

На правах рукописи



Паюк Любовь Анатольевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ МАШИНЫ
ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре электропривода и электрооборудования Энергетического института.

Научный руководитель: – доктор технических наук, доцент
Аристов Анатолий Владимирович

Официальные оппоненты: – доктор технических наук, профессор
Харламов Виктор Васильевич

– кандидат технических наук, доцент
Семыкина Ирина Юрьевна

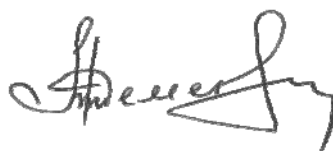
Ведущая организация: Обособленное подразделение "Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского университета систем управления и радиоэлектроники" НИИАЭМ ТУСУР, г. Томск.

Защита диссертации состоится 25 апреля 2012 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета в Д212.269.11 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, аудитория 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ.

Автореферат разослан « 23 » марта 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Безредукторный электропривод колебательного движения (ЭКД) переменного тока, в состав которого входит машина двойного питания (МДП), всё чаще и чаще применяется в современной промышленности.

К областям использования электропривода колебательного движения с машиной двойного питания относятся: вибровозбудители для транспортировки, сортировки и перемешивания готового сырья при производстве пластмасс; валогенераторные и гребные установки автономных судов; электроприводы с глубоким регулированием скорости, высокой перегрузочной способностью и обеспечением тяжелого пуска из стопорного режима, а так же колонковые электромеханические буровые снаряды с возвратно-вращательным движением коронки на базе погружного маслонаполненного асинхронного двигателя.

Вопросами разработки данного типа электрических машин занимаются ведущие организации и научные коллективы: НИИЭлектроприводов, МЭИ, ВНИИЭ, НИИ ГП "ХЭМЗ", ИТЦ «ЛаборКомплексСервис», и за рубежом фирмы «Siemens AG», «AEG», «Brown Boveri», «Mizubisi», «Toshiba», а компанией «Matsushita Electric Industrial Co» уже начат серийный выпуск бесконтактных асинхронизированных двигателей.

Общим вопросам теории машины двойного питания (МДП) посвящен ряд публикаций, как отечественных, так и зарубежных авторов. Огромный научный вклад в развитие этого направления, в плане создания современной теории МДП и основ их практического использования внесены Касьяновым В. Т., Загорским А. Е., Abdessemed, R. , R., Huang S., J. Shun, Xie G., Scian Ilario, Dorrell David G., Holik Piotr J. и многими другими российскими и зарубежными учеными. Следует отметить работы Г. Б. Онищенко и И.Л. Локтевой, которые разработали методику расчета и проектирования МДП, при работе ее в режиме однонаправленного движения, а также работы В. И. Луковникова, А. В. Аристова, Е. А. Шутова, С. А. Ткалича, Федотова В.М. по исследованию колебательных режимов работы электродвигателей переменного тока.

Не смотря на это, ряд теоретических и практических вопросов остаются до сих пор недостаточно изученными. Так, фактически не рассмотрены вопросы влияния геометрии машины двойного питания на статические и динамические характеристики электропривода колебательного движения при линейной фазовой модуляции. Отсутствуют инженерные методики расчета и оптимизации МДП при работе ее в режиме вынужденных колебаний, не даны практические рекомендации по обеспечению безударного пуска по моменту или току электропривода колебательного движения на заданную частоту колебаний. Отсутствие научно-обоснованных решений по данным вопросам существенно сдерживает дальнейшее внедрение ЭКД в различных отраслях народного хозяйства.

Таким образом, теоретические исследования влияния геометрии машины двойного питания на динамические свойства безредукторного электропривода колебательного движения, а также вопросы проектирования его являются актуальной задачей и имеют практическую ценность.

Объектом исследования является безредукторный электропривод колебательного движения, выполненный на базе машины двойного питания

Предметом исследования являются динамические показатели электропривода колебательного движения при амплитудно-фазовой модуляции питающих напряжений или токов.

Цель работы состоит в исследовании влияния геометрических размеров электрической машины двойного питания на динамические показатели электропривода колебательного движения и разработка на ее основе научно-обоснованных рекомендаций по их проектированию, настройке и промышленному применению.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть основные особенности и тенденции развития колебательных электроприводов с машиной двойного питания.
2. Провести анализ оценки динамических показателей электропривода колебательного движения.
3. Установить аналитическую взаимосвязь между геометрическими размерами машины двойного питания и её динамическими характеристиками.
4. Реализовать математические модели электропривода колебательного движения для исследования его динамических показателей.
5. Разработать методику оптимизации геометрических размеров исполнительного двигателя для анализа и синтеза по заданным динамическим показателям.
6. Разработать рекомендации по проектированию и эксплуатации ЭКД с улучшенными динамическими показателями.
7. Провести экспериментальные исследования с целью проверки адекватности математического описания ЭКД.

Методы исследования. В диссертационной работе применены: теория электрических машин, численные методы решения дифференциальных уравнений, математическое моделирование и программирование в средах MathCAD-14, Matlab-2007. Проверка результатов теоретических исследований осуществлялась экспериментальными методами.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность и достоверность научных выводов и результатов базируется на строгом использовании математического аппарата теории электрических машин, подтверждается моделированием на основе современных программных продуктов, качественным и количественным соответствием данных проведённых исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Установлена аналитическая зависимость геометрических размеров электрического двигателя и параметров электрической машины двойного питания при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы.
2. Определена аналитическая зависимость динамических показателей электропривода колебательного движения с геометрическими размерами электрического двигателя, включенного по схеме машины двойного питания, с учётом параметров источников питания и нагрузки.

3. Разработаны математические модели электроприводов периодического движения с учетом несимметрии параметров обмоток двигателя, вызванной разночастотным возмущением, позволяющие исследовать динамические и кинематические характеристики с учетом геометрии машины двойного питания при потенциальной и токовой фазовой модуляциях.

4. Разработана методика определения геометрических параметров электродвигателя колебательного движения, обеспечивающая минимум динамических показателей при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы.

Практическая ценность работы:

1. Разработана программа расчета позволяющая определять статические и динамические характеристики электропривода колебательного движения, выполненного на базе асинхронного двигателя или машины двойного питания при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы.

2. Найдено решение, защищенное патентом РФ на полезную модель «Электропривод колебательного движения», позволяющее расширить эксплуатационные возможности электропривода колебательного движения, работающего в режиме источника колебательного усилия путем улучшения качества воспроизводимых колебаний за счет устранения высокочастотных пульсаций в выходном спектре электромагнитного усилия.

3. Предложены практические рекомендации по оптимизации геометрических размеров машины двойного питания в составе электропривода колебательного движения с целью обеспечения требуемых динамических показателей.

Реализация результатов работы.

Основные результаты и экспериментальных исследований, выработанные рекомендации по проектированию и эксплуатации электроприводов колебательного движения с машиной двойного питания переданы для внедрения на ООО «Сибирская метанольная химическая компания» г. Томск, подразделение ОАО «Газпром», а так же в учебный процесс для подготовки магистрантов Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета по направлению 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» по дисциплине «Имитационное моделирование электромеханических систем».

Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие актов о внедрении.

Основные защищаемые положения:

1. Методика расчёта параметров электрической машины двойного питания в зависимости от её геометрических размеров.

2. Методика расчета динамических показателей электропривода колебательного движения с учетом геометрии машины двойного питания и способа возбуждения колебательного режима работы.

3. Методика оптимизации геометрии исполнительного двигателя ЭКД по заданным динамическим показателям при работе его в режиме вынужденных колебаний.

4. Рекомендации на основе численных результатов моделирования по проектированию, разработке и применению машины двойного питания в составе ЭКД с требуемыми динамическими показателями.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались на следующих конференциях: X Юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии», г. Томск, 2004–2011 гг.; международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2009 г, 2011 г; всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука, технологии и инновации», г. Новосибирск, 2011 г.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 12 научных работах, в том числе: 4 статья в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 патенте РФ на полезную модель.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 152 страницы машинописного текста, включая 60 рисунков, 9 таблиц, списка использованной литературы из 102 наименований и 1 приложения на 5 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе Рассмотрены основные существующие подходы и способы формирования колебательного режима работы электроприводов переменного тока, а так же определены области применения электродвигателей колебательного движения и технические требования, предъявляемые ими. В качестве динамических показателей данных электроприводов выделены ударные значения токов статора и ротора, а так же колебательного электромагнитного момента.

Отмечается, что в различных областях народного хозяйства, таких как машиностроение, химическая и текстильная промышленности, техника измерения, контроля и испытания требуются регулируемые по амплитуде и частоте как линейные, так и угловые колебания. Особую нишу здесь занимают электроприводы средней мощности, к которым предъявляются достаточно жесткие требования относительно их динамических показателей.

Перспективными с точки зрения обеспечения высоких динамических и энергетических показателей являются колебательные электроприводы переменного тока, выполненные на базе МДП, колебательный режим работы в которых реализуется за счет разночастотного питания.

Способность машин двойного питания работать с двойной синхронной скоростью при высоких энергетических показателях, простота доступности к регулированию электромагнитного момента за счет изменения функции регулирования по роторным обмоткам, возможность перехода от синхронного режима работы МДП к асинхронному – все это позволяет ожидать от МДП, при работе ее в режиме вынужденных колебаний, показателей, превышающих показатели серийно выпускаемых вибростендов.

Во второй главе составлено математическое описание МДП, как обобщенного электромеханического преобразователя энергии, работающего в режиме вынужденных колебаний.

Исходя из общей теории электромеханического преобразователя энергии были получены аналитические соотношения, устанавливающие взаимосвязь между параметрами электрической машины и ее геометрическими размерами для фазового способа возбуждения колебательного режима работы. В качестве варьируемых параметров для управляемых электродвигателей колебательного движения рекомендуется выбирать: внутренний диаметр расточки статора (D), длину магнитопровода (l_δ) и сечение эффективных проводников фаз обмоток статора ($q_{\text{эф1}}$) и ротора ($q_{\text{эф2}}$). Остальные параметры выражаются через них с учетом постоянных коэффициентов, присущих данному виду двигателя.

При фазовом способе возбуждения колебательного режима работы функции регулирования в собственных координатных осях имеют вид:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= U_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha); & U_2(t) &= U_{m2} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \beta); \\ U_3(t) &= U_{m3} \sin(\omega_1 t + \gamma); & U_4(t) &= U_{m4} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \varphi), \end{aligned}$$

где $U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}, U_{m4}$ – амплитудные значения питающих напряжений; $\alpha, \beta, \gamma, \varphi$ – начальные фазы напряжений на обмотках; ω_1, Ω – угловые частоты питающей сети и колебания ротора.

Тогда активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора по оси β определяются по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} r_{\beta s} &= \frac{1}{\omega_1 + \Omega} \left[A_1 \frac{1}{D q_{\text{эф1}}} + A_2 \frac{1}{l_\delta q_{\text{эф1}}} \right]; \\ r_{\beta r} &= \frac{1}{\omega_1 + \Omega} \left[A_3 \frac{(1 - \frac{2\delta}{D})^2}{(D - 2\delta) q_{\text{эф2}}} + A_4 \frac{(1 - \frac{2\delta}{D})^2}{l_\delta q_{\text{эф2}}} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где δ – величина воздушного зазора; коэффициенты $A_1 \div A_4$ зависящие от формы поля в воздушном зазоре МДП, коэффициента вытеснения тока по сечению, падения Э.Д.С. на обмотке и её конфигурации, а так же числа параллельных ветвей фазы обмотки и значения обмоточного коэффициента.

Активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора по другой оси записываются аналогично с той лишь разницей, что в данных выражениях не присутствует частота колебаний Ω .

Индуктивности рассеяния фазы обмотки статора по осям α и β определяются по выражениям:

$$L_{\sigma\beta s} = \frac{1}{(\omega_1 + \Omega)^2} A_5 \cdot \frac{1}{D^2 l_\delta} \sum \lambda_1; \quad (2)$$

$$L_{\sigma\beta r} = \frac{1}{(\omega_1 + \Omega)^2} A_5 \cdot \frac{\left(1 - \frac{2\delta}{D}\right)}{(D - 2\delta)^2 l_\delta} \sum \lambda_2,$$

где A_5, A_5' – коэффициенты пропорциональности, которые зависят от тех же параметров, что и активные сопротивления фаз обмоток МДП, кроме того в них учитываются число пар полюсов и количество пазов на полюс и фазу; $\sum \lambda_1, \sum \lambda_2$ – коэффициенты магнитной проводимости обмоток статора и ротора, учитывающие: пазовую, лобовую и дифференциальную составляющие, которые в свою очередь так же зависят от типа обмоток и геометрии электрической машины.

Полная взаимоиндуктивность записывается по формуле:

$$L_m = x_m \omega_1, \quad (3)$$

где x_m – сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора определяем по выражению:

$$x_m = \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{k_m}{D l_\delta},$$

где k_m – коэффициент, отражающий особенности электрической машины, который учитывает влияние ЭДС статора и формы поля асинхронного двигателя, насыщение магнитной цепи, параметры обмоток, а так же число фаз электрической машины.

Полученные выражения (1-3) связывают параметры электрической машины с её геометрией в явном виде и позволяют провести анализ данных параметров в зависимости от способа формирования колебательного режима работы МДП. При анализе полученных выражений было оценено влияние частоты колебаний ротора исполнительного двигателя Ω на параметры машины двойного питания (рис. 1).

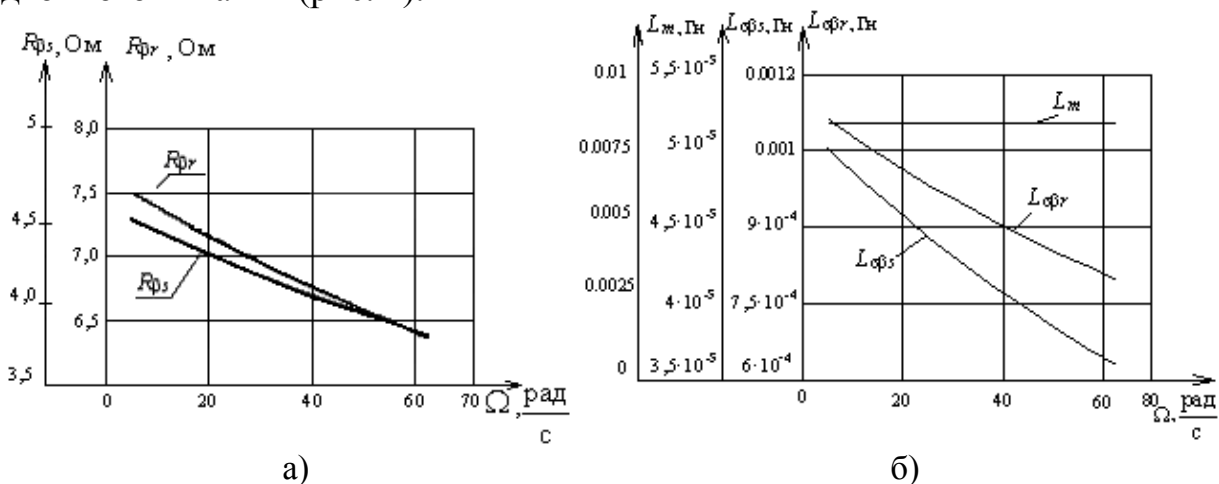


Рис. 1. Зависимости: а) активных сопротивлений обмоток; б) индуктивностей рассеяния обмоток статора $L_{\sigma\beta s}$ и ротора $L_{\sigma\beta r}$ и взаимоиндуктивности L_m по оси β от частоты колебаний ротора двигателя Ω

Результаты анализа показали, что с увеличением частоты колебаний подвижного элемента двигателя Ω активные сопротивления и индуктивности рассеяния статора и ротора по оси β уменьшаются: $R_{\beta s}$ и $R_{\beta r}$ на 16,6%, $L_{\sigma\beta s}$ – на 30,6%, а $L_{\sigma\beta r}$ – на 56,4%, соответственно. Величина взаимоиндуктивности остаётся при этом неизменной $L_m = \text{const}$.

Было установлено, что наибольшее влияние на параметры МДП, работающей в режиме вынужденных колебаний, оказывает изменение величин сечений эффективных чисел проводников фаз обмоток статора и ротора. При варьировании их значениями в пределах: $q_{\text{эф1}}$ от $1,08 \cdot 10^{-6}$ до $1,6 \cdot 10^{-6}$ [м²], $q_{\text{эф2}}$ $5,8 \cdot 10^{-7}$ до $6,7 \cdot 10^{-7}$ [м²] активные сопротивления фаз обмоток статора по осям α ($R_{\alpha s}$) и β ($R_{\beta s}$) уменьшаются на 20%. Так же наблюдается уменьшение активных сопротивлений ротора по осям α ($R_{\alpha r}$) и β ($R_{\beta r}$) на 3% и 4% соответственно. Полные индуктивные сопротивления фаз обмоток статора x_s и ротора x_r увеличиваются на 12% и 26% соответственно.

С целью оценки динамических показателей электропривода колебательного движения были получены для фазового способа возбуждения колебательного режима работы аналитические выражения пусковых токов в фазах обмоток статора и ротора и пускового колебательного электромагнитного момента при заторможенном вторичном элементе двигателя. В операторной форме система уравнений, с учетом выражений (1 – 3), после математических преобразований запишется в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 i_s(p) = U_m \cdot \left\{ \frac{[\gamma_2(R_{\beta r} + L_{\beta r}p) + \gamma_4 L_m p](\omega_2 \cos(\beta) - p \sin(\beta))}{(p^2 + (\omega_1 + \Omega)^2)(p^2(L_{\beta s}L_{\beta r} - L_m^2) + p(R_{\beta r}L_{\beta s} + R_{\beta s}L_{\beta r}) + R_{\beta s}R_{\beta r})} + \right. \\
 \left. + j \frac{[p\gamma_1(R_{\alpha r} + L_{\alpha r}p) - L_m\gamma_3 p](\omega_1 \cos(\alpha) - p \sin(\alpha))}{(p^2 + \omega_1^2)(p^2(L_{\alpha s}L_{\alpha r} + L_m^2) + p(R_{\alpha s}L_{\alpha r} + R_{\alpha r}L_{\alpha s}) + R_{\alpha s}R_{\alpha r})} \right\}; \\
 i_r(p) = U_m \cdot \left\{ \frac{[\gamma_4(R_{\beta s} + L_{\beta s}p) + \gamma_2 L_m p](\omega_2 \sin \beta - p \cos \beta)}{(p^2 + (\omega_1 + \Omega)^2)(p^2(L_{\beta s}L_{\beta r} - L_m^2) + p(R_{\beta r}L_{\beta s} + R_{\beta s}L_{\beta r}) + R_{\beta s}R_{\beta r})} + \right. \\
 \left. + j \frac{[p\gamma_1 L_m - \gamma_3(R_{\alpha s} + L_{\alpha s}p)p](\omega_1 \cos \alpha + p \sin \alpha)}{(p^2 + \omega_1^2)(p^2(L_{\beta s}L_{\beta r} + L_m^2) + p(R_{\beta r}L_{\beta s} + R_{\beta s}L_{\beta r}) + R_{\beta s}R_{\beta r})} \right\},
 \end{aligned} \quad (4)$$

где U_m , α , β – амплитудные значения и начальные фазы питающих напряжений, γ_i – коэффициент сигнала, $\omega_2 = \omega_1 + \Omega$, $i = 1..4$, p – оператор Лапласа.

С учётом корней характеристических уравнений функций регулирования значение пусковых токов МДП во временной области рассчитываются по выражениям:

$$I_{\alpha \text{ пуск}}(t) = I_{\alpha 0} \sin \left[\omega_1 t - \text{Arctg} \left[\frac{\omega_1 (L_{\alpha r} (\alpha_1 \alpha_2 - \omega_1^2) - R_{\alpha r} (\alpha_1 + \alpha_2))}{R_{\alpha r} (\alpha_1 \alpha_2 - \omega_1^2) + L_{\alpha r} (\alpha_1 + \alpha_2) \omega_1^2} \right] \right] + I_{\alpha 1} e^{-\alpha_1 t} + I_{\alpha 2} e^{-\alpha_2 t};$$

$$\begin{aligned}
I_{\beta\text{пуск}}(t) &= I_{\beta s0} \cos \left[\omega_2 t - \text{Arctg} \left[\frac{\omega_2 (L_{\beta r} \omega_2^2 (\alpha_3 + \alpha_4) - R_{\beta r} (\alpha_3 \alpha_4 - \omega_2^2))}{\omega_2^2 (R_{\beta r} (\alpha_3 + \alpha_4) + L_{\beta r} (\alpha_3 \alpha_4 - \omega_2^2))} \right] \right] + I_{\beta s1} e^{-\alpha_3 t} + I_{\beta s2} e^{-\alpha_4 t}; \\
I_{ar\text{пуск}}(t) &= I_{ar0} \sin \left[\omega_1 t - \text{Arctg} \left[\frac{\alpha_1 \alpha_2 - \omega_1^2}{\omega_1 (\alpha_1 + \alpha_2)} \right] \right] + I_{ar1} e^{-\alpha_1 t} + I_{ar2} e^{-\alpha_2 t}; \\
I_{\beta r\text{пуск}}(t) &= I_{\beta r0} \sin \left[\omega_2 t - \text{Arctg} \left[\frac{(\alpha_3 + \alpha_4) \omega_2^2}{\omega_2^2 - \alpha_3 \alpha_4} \right] \right] + I_{\beta r1} e^{-\alpha_3 t} + I_{\beta r2} e^{-\alpha_4 t},
\end{aligned} \tag{5}$$

где I_{as0} , $I_{\beta s0}$, I_{ar0} , $I_{\beta r0}$ – амплитудные значения вынужденных составляющих токов режима установившегося короткого замыкания, I_{as1} , I_{as2} , $I_{\beta s1}$, $I_{\beta s2}$, I_{ar1} , I_{ar2} , $I_{\beta r1}$, $I_{\beta r2}$ – модули свободных составляющих токов с коэффициентами затухания, соответственно α_i , выраженные через параметры электрической машины и функции регулирования как постоянные величины.

Колебательный пусковой электромагнитный момент при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы МДП описывается произведением токов вида (6) и может быть записан в следующем виде:

$$\begin{aligned}
M_{\text{пуск}}(t) &= M_{01} \cos[\Theta_4] \sin[\Theta_1] + M_{02} \cos[\Theta_2] \sin[\Theta_3] + M_1 \sin[\Theta_1] e^{-\alpha_3 t} + \\
&M_2 \sin[\Theta_1] e^{-\alpha_4 t} + M_3 \cos[\Theta_4] e^{-\alpha_1 t} + M_4 e^{-\alpha_1 t} + M_5 e^{-\alpha_2 t} + M_6 \cos[\Theta_4] e^{-\alpha_2 t} + \\
&+ M_7 e^{-\alpha_3 t} + M_8 e^{-\alpha_4 t} + M_9 \sin[\Theta_3] e^{-\alpha_3 t} + M_{10} \sin[\Theta_3] e^{-\alpha_4 t} + M_{11} \cos[\Theta_2] e^{-\alpha_1 t} + \\
&+ M_{12} e^{-\alpha_1 t} + M_{13} e^{-\alpha_2 t} + M_{14} \cos[\Theta_2] e^{-\alpha_1 t} + M_{15} e^{-\alpha_3 t} + M_{16} e^{-\alpha_4 t},
\end{aligned} \tag{6}$$

где M_{01} , M_{02} – амплитуды вынужденных составляющих электромагнитного момента, M_i – модуль свободных составляющих момента с коэффициентами затухания α_i и α_i , Θ_i – начальные фазы пускового колебательного электромагнитного момента.

Результаты расчёта показали, что наибольшее влияние на формирование ударного колебательного электромагнитного момента оказывают составляющие M_1 , M_2 , M_3 и M_4 , M_9 , M_{12} с коэффициентами затухания α_1 , α_3 , α_4 и их комбинация $(\alpha_1 + \alpha_3)$, поэтому в дальнейшем анализ пускового колебательного момента проводился по выражению:

$$\begin{aligned}
M_{\text{пуск}}(t) &= M_{01} \cos[\Theta_4] \sin[\Theta_1] + M_{02} \cos[\Theta_2] \sin[\Theta_3] + \\
&+ (M_1 \sin[\Theta_1] + M_9 \sin[\Theta_3]) e^{-\alpha_3 t} + M_2 \sin[\Theta_1] e^{-\alpha_4 t} + M_3 \cos[\Theta_4] e^{-\alpha_1 t} + (M_4 + M_{12}) e^{-\alpha_1 t}.
\end{aligned} \tag{7}$$

Несмотря на то, что коэффициенты затухания α_1 , α_2 , α_3 , α_4 зависят от скорости вращения исполнительного двигателя, расчёт пусковых характеристик с учётом выражений (5, 7) при условии постоянства коэффициентов затухания даёт адекватные результаты, и ошибка расчёта не превышает 10,2 %, что соответствует инженерным методикам расчёта.

На основании анализа выражений (5, 7) было установлено, что наибольшее влияние на значения динамических показателей МДП в составе ЭКД оказывают выбор размеров внутреннего диаметра расточки статора D и сечения эффективного числа проводников фаз обмоток статора $q_{\text{эф1}}$ и ротора $q_{\text{эф2}}$ (рис. 2). Так, увеличение внутреннего диаметра расточки статора D и сечения

эффективного числа проводников фаз обмоток статора $q_{\text{эф1}}$ и в заданных пределах приводит к увеличению ударных значений токов статора и ротора в среднем на 5–10%, и уменьшению значений ударного колебательного электромагнитного момента – на 10–15%, а при изменении – $q_{\text{эф2}}$, динамические показатели ЭКД напротив уменьшаются – на 10–18%.

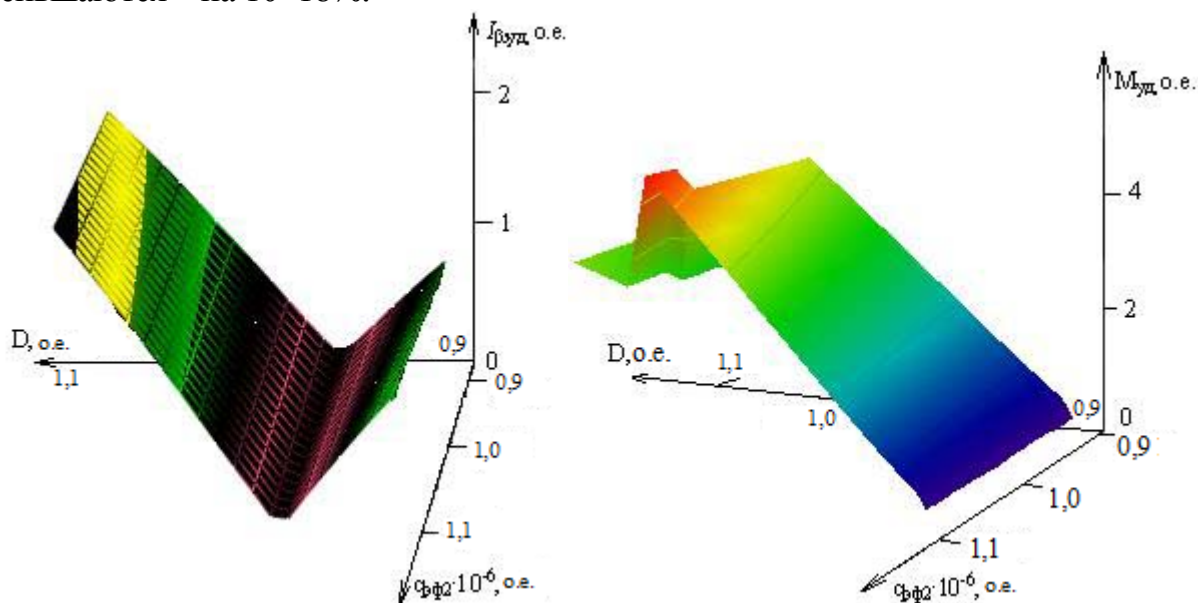


Рис. 2. Области распределения ударных значений: а) тока статора по оси β и б) колебательного электромагнитного момента при $q_{\text{эф2}} = \text{var}$, $D = \text{var}$, $l_\delta = \text{const}$, $q_{\text{эф1}} = \text{const}$ и $\Omega = 31,4$ рад/с

На основании анализа свободных составляющих пусковых токов и колебательного электромагнитного момента были определены условия и рекомендации по обеспечению безударного пуска машины двойного питания при колебательном режиме её работы за счет выбора начальных фаз питающих напряжений. Так с учётом выражений (5 и 7) были рассчитаны начальные фазы питающих напряжений, которые обеспечивают безударный пуск:

$$\text{– по току: } \alpha = \text{Arctg}\left(\frac{\omega_1}{\alpha_1}\right), \beta = \text{Arctg}\left(\frac{-\omega_2}{\alpha_3}\right); \quad (8)$$

$$\text{– по моменту: } \alpha = \text{Arctg}\left(\frac{\omega_1}{\alpha_2}\right), \beta = \text{Arctg}\left(\frac{-\omega_2}{\alpha_4}\right). \quad (9)$$

Анализ выражений (8) и (9) показал, что отличие безударного пуска по току от безударного пуска по моменту при колебательном режиме работы МДП заключается только в разности значений начальных фаз питающих напряжений, которые в первом случае определяются коэффициентами затухания α_1, α_3 , а во втором – α_2, α_4 .

В третьей главе были разработаны математические модели ЭКД, при питании обмоток двигателя от источников напряжения или тока с использованием метода Эйлера, реализованные в прикладном математическом пакете MathCAD-14. Расчеты проводились для МДП, выполненной на базе исполнительного двигателя МТН–011–6У1, имеющего следующие

геометрические размеры: $D=0,132$ [м]; $l_{\delta}=0,075$ [м]; $q_{\text{эф1}}=1,14 \cdot 10^{-6}$ [м²]; $q_{\text{эф2}}=5,675 \cdot 10^{-7}$ [м²].

Все величины входящие в модели были представлены в относительных единицах, что позволяет распространить результаты исследований и на другие виды МДП. Кроме того, при расчетах уравнение низкочастотного колебательного движения, устанавливающее взаимосвязь между нагрузочной диаграммой исполнительного двигателя и колебательным электромагнитным моментом, было представлено в виде:

$$M_{\text{эм}}(t) = L_{\text{мех}} \frac{d^2 \chi}{dt^2} + R_{\text{мех}} \frac{d\chi}{dt} + C_{\text{мех}} \chi,$$

где χ – координата подвижного элемента двигателя, $L_{\text{мех}}$, $R_{\text{мех}}$, $C_{\text{мех}}$ – коэффициенты инерционного, демпфирующего и позиционного усилия нагрузки.

Анализ результатов моделирования позволил установить, что при изменении внутреннего диаметра расточки статора D , сечений эффективного числа проводников фаз обмоток статора $q_{\text{эф1}}$ и ротора в пределах от 0,9 до 1,1 [о.е.] относительно своих базовых размеров, наблюдаются точки экстремума ударных значений токов статора $I_{\alpha\text{суд}}$ и ротора $I_{\beta\text{руд}}$, что объясняется резким возрастанием значений свободных составляющих типа $I_{\alpha\text{с}} \cdot e^{-\alpha_2 t}$ и $I_{\beta\text{р}} \cdot e^{-\alpha_3 t}$, которые формируют амплитуды ударных значений данных токов. Так, увеличение внутреннего диаметра расточки статора D в заданных пределах приводит к тому, что $I_{\omega\text{уд}}$ увеличивается на 2%, а $I_{\beta\text{руд}}$ – на 2,5%, как для режимов МДП, так и АД.

Наибольшее влияние на ударные значения тока статора и колебательного электромагнитного момента оказывает увеличение сечения эффективного числа проводников фазы обмотки статора $q_{\text{эф1}}$. Первые увеличиваются на 6%, а вторые на 9%, соответственно.

Увеличение $q_{\text{эф2}}$ в заданных пределах приводит к уменьшению ударных значений колебательного электромагнитного момента для МДП на 9,6% и для режима АД – 20%. При этом, ударные значения токов статора по оси α при работе в режиме МДП $I_{\alpha\text{суд}}$ уменьшаются на 11%, а для АД, напротив, увеличиваются на 6,5%.

При питании обмоток двигателя от источников тока и изменении варьируемых параметров в заданных пределах, точек экстремума не наблюдается, и изменение динамических показателей происходит практически по линейному закону. На основании анализа влияния геометрических размеров электрической машины на динамические характеристики ЭКД можно сделать вывод о том, что при потенциальном питании наибольшее влияние оказывают изменения внутреннего диаметра расточки статора D , сечения эффективного числа проводников фазы статора $q_{\text{эф1}}$ и $q_{\text{эф2}}$ ротора обмоток исполнительного двигателя, а при токовом – длины магнитопровода l_{δ} .

С целью обеспечения заданных динамических показателей (ударного тока или момента) электропривода колебательного движения на базе метода градиентного спуска был разработан алгоритм оптимизации геометрических размеров МДП.

Алгоритм расчета можно разбить на ряд следующих этапов. Предварительно производится расчёт параметров ЭМ (блок 3.2) и её динамических показателей (блок 3.3). Далее определяются лимитирующие

показатели, шаг приращения Δ и ошибка расчета ε (блок 3.4). В блоке 3.5 выбираются произвольное начальное приближение параметров из условия, что функция в заданном диапазоне должна быть непрерывной и матрица вторых производных – положительна (блоки 3.6 и 3.7).

При выполнении условия 3.7 рассчитывается градиент по искомой величине исходя из выбранных варьируемых переменных, например, длине магнитопровода и внутреннего диаметра расточки статора:

$$DI_{\alpha s}(D, l_{\delta}) = \sqrt{\left(\frac{dI_{\alpha s}(D, l_{\delta})}{dD}\right)^2 + \left(\frac{dI_{\alpha s}(D, l_{\delta})}{dl_{\delta}}\right)^2}$$

и определяется область допустимого его распределения, соответствующая max или min целевой функции.

Если же условие 3.7 не выполняется, то происходит возврат к блоку 3.2 и корректируются параметры электрической машины. Далее, полученные значения сравниваются с требуемыми, если они соответствуют им или меньше, то выводится результат в виде массива данных. При не выполнении условия блока 3.12 происходит коррекция параметров электрической машины.

В соответствии с рассмотренным алгоритмом были проведены расчеты по определению оптимальных значений геометрических размеров МДП (рис. 4–6). Величины шага итерации и ошибки вычисления составили, соответственно, $\Delta=0,01$, $\varepsilon=0,001$.

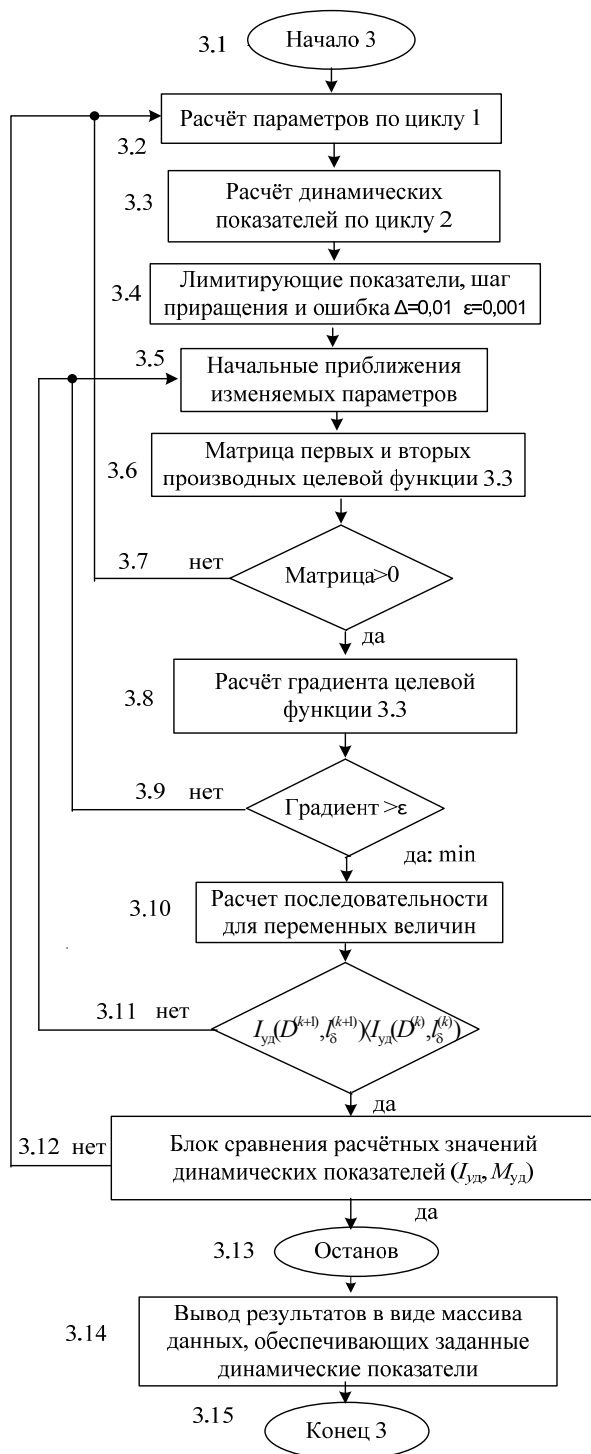


Рис.3. Структурная схема алгоритма оптимизации

Расчетные и заданные плоскости приведены на рис. 4–6, пересечение которых определяет всю гамму сочетаний двух выбранных геометрических размеров, обеспечивающих заданные динамические показатели. При расчетах

массивы заданных значений (плоскости 2) формировались перемножением номинального тока статора (электромагнитного момента) на соответствующие коэффициенты перегрузки, выступающие в данном случае как эксплуатационно-технические лимитирующие показатели.

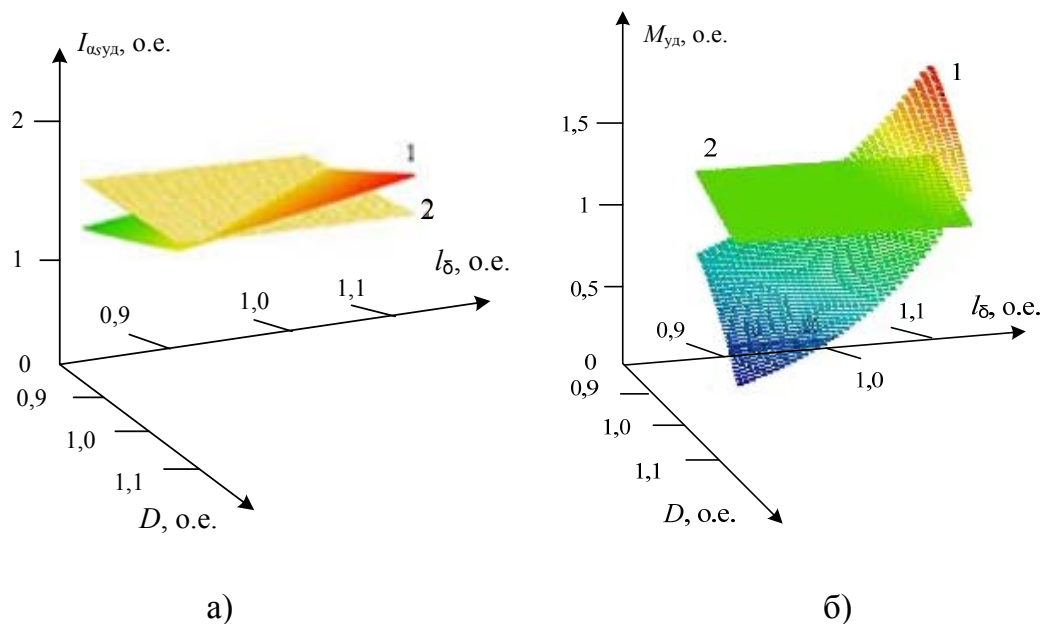


Рис. 4. Области распределения: а) ударного тока статора по оси α , б) пускового электромагнитного момента: 1 – определенные методом градиентного спуска; 2 – массивы требуемых значений тока и момента

Массив заданных значений (рис. 4. плоскость 2) формируется перемножением номинального тока статора или электромагнитного момента на коэффициент перегрузки, который определяется из справочной литературы.

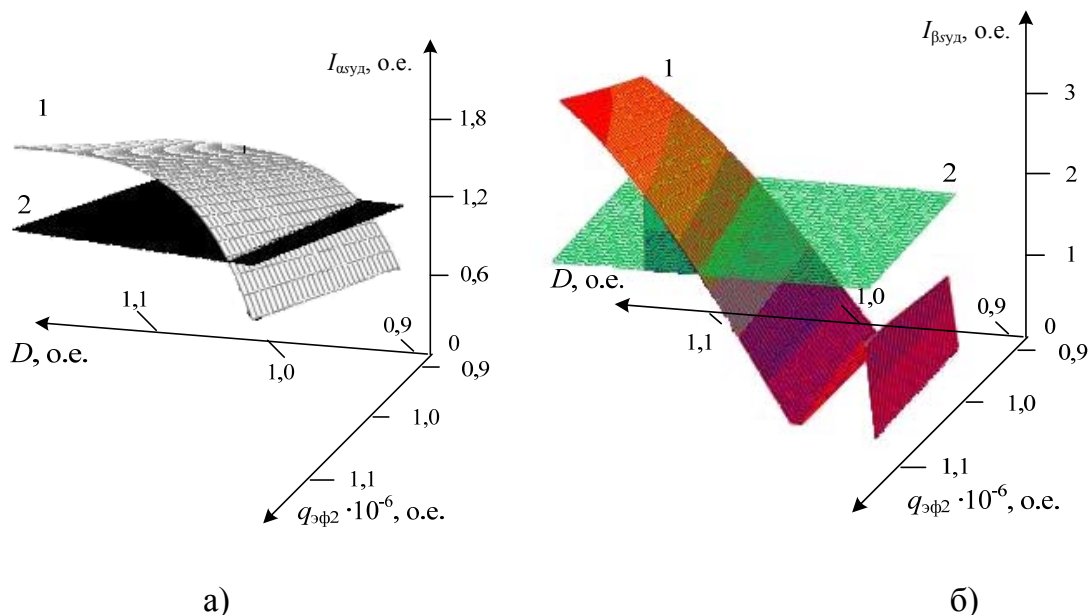


Рис. 5. Области распределения значений ударного тока статора: а) по оси α , б) – по β : 1 – определенные методом градиентного спуска; 2 – массивы требуемых значений тока и момента

Так при заданных допустимых значениях тока статора $I_{\text{пуск}}=1,25$ о.е. и колебательного электромагнитного момента двигателя $M_{\text{пуск}}=1,5$ о.е., общим

решением для выбранного типа двигателя явились: в первом случае значения внутреннего диаметра расточки статора (D) в диапазоне от 0,92 до 0,97 [о.е.], и длине магнитопровода ротора (l_δ) от 0,9 до 1,05 [о.е.], а во втором – от 0,92 до 0,1 [о.е.] и от 0,89 до 1,04 [о.е.].

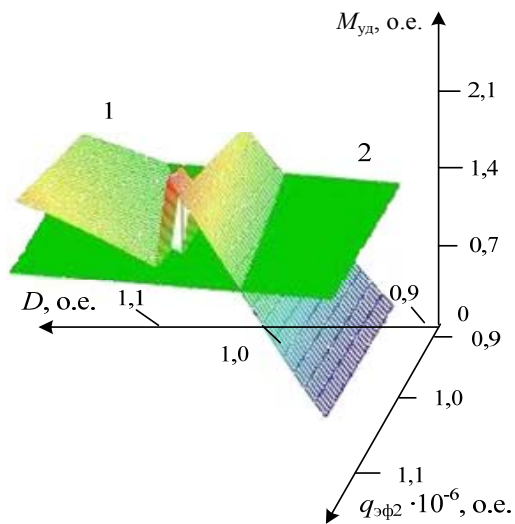


Рис. 5. Распределение зависимости ударного электромагнитного момента: 1 – определение максимума функции методом градиентного спуска; 2 – массивы требуемых значений

Установлено, что в зависимости от уровня допустимого значения ударного тока или момента возможно получение двух и более решений, удовлетворяющих требованиям поставленной задачи (рис. 4., б, и б). Последнее объясняется наличием точек экстремума в расчетных областях (плоскости 1).

Данная методика оптимизации позволяет определить оптимальные соотношения между геометрией электрической машины и динамическими

характеристиками электропривода колебательного движения с точность до 7%, что является допустимым при инженерных расчетах.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований макетного образца электропривода колебательного движения с машиной двойного питания. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 6.

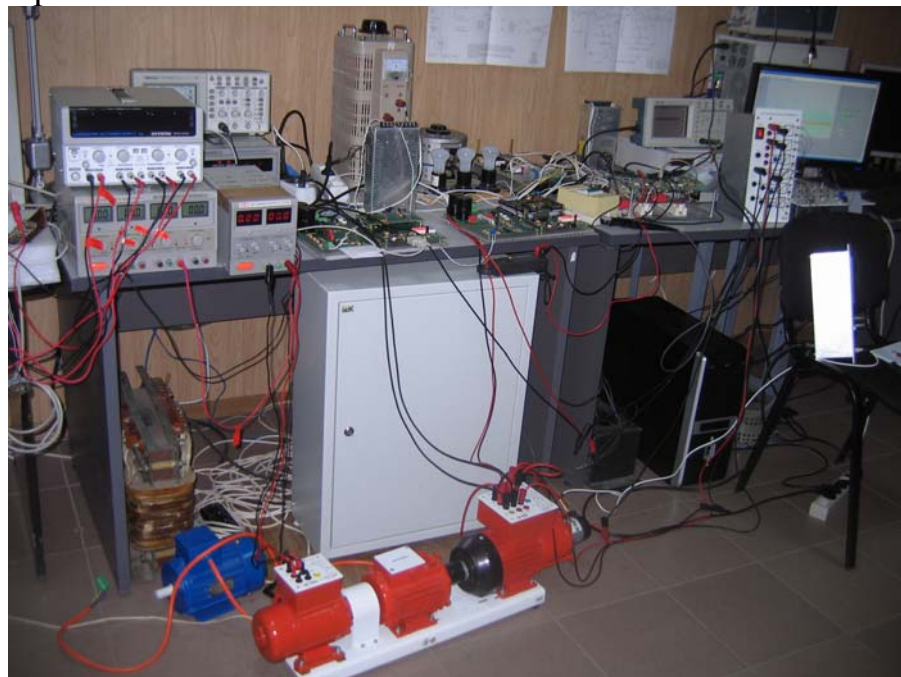


Рис. 6. Внешний вид экспериментальной установки

Она состоит из: системы управления статором и ротором МДП, реализованной на базе асинхронного двигателя с фазным ротором; блока датчиков (БД) с системой преобразования аналогового сигнала в цифровой; персонального компьютера со встроенной платой ввода-вывода данных.

В таблице 1. приведены геометрические параметры для двух вариантов испытуемого двигателя.

Таблица 1.

Двигатель МТН-011-6 (1)	Двигатель МТН-011-6 (2)
$l_{\delta n1}=0,075$ [м]	$l_{\delta n2}=0,075$ [м]
$D_{n1}=0,132$ [м]	$D_{n2}=0,132$ [м]
$q_{\text{эф}1н}=5,675 \cdot 10^{-7}$ [м ²]	$q_{\text{эф}12н}=5,17 \cdot 10^{-7}$ [м ²]
$q_{\text{эф}2н}=1,418 \cdot 10^{-6}$ [м ²]	$q_{\text{эф}22н}=1,2 \cdot 10^{-6}$ [м ²]

Исследования проводились при частотах колебания подвижного элемента привода: $\Omega_1=6,28$ рад/с, $\Omega_2=18,84$ рад/с, $\Omega_3=31,4$ рад/с, $\Omega_4=43,98$ рад/с для режимов МДП и АД.

На рис. 7–9 представлены результаты проведенных исследований.

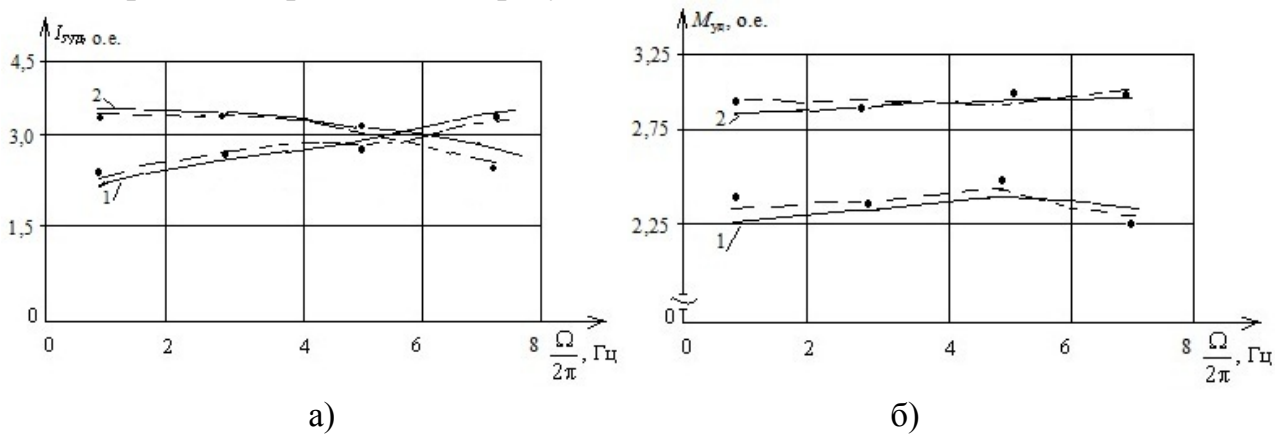


Рис. 7. Зависимости ударных значений: а) токов в фазе статора (1 – по оси α ; 2 – β) и б) колебательного электромагнитного момента (1 – режим МДП, 2 – режим АД) от частоты колебаний электропривода $\Omega/2\pi$ (--- – эксперимент, — – расчёт)

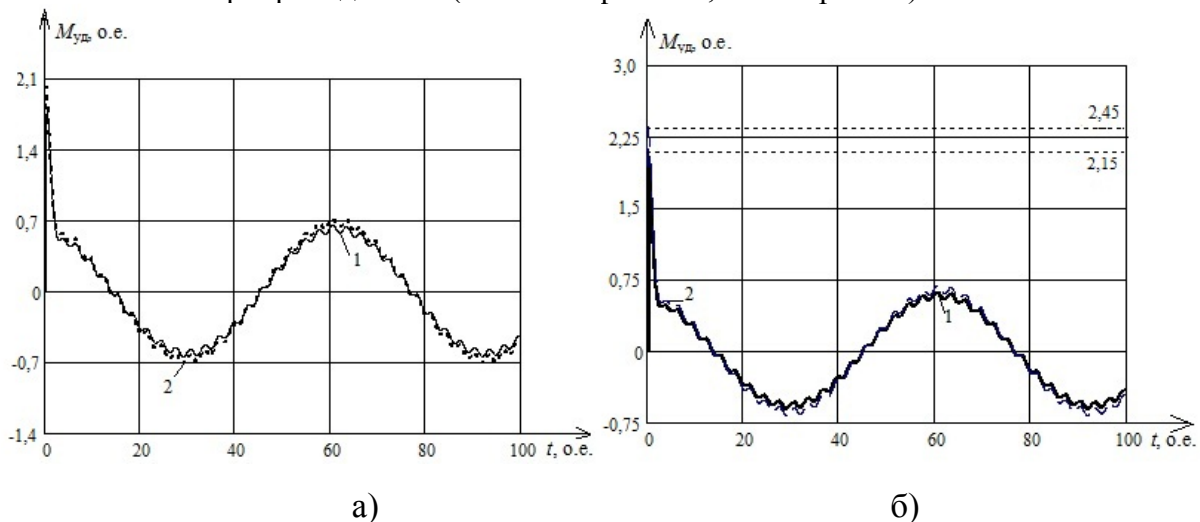


Рис.8. Временные зависимости колебательного электромагнитного момента МДП при частоте колебаний ротора $\Omega/2\pi=5$ Гц: а) вариант 1, б) вариант 2 (--- – эксперимент, — – расчёт)

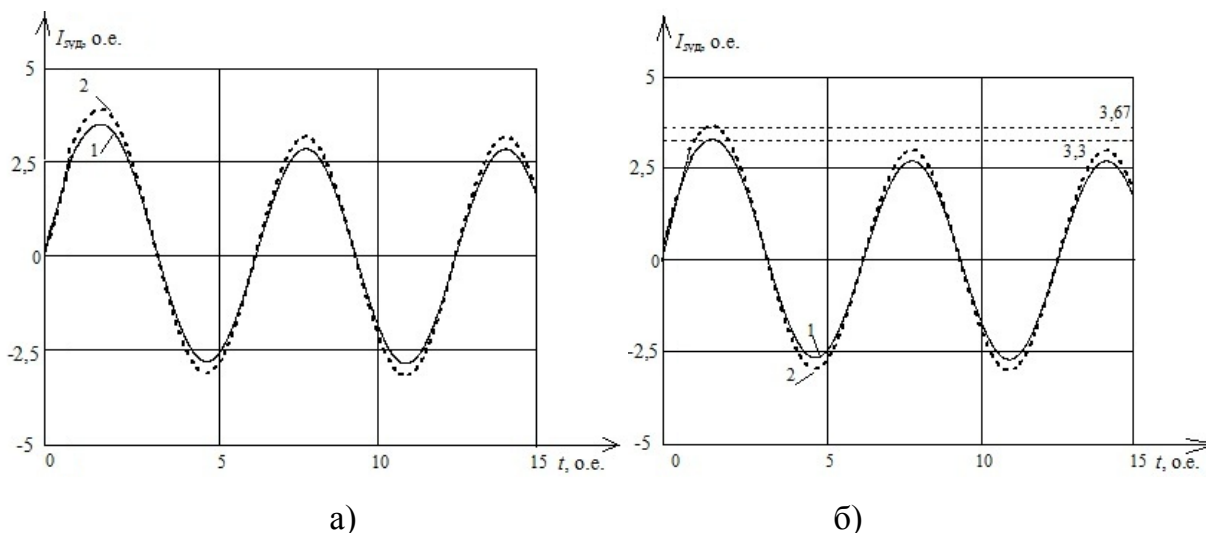


Рис. 9. Временные зависимости тока статора МДП при частоте колебаний ротора $\Omega/2\pi = 5$ Гц: а) вариант 1, б) вариант 2 (--- – эксперимент, — – расчёт)

Установлено, что для заданных величин геометрических параметров, расчётные значения ударного тока статора по оси α и колебательного электромагнитного момента составили: для варианта 1 – $I_{асудрасч1} = 3,45$ о.е., $M_{удрасч1} = 1,95$ о.е.; для варианта 2 – $I_{асудрасч2} = 3,3$ о.е., $M_{удрасч2} = 2,15$ о.е.

Анализ полученных экспериментальных и расчётных данных показал, что ошибка рассогласования не превышает 11%.

Экспериментально подтверждена возможность обеспечения безударного пуска по моменту либо току за счет выбора начальных фаз функций регулирования (рис.10-11).

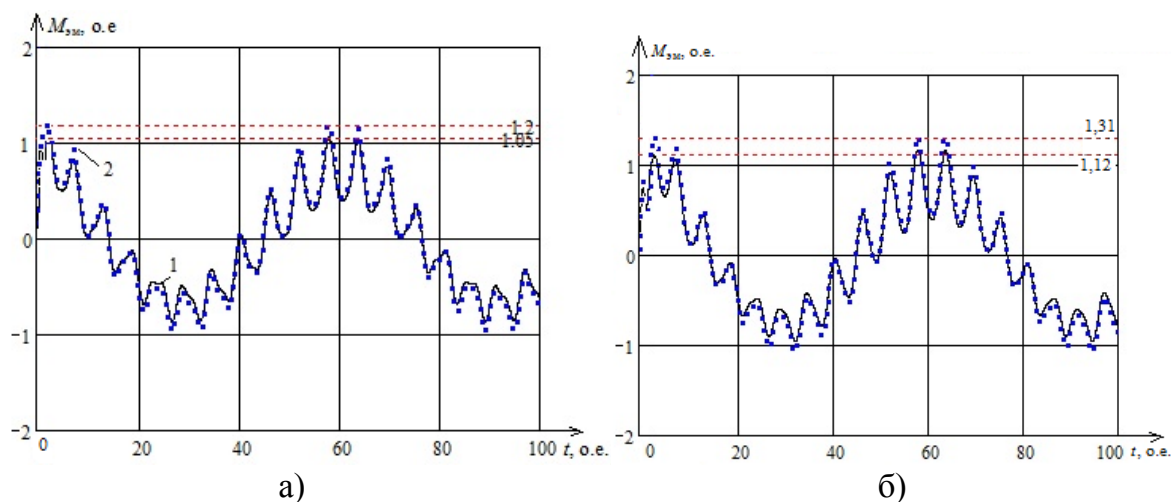


Рис. 10. Временные зависимости колебательного электромагнитного момента МДП при безударном пуске на частоту $\Omega/2\pi = 5$ Гц а) вариант 1, б) вариант 2 (--- – эксперимент, — – расчёт)

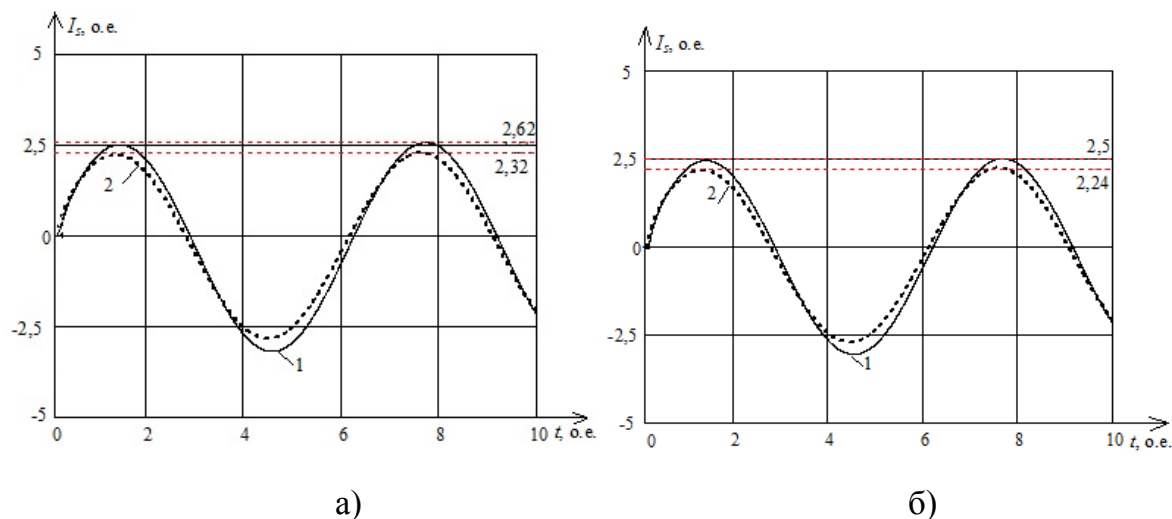


Рис. 11. Временные зависимости тока статора МДП при безударном пуске на частоту $\Omega/2\pi = 5$ Гц а) вариант 1, б) вариант 2 (--- – эксперимент, — – расчёт)

Исследования подтвердили наличие в колебательном электромагнитном моменте пульсаций двойной частоты питающей сети. С целью их устранения и улучшения качества воспроизводимых колебаний электромагнитного усилия, было предложено осуществлять питания исполнительного двигателя от источников, модулированных по частоте периодическим сигналом частоты Ω в соответствии с функциональной схемой (рис. 12)

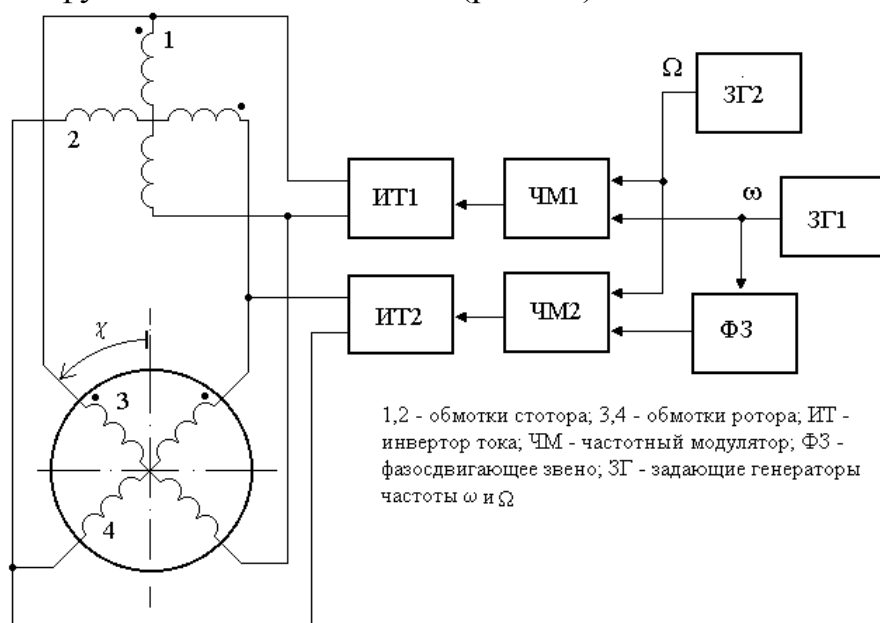


Рис. 12. Функциональная схема ЭКД с улучшенными эксплуатационными возможностями

В заключении изложены основные результаты исследований, представленных в диссертационной работе

В приложении приведены расчетные соотношения, а также акты внедрения результатов исследований в промышленность и учебный процесс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В настоящее время просматривается тенденция роста потребности в электроприводах колебательного движения средней и большой мощности, обладающих высокой управляемостью и обеспечивающих требуемые динамические характеристики. Наиболее перспективным видится применение в них в качестве исполнительного двигателя машины двойного питания, колебательный режим в которых обеспечивается за счет линейной фазовой модуляции питающих напряжений (токов).

2. На основании математического описания обобщенной модели электрической машины двойного питания разработана математическая модель электропривода колебательного движения, учитывающая несимметрию параметров электрической машины, за счет разночастотного питания обмоток статора и ротора.

3. Впервые описана аналитически взаимосвязь между параметрами машины двойного питания и её геометрическими размерами, что позволяет на этапе структурного синтеза осуществлять выбор исполнительного двигателя для заданного частотного диапазона изменения частоты колебаний.

4. Впервые установлена функциональная зависимость между динамическими показателями электропривода колебательного движения и геометрией исполнительного двигателя при пуске на заданную частоту колебаний. Установлено, что расчет и проектирование исполнительного двигателя следует осуществлять, руководствуясь следующими положениями:

- наибольшее влияние на формирование ударных значений токов статора и ротора оказывают изменение внутреннего диаметра расточки статора (D), сечения эффективного числа проводников фаз обмоток статора ($q_{\text{эф1}}$) и ротора ($q_{\text{эф2}}$), а на значение ударного колебательного электромагнитного момента – сечение эффективного числа проводников фазы обмотки статора ($q_{\text{эф1}}$);

- исходя из целевого назначения электропривода колебательного движения приоритет при выборе исполнительного двигателя из стандартного ряда необходимо отдавать: при потенциальном питании – электрическим машинам с минимальной длиной магнитопровода (l_{δ}), а при токовом – с максимальной. Такой подход позволяет на этапе структурного синтеза снизить величины ударных значений токов и колебательного электромагнитного момента в среднем на 5 – 7%;

- для обеспечения при пуске на заданную частоту колебаний минимального значения ударного момента необходимо, чтобы при проектировании электромеханического преобразователя энергии, в случае постоянства сечения эффективного числа проводников фаз обмоток статора ($q_{\text{эф1}}$) и ротора ($q_{\text{эф2}}$), выполнялось условие $l_{\delta}/D = 1,05$ о.е., а при постоянстве внутреннего диаметра расточки статора (D) и длины магнитопровода (l_{δ}) – $q_{\text{эф1}}/q_{\text{эф2}} = 0,88$ о.е.;

- для обеспечения при пуске минимального значения ударного тока необходимо, что бы при условии постоянства сечения эффективного числа проводников фаз обмоток статора ($q_{\text{эф1}}$) и ротора ($q_{\text{эф2}}$) выполнялось условие $l_{\delta}/D = 0,97$ о.е., а при постоянстве внутреннего диаметра расточки статора (D) и длины магнитопровода (l_{δ}) – $q_{\text{эф1}}/q_{\text{эф2}} = 0,9$ о.е.

5. Теоретически обоснован алгоритм и экспериментально доказана возможность обеспечения безударного пуска электропривода колебательного движения по моменту или току за счет выбора начальных фаз питающих напряжений (токов).

6. На базе метода градиентного спуска разработан алгоритм оптимизации геометрии электрической машины двойного питания при колебательном режиме работы по динамическим показателям.

7. Предложено устройство для расширения функциональных возможностей электропривода колебательного движения с машиной двойного питания, защищенное патентом РФ №90277, позволяющее приблизить закон изменения развиваемого колебательного усилия к гармоническому закону, за счет токовой частотной модуляции.

**Основное содержание работы опубликовано в работах:
Рекомендованных ВАК:**

1. Аристов А.В., Паюк Л.А. Управление переходными процессами в электрических машинах периодического движения //Известия Томского политехнического университета, 2009. – т. 314 – № 4. – С. 59–64.
2. Аристов А.В., Паюк Л.А., Воронина Н.А. Асинхронный электропривод с прерывистым движением подвижного элемента //Электричество, 2009. – № 12. – С. 41–44.
3. Аристов А.В., Паюк Л.А. Взаимосвязь ударных токов электропривода колебательного движения с геометрическими параметрами МДП при потенциальной фазовой модуляции //Известия вузов. Электромеханика, 2010. – № 3. – С. 54–57.
4. Аристов А.В., Паюк Л.А. Оптимизация геометрии машины двойного питания при работе в режиме вынужденных колебаний // Электромеханика, 2011. – № 6. – С. 21–24.

Материалы конференций и сборников статей:

5. Паюк Л.А., Аристов А.В. Анализ электромагнитного поля машины двойного питания при работе в специальных режимах // Современные техника и технологии (СТТ'2005): Труды XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных: в 2 т. – Томск, 29 марта-2 апреля 2005 г. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – С. 325–327.
6. Аристов А.В., Паюк Л.А. Взаимосвязь динамических показателей электропривода колебательного движения с геометрическими параметрами МДП при потенциальной фазовой модуляции // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции – Томск, 13-16 октября 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 348–353.
7. Аристов А.В., Паюк Л.А. Взаимосвязь динамических показателей электропривода колебательного движения с геометрическими параметрами МДП при фазовой модуляции // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский сборник научных трудов – Уфа, 2010. – Уфа: УГАТУ, 2010. – С. 116–121.
8. Паюк Л.А. Взаимосвязь параметров машины двойного питания с геометрическими размерами при колебательном режиме работы //Современные

техника и технологии: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных – Томск, 4-8 мая 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 458–460.

9. Паюк Л.А. Исследование влияний частоты колебаний на пусковой режим работы электропривода колебательного движения // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых – Томск, 12-16 апреля 2010. – Томск: ТПУ, 2010. – С. 458–460.

10. Паюк Л.А., Аристов А.В. Влияние геометрии электрической машины на динамические показатели электропривода колебательного движения // Современные техника и технологии: Сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных – Томск, 19-22 апреля 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 507–509.

11. Паюк Л. А., Аристов А. В. Синтез электропривода колебательного движения на заданные динамические показатели // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции Посвященной памяти А. Г. Сипайлова – Томск, 12-14 октября 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 208–212.

12. Паюк Л. А., Аристов Колебательный электропривод // Наука, технологии и инновации: материалы научно-практической конференции – Новосибирск, 4-8 декабря 2011. – Новосибирск, НГТУ, 2011. – С. 90–94.

Патенты и авторские свидетельства:

13. Патент на полезную модель 90277, Российская Федерация, МПК H02P 7/00. Электропривод колебательного движения [Текст] / Авторы: Аристов А. В., Паюк Л. А., патентообладатель Государственное высшее образовательное учреждение «Томский политехнический университет». – № 2009125765/22; заявл. 06.07.2009.; опублик. 27.12.2009.; Бюл. № 36. – 2 с: ил.

Личный вклад автора. Публикация [8] выполнена без соавторства. В публикации [1], автору принадлежит определение аналитических выражений для результирующего вектора потокосцепления при питании МДП токами различных частот и получение различных режимов работы: вращательного, колебательного, полигармонического, режима ползучей скорости (40%), в публикациях [2–5] – установление аналитической зависимости внутренних параметров МДП с её геометрическими размерами с учётом электрической несимметрии по осям α и β (50%). В публикациях [5, 9] – анализ влияния частоты колебаний подвижного элемента ротора на внутренние параметры электрической машины и динамические показатели электропривода колебательного движения (50%), в публикациях [5, 6, 7, 9] – определение пусковых токов и электромагнитного момента МДП в колебательном режиме работы с возможностью реализации безударного пуска (50%). Публикации [10–13] – разработка математической модели метода оптимизации по динамическим показателям электропривода колебательного движения (40%).