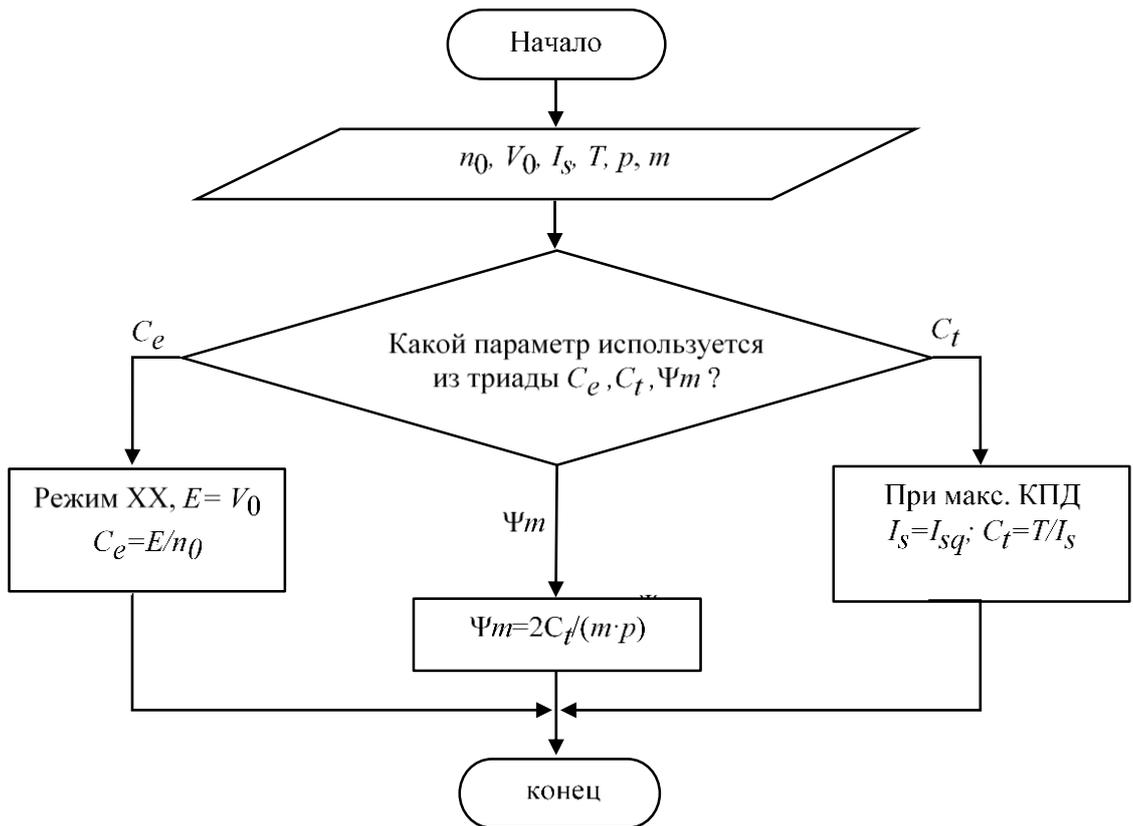


Рисунок 1. Методика идентификации коэффициентов математической модели БДПТ.

Зная темп нарастания скорости, мы можем поверить электромеханическую постоянную времени τ_m , при допущении, что мгновенное значение скорости изменяется по апериодическому закону первого порядка.

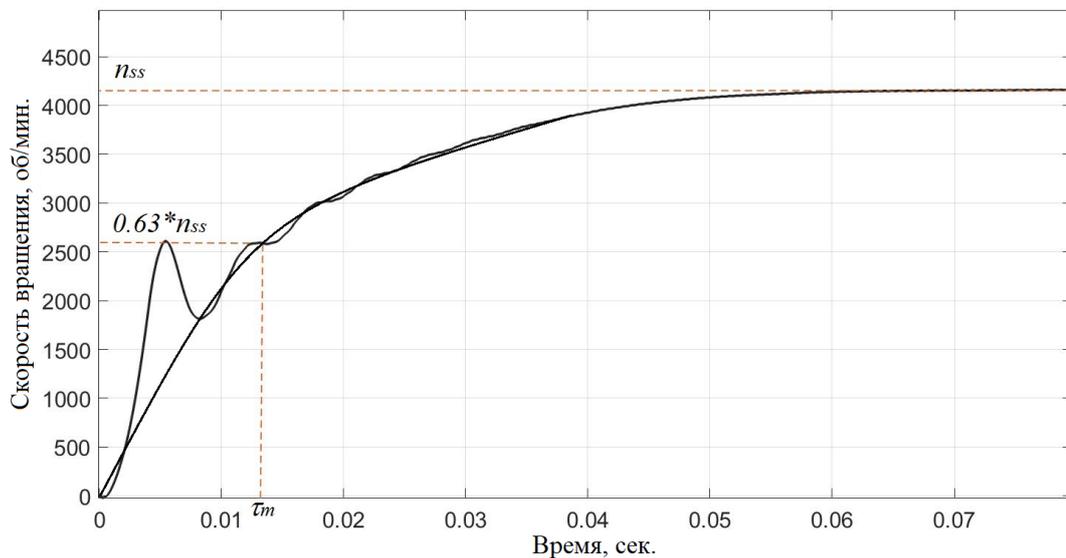


Рисунок 2. Определение τ_m по переходному процессу по скорости.

С помощью переходного процесса по току можно, аналогичным образом определить электромагнитную постоянную времени.

Переходным процессом по току для БДПТ является первый импульс тока после пуска БДПТ при неподвижном роторе. Для того, чтобы при пуске осуществить имитацию фиксации ротора в неподвижном состоянии необходимо при математическом моделировании значительно увеличить значение момента инерции. При этом затягивается процесс разгона и значительно уменьшается величина противо-ЭДС в момент пуска.

Для верификации модели также сравниваются характерные точки статических характеристик, полученных при моделировании, с паспортными данными. При номинальном напряжении, частота ХХ должна совпадать с паспортной. Также желательна проверка корректности математической модели и схемы, составленной в Simulink, с помощью анализа значения частоты пульсаций момента или скорости.

Когда число пар полюсов равно 1, за один электрический оборот датчик положения ротора принимает 6 состояний. При этом положение вектора магнитного потока ротора непрерывно изменяется, поскольку ротор вращается. Таким образом, имеет место периодическое изменение положения вектора МДС статора относительно вектора потока ротора. Число пульсаций электромагнитного момента многополюсного двигателя за один оборот ротора равно bp . Для верификации частота пульсаций момента, полученная моделированием, сравнивается с расчетной частотой f пульсаций момента, равной $f = p \cdot n / 10$, где p – число пар полюсов; n – скорость вращения в об/мин. Таким образом для верификации модели удобно проводить сравнение характерных точек статических и динамических характеристик, полученных при моделировании в Simulink, с паспортными данными двигателя и с результатами расчетов.

В третьей главе выполняется исследование зависимости комбинированных потерь (КП, сумма потерь в инверторе и машине) от времени нарастания напряжения и частоты коммутации. Исследование выполнено с целью определения оптимальных значений t_{ru} и f_s , при которых КП минимальны. Пренебрегая потерями, вызванными токами утечки транзисторов в закрытом состоянии и потерями в диоде в момент включения транзистора, потери в автономном инверторе напряжения определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 P_{VSI} &= 2(P_{CM} + P_{CD} + (E_{onM} + E_{offM} + E_{onD}) \cdot f_s) = \\
 &= 2 \left(U_{DS_off} \cdot I_d \cdot \frac{(t_{ri} + t_{fu}) + (t_{ru} + t_{fi})}{2} + Q_{rr} \cdot U_{DS_off} + \frac{1}{4} Q_{rr} \cdot U_{Drr} \right) f_s + \\
 &+ 2\pi^2 (R_{Dson} \cdot I_d^2 + R_D \cdot I_d^2) \cdot \left(\frac{1}{8} + \frac{m_a \cdot \cos \phi}{3\pi} \right) + 2\pi u_{D0} \cdot I_d \cdot \left(\frac{1}{2\pi} - \frac{m_a \cdot \cos \phi}{8} \right),
 \end{aligned} \quad (1)$$

где P_{CM} – статические потери полевого транзистора, I_d – ток стока, m_a – индекс модуляции, ϕ – угол сдвига между током и напряжением, P_{CD} – статические потери встречно-параллельного диода (ВПД), u_{D0} – напряжение на концах диода при нулевом токе, R_D – сопротивление ВПД в открытом состоянии, U_{DS_off} – напряжение между стоком и истоком в закрытом состоянии транзистора, t_{ri} – время нарастания тока, t_{fu} – время спада напряжения сток-исток, Q_{rr} – заряд обратного восстановления диода, t_{ru} – время нарастания напряжения сток-исток, t_{fi} – время спада тока стока, E_{onD} – энергия обратного восстановления диода, $U_{Drr} \approx U_{DS_off}$ – напряжение диода во время обратного восстановления.

Несинусоидальное напряжение, полученное с помощью ШИМ (учитывая время нарастания), может быть представлено с помощью кусочно-линейной модели. Зависимость плотности потока в сердечнике от напряжения на концах обмотки для определенного временного интервала можно описать следующим образом:

$$B(t) = \frac{1}{NA} \int V(t) dt, \quad (2)$$

где, N – число витков обмотки статора, A – площадь поперечного сечения сердечника.

При увеличении t_{ru} , уменьшается площадь трапеции (интеграл от функции напряжения), следовательно, уменьшается плотность магнитного потока. Магнитные

потери в сердечнике изменяются в соответствии с изменением плотности магнитного потока. Потери в сердечнике БДПТ, с учетом трапецеидальной формы и времени нарастания напряжения, определяются следующим образом:

$$P_{core} = k_e (B_0 f_s)^2 \frac{D - (4t_{ru} f_s / 3)}{D^2} + k_{ex} (B_0 f_s)^{3/2} \frac{D - (6t_{ru} f_s / 5)}{D^{3/2}} + P_h, \quad (3)$$

где, B_0 – пиковое значение плотности потока в сердечнике, k_e , k_{ex} , k_h , α – постоянные величины, зависящие от типа и свойств материала сердечника, D – коэффициент заполнения, t_{ru} – время нарастания напряжения, f_s – частота коммутации.

При анализе зависимости комбинированных потерь (КП), используется сопротивление затвора R_g вместо t_{ru} , поскольку в реальном объекте изменение временных интервалов, в коммутационных переходных процессах, осуществляется за счёт изменения паразитных емкостей и/или R_g в цепи управления полевым транзистором. Рисунок 3 показывает зависимость КП от R_g и частоты коммутации при различных значениях тока стока.

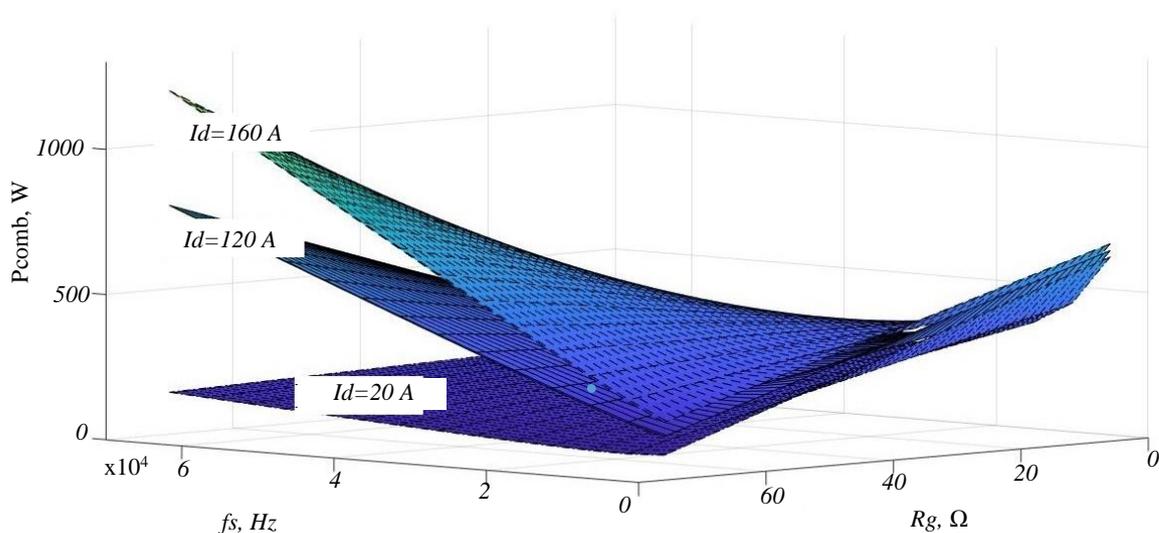


Рисунок 3. Зависимость КП (P_{comb}) от R_g и f_s , $I_d = \text{var}$.

Оптимальная частота ШИМ обычно определяется по критерию электромагнитной постоянной времени, и пульсации тока. Эффект увеличения f_s на уменьшения пульсации уменьшается при больших значениях f_s , а коммутационные потери в инверторе продолжают расти. Зависимость КП от тока стока и R_g для различных значений f_s показана на рисунке 4.

Пересечения различных значений f_s образует параболическую форму, слева от которой потери увеличиваются с увеличением R_g , поскольку в этой области доминирующими являются потери в инверторе. Справа от параболы потери увеличиваются с уменьшением R_g , поскольку доминирующими являются потери в сердечнике статора. Скорость изменения КП при изменении t_{ru} имеет вид:

$$\frac{dP_{comb}}{dt_{ru}} = 2U_{DS_off} \cdot I_d \cdot f_s - \left(k_e (B_0 f_s)^2 \frac{4f_s}{3D^2} + k_{ex} (B_0 f_s)^{3/2} \frac{6f_s}{5D^{3/2}} \right), \quad (4)$$

На величину « dP_{comb}/dt_{ru} », влияют f_s и ток стока. Знак «-» во втором слагаемом указывает, что потери в стали уменьшаются при увеличении времени нарастания напряжения.

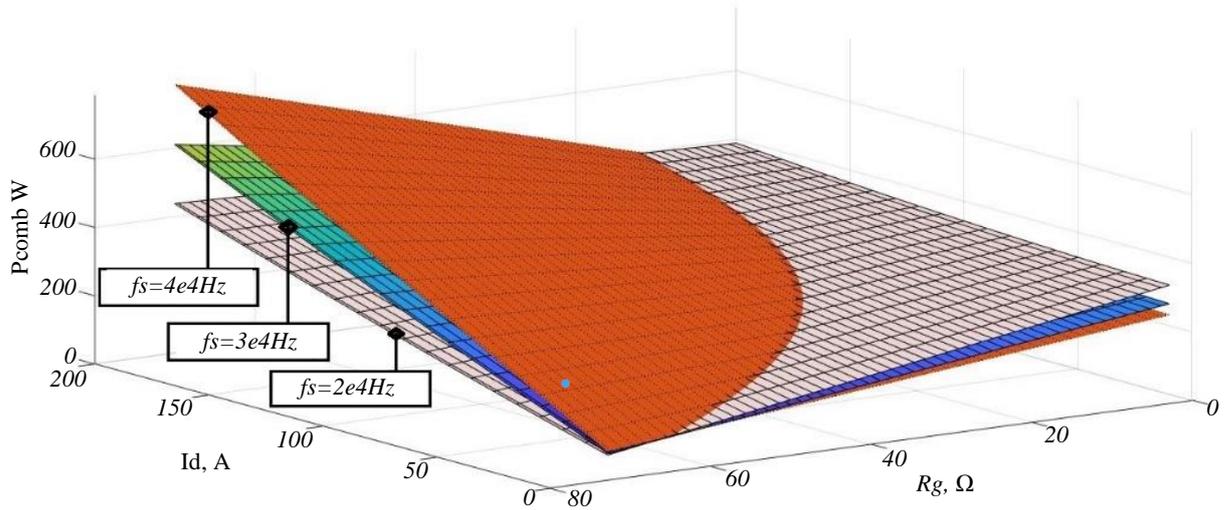


Рисунок 4. Зависимость P_{comb} от I_d и R_g , $f_s = \text{var}$.

Зависимость (dP_{comb}/dR_g) для различных значений тока стока показана на рисунке 5. Для больших нагрузок, минимизация потерь достигается за счет уменьшения R_g , а для малых нагрузок, минимизация потерь достигается за счет увеличения R_g .

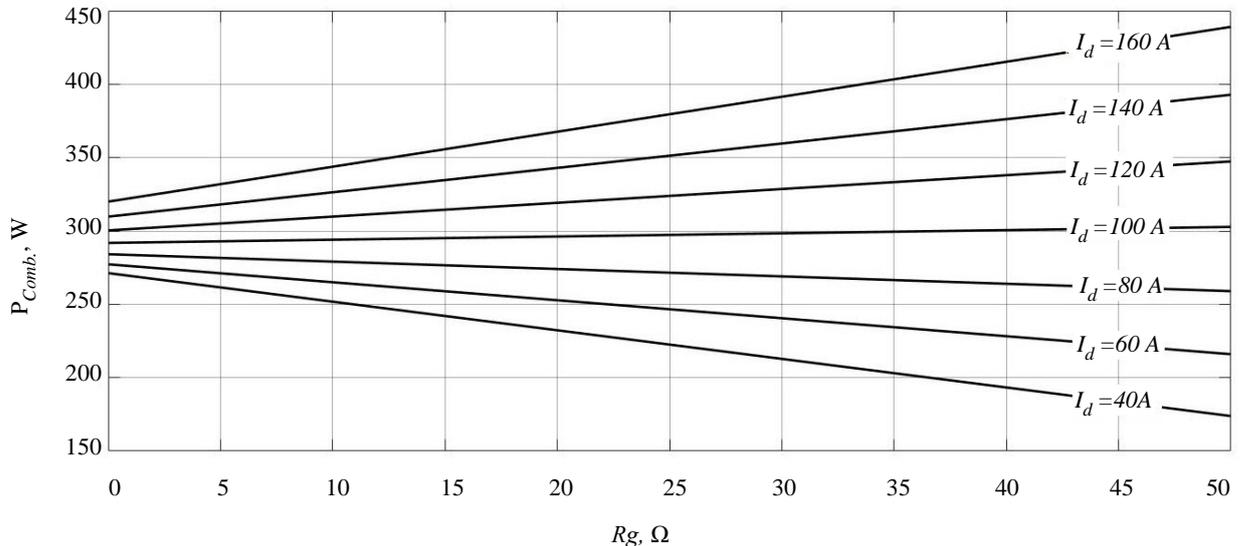


Рисунок 5. Зависимость P_{comb} от R_g , $I_d = \text{var}$.

Исходя из этого, для обеспечения минимизации потерь на всем диапазоне изменения нагрузки, предлагается изменение R_g . При проектировании цепей управления затворами полевых транзисторов принимается во внимание такие критерии, как защита полевых транзисторов от перегрузок при включении и от перенапряжений при выключении транзистора и коммутационные потери в инверторе.

На рисунке 6 показано влияние изменения t_{ru} на снижение КП. Выделена точка пересечения СЗ, соответствующая току стока, при котором $dP_{comb}/dR_g = 0$:

$$I_D^* = \frac{k_e (B_0 f_s)^2 \frac{4}{3D^2} + k_{ex} (B_0 f_s)^{3/2} \frac{6}{5D^{3/2}}}{2U_{DS_off}}. \quad (5)$$

В данной точке осуществляется изменение R_g . Слева от данной точки потери в сердечнике больше, поэтому уменьшается t_{ru} (большое R_g), а справа потери в инверторе больше, поэтому увеличивается t_{ru} (малое R_g).

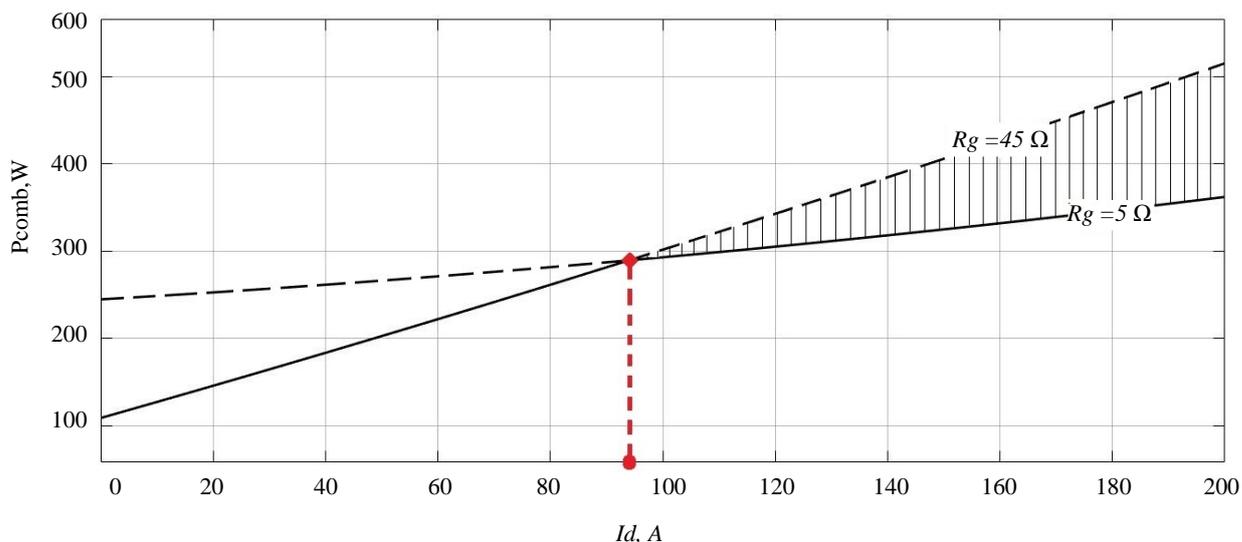


Рисунок 6. Влияние изменения R_g на комбинированные потери.

Заштрихованная область показывает область минимизации потерь. КП были минимизированы на 9.2% благодаря использованию метода изменения R_g .

Поскольку для каждого значения тока стока существует оптимальное значение частоты коммутации, то можно делить диапазон I_d на интервалы, для каждого из которых будет соответствующая оптимальная частота коммутации. Таким образом, кроме метода изменения R_g , минимизация комбинированных потерь достигается за счет изменения частоты коммутации, как показывает рисунок 7.

Выигрыш мощности, благодаря изменению f_s (в данном случае 4.6%), зависит от количества точек, в которых производится изменения f_s .

Для реализации предложенного метода минимизации КП изменением параметров инвертора, необходимо приспособить коммутатор к решению данной задачи. Выбор компонентов коммутатора осуществляется исходя из диапазона используемых частот и выбранных значений t_{ru} . На рисунок 8. показана методика проектирования коммутатора, приспособленный к реализации предложенных методов повышения КПД БДПТ.

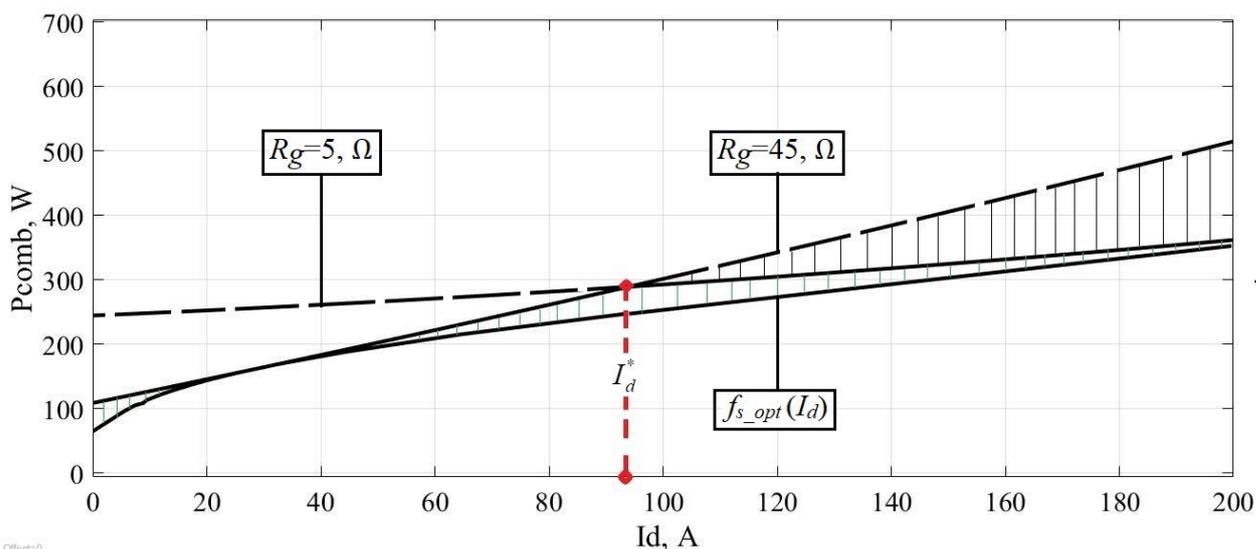


Рисунок 7. Влияние изменения R_g и задания оптимальной частоты $f_s = f_{s_opt}$ на комбинированные потери.

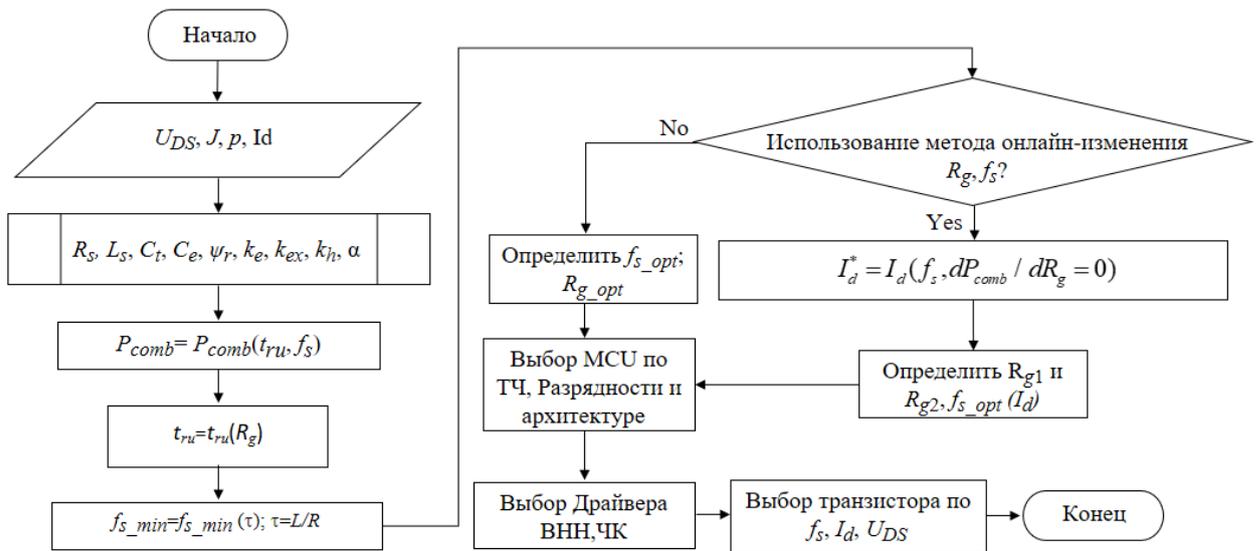


Рисунок 8. методика проектирования коммутатора

Использование трёхуровневых инверторов (ТУИ) в БДПТ позволяет минимизировать гармоническое искажение и минимизировать гармонические потери. Предложена схема управления ТУИ АИН на основе ШИМ с оптимизированной частотой коммутации SFO-PWM. Альтернативный метод ШИМ позволяет повысить коэффициент использования напряжения источника не изменяя диапазон модуляции. При использовании двух несущих сигналов для модуляции только два транзистора включаются за период выборки. Среднее значение частоты f_s транзисторов составляет половину частоты несущего сигнала, т.е. установленная несущая частота может быть в два раза больше максимально допустимой f_s транзистора.

Для получения сигнала модуляции, напряжение смещения нуля на выходе инвертора V_{offset} вычитается из каждого из отдельных фазных напряжений:

$$V_{offset} = \frac{\max(V_A, V_B, V_C) + \min(V_A, V_B, V_C)}{2}; \quad (6)$$

$$V_{AR} = V_A - V_{offset}; \quad V_{BR} = V_B - V_{offset}; \quad V_{CR} = V_C - V_{offset},$$

где, V_{NR} ($N=A, B, C$) – опорное напряжение на каждой фазе.

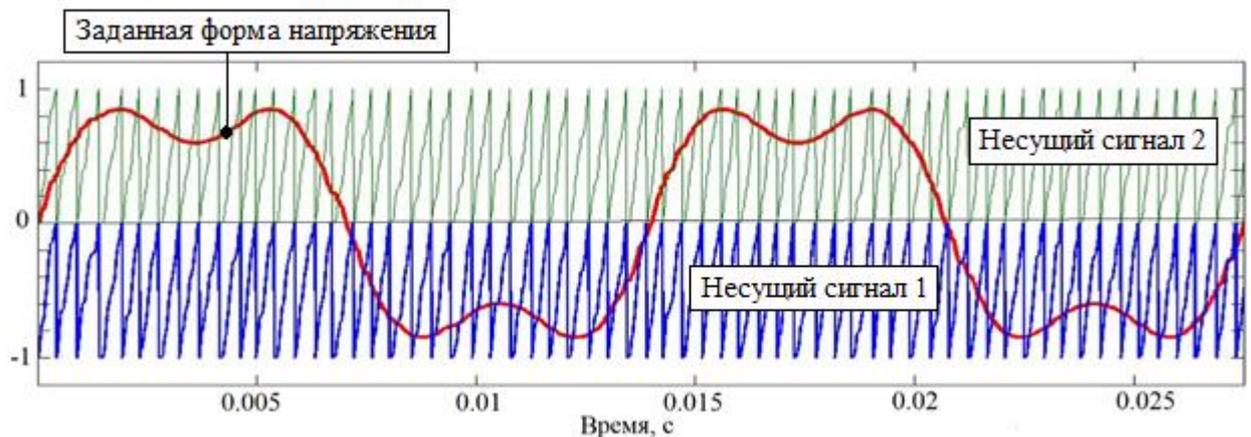


Рисунок 9. Несущие сигналы SFO-PWM и задание формы напряжения

На рисунке 9 представлены несущие сигналы ШИМ с оптимизированной частотой коммутации и заданная форма напряжения, в соответствии с которыми происходит генерация сигнала управления ключами ТУИ. Коэффициент гармонических искажений (КГИ) тока минимизирован от 29% до 14%, по сравнению с классической ШИМ. Уменьшена пятая гармоника на 8%, устранена седьмая гармоника.

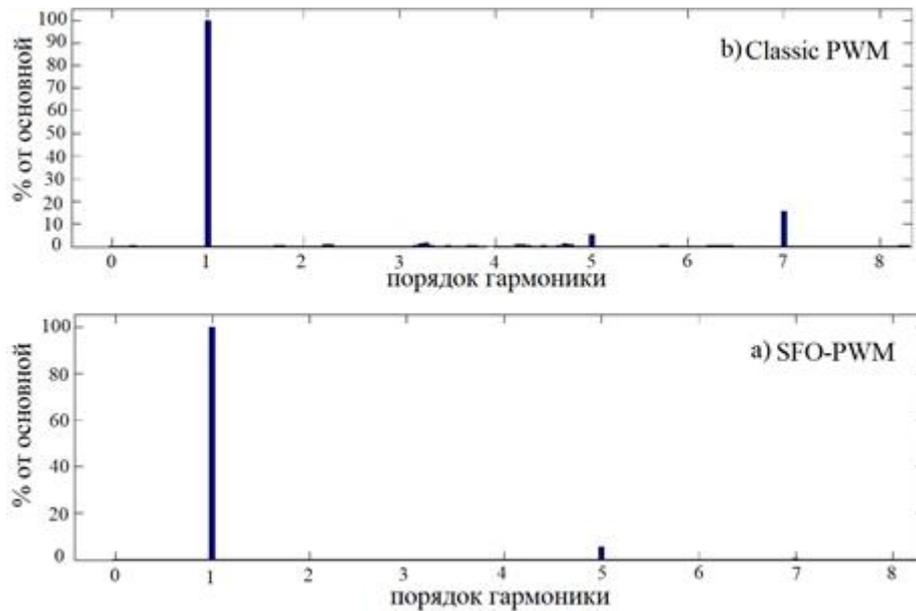


Рисунок 10. Амплитуды гармоник выходного тока инвертора (а) при SFO-PWM, (б) с классической PWM

Для определения КПД БДПТ при оценке эффективности различных методов управления двигателем необходимо измерение момента на валу.

В четвертой главе для решения задачи измерения момента БДПТ предлагается использовать асинхронный двигатель (АД), питающийся от преобразователя частоты (ПЧ) с векторным управлением, работающего в режиме управления моментом (РУМ). Разработана процедура проведения авто-настройки (АН) ПЧ и его перевода в РУМ.

Испытуемый БДПТ установлен на прочной раме, которая соединяется с рамой нагрузочного асинхронного двигателя (АД). Вал БДПТ соединяется с валом асинхронного двигателя с помощью фрикционной дисковой двусторонней муфты. Структурная схема экспериментальной установки показана на рисунке 11.

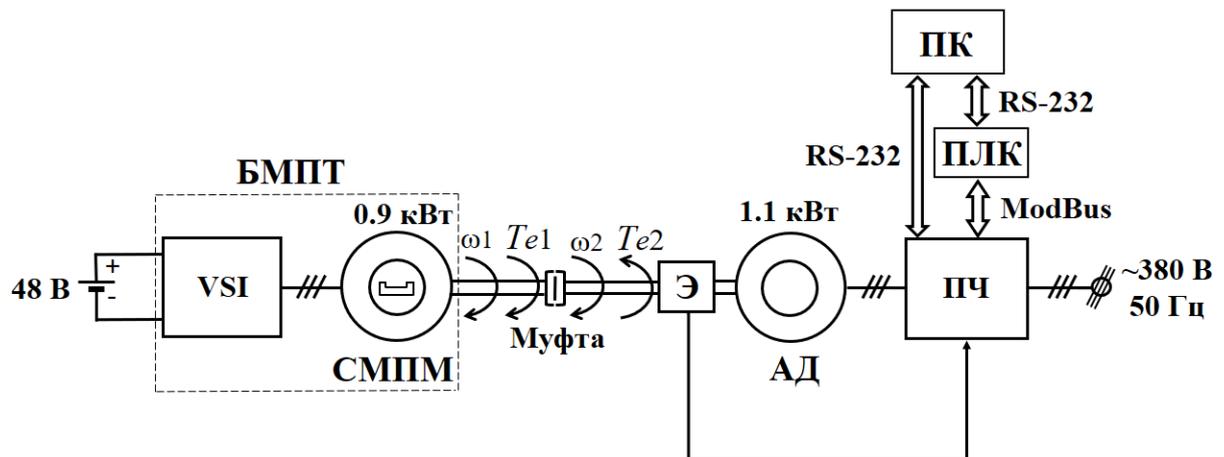


Рисунок 11. Структурная схема экспериментальной установки для исследования характеристик БДПТ.

Валы вращаются в одну сторону $\omega_1 = |\omega_2| = \omega$, а направления крутящих моментов, противоположны: $T_1 = -|T_2|$. Под действием момента нагрузки T_2 изменяется скорость вращения БДПТ, которая соответствует общей скорости системы:

$$\omega = \frac{1}{J_1 + J_2} \int (T_1 - T_2) dt, \quad (7)$$

где, T_1 – момент на валу БМПТ, T_2 – момент на валу АД, J_1, J_2 – суммарные моменты инерции ротора и вала БМПТ и АД, ω – общая механическая скорость вращения.

Перед переводом ПЧ в РУМ необходимо провести АН ПЧ с вращением вала АД или без вращения вала. При проведении АН с вращением вала необходимо убедиться в отсутствии нагрузки на валу. При проведении АН без вращения вала, точность определения параметров АД будет ниже.

Разработана процедура проведения автоматической настройки для определения параметров асинхронного двигателя. Разработана процедура перевода преобразователя частоты с векторным управлением в РУМ. Регулирование вращающего АД происходит с помощью задания момента на аналоговом входе ПЧ, при наличии опции векторного управления.

В соответствии с математическими описаниями БДПТ и АД, математическая модель БДПТ, нагружаемого АД, питающимся от ПЧ с функцией управления моментом, реализована в среде визуального моделирования динамических систем SimInTech. Полученные значения скорости БДПТ для разных значений моментов, задаваемых в ПЧ: от нулевого до пускового момента дают механическую характеристику, которая показана на рисунке 12.

Характерные точки: скорость ХХ, номинальная скорость и скорость при максимальном моменте используются для верификации результатов моделирования.

Исследуемая модель БМПТ, нагружаемой асинхронным электроприводом с функцией управления моментом подтверждает возможность и практичность использования метода бездатчикового управления моментом нагрузки для создания испытательного стенда в обстоятельствах недоступности дорогих датчиков момента.

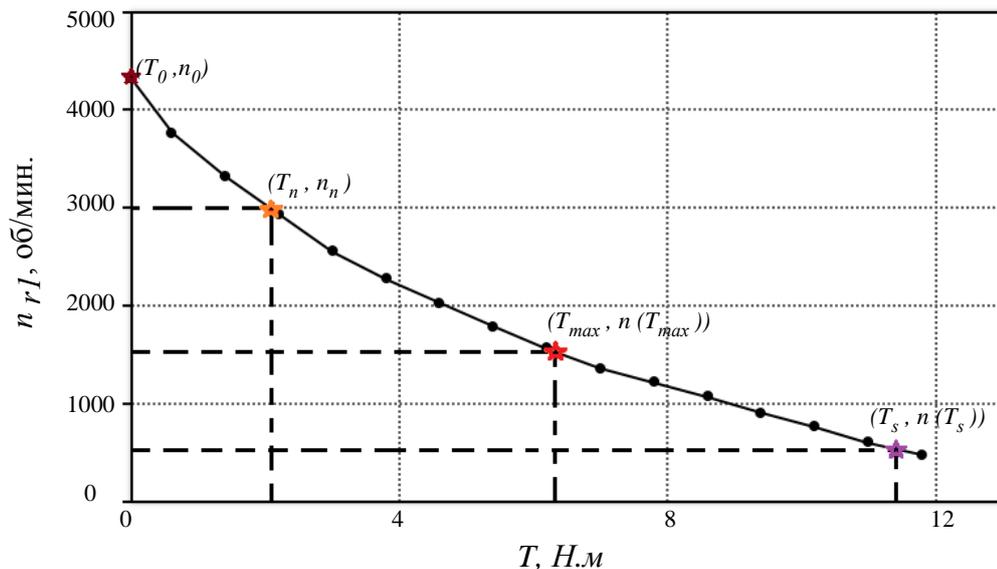


Рисунок 12. Механическая характеристика испытуемого БДПТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор существующих методов повышения КПД электропривода с БДПТ. Оптимизация параметров ТЭП с БДПТ, по критерию энергетических потерь, во многих работах проводится для фиксированной нагрузки. При изменении нагрузки потери могут значительно увеличиться, что необходимо учесть при разработке методов оптимизации.

2. Проведен анализ источников энергетических потерь в системе "инвертор-машина". Минимизация энергетических потерь в инверторе, может привести к увеличению

потерь в машине и наоборот, поэтому при разработке методов повышения КПД следует рассматривать комбинированные потери в системе «инвертор-машина».

3. Выполнено исследование зависимости комбинированных потерь (КП) от t_{ru} и от f_s , с целью определения оптимальных значений, при которых КП минимальны. КП, при больших нагрузках, увеличиваются с увеличением t_{ru} из-за того, что потери в инверторе доминируют. При небольших нагрузках КП уменьшается с увеличением t_{ru} , поскольку доминируют магнитные потери в сердечнике.

4. Предложен метод изменения времени нарастания напряжения t_{ru} и f_s , в соответствии с изменением нагрузки, для минимизации КП:

- Использование метода изменения t_{ru} , КП были минимизированы на 9.2%.
- Использование метода изменения t_{ru} и f_s , КП минимизированы на 13.8%.
- Получено уравнение для определения тока стока, при котором производится изменения t_{ru} и f_s .

5. Разработана методика проектирования коммутатора БДПТ с учетом процедуры оптимизации энергопотребления с помощью изменения параметров инвертора.

6. Предложена схема управления многоуровневого АИН на основе ШИМ с оптимизированной частотой коммутации (SFO-PWM), для минимизации гармонических потерь. Коэффициент гармонических искажений (THD) минимизирован от 29% до 14%, по сравнению с классической ШИМ. Уменьшена пятая гармоника на 8%, устранена седьмая гармоника.

7. Предложен способ идентификации параметров математической модели БДПТ с помощью паспортных и экспериментальных данных. Предложена методика верификации математической модели БДПТ с помощью паспортных данных и данных эксперимента.

8. Предложен нагрузочный стенд с бездатчиковым управлением моментом БДПТ для исследования методов повышения КПД БДПТ. В качестве нагрузочного используется асинхронный двигатель, питающийся от преобразователя частоты (ПЧ), работающего в режиме управления моментом. Разработана процедура проведения авто-настройки и алгоритм перевода ПЧ в режим управления моментом.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ИЗДАНИЯХ:

➤ Рекомендованных ВАК:

1. Аль Махтури Ф.Ш., Самохвалов Д. В., Джабер А. И., Татаринцев Н. И. Испытательный стенд для бездатчикового управления моментом нагрузки бесконтактной машины постоянного тока. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020 с 88-94.

2. Аль Махтури Ф.Ш., Самохвалов Д. В. Исследование характеристик бесконтактной машины постоянного тока при косвенном измерении момента нагрузки. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020.

3. Самохвалов Д.В., Джабер А.И., Аль Махтури Ф.Ш., Режим поддержания максимума мощности ветроустановки при векторном управлении синхронным генератором, «Электротехника» № 3/2021 с 47-53.

4. Джабер А. И., Аль-Махтури Ф. Ш., Самохвалов Д. В. Потери мощности в ветроустановке в режиме поддержания максимума мощности при векторном управлении синхронным генератором. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021, с 77-82.

➤ Включенных в международные базы цитирования

5. F. S. Al-Mahturi, D. V. Samokhvalov and V. M. Bida, "Parameters identification of a brushless DC motor by specification," 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 558-561.

6. D.V Samokhvalov, M.V. Bida, F.S Al-Mahturi. PMSM Vector Control techniques -A Survey // Proceedings of the 2018 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference 1-2 February 2018, St-Petersburg, Russia.
7. J. A. Prakosa, D. V. Samokhvalov, G. R. V. Ponce and F. Sh. Al-Mahturi, "Speed Control of Brushless DC Motor for Quad Copter Drone Ground Test," *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 644-648.
8. F. A. Mahturi and D. V. Samokhvalov, "Verification of the Mathematical Model of BLDC Motor in Simulink using Passport and Experimental Data," *2019 XXII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, St. Petersburg, Russia, 2019, pp. 208-210.
9. M. S. Hasan, F. S. Almakhturi, M. D. Albakhait, and A. I. Jaber. High Performance Rectifier/Multilevel Inverter Based BLDC Motor Drive with PI Controller/ // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering(2019 IOP)*. 22-23 December 2019, Baghdad, IRAQ.
10. F. S. Al-Mahturi, D. V. Samokhvalov, A. I. Jaber, D. M. Filatov and D. M. Filippov, "Sensorless Load Torque Control of BLDC Machine," *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 782-785.
11. A. I. Jaber, D. V. Samokhvalov, F. S. Al-Mahturi, D. M. Filippov and A. N. Kazak, "Power Losses Calculation in Wind Power Plant based on a Vector-Controlled Permanent Magnet Synchronous Generator," *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 917-921.
12. M. S. Hasan, M. D. Albakhait, A. M. F. Sharaf and A. I. Jaber, "Copper Losses Studying Using a New Real Time V/f Scalar Control Approach," *2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 2021, pp. 19-23,
13. Samokhvalov, D.V., Jaber, A.I. & Almahturi, F.S. Maximum Power Point Tracking of a Wind-Energy Conversion System by Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator. *Russ. Electr. Engin.* 92, 163–168 (2021).

➤ ***Другие статьи и материалы конференций:***

1. Аль Махтури Ф.Ш. Определение параметров бесконтактного двигателя постоянного тока по данным экспериментальных испытаний. 72-ая научно-технической конференции профессорско преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 5-12 апреля 2019, Санкт-Петербург, Россия.