На правах рукописи

НИКУЛИН
Николай Анатольевич

ЭЛЕКТРОПРИВОД С МНОГОФАЗНЫМ ЛИНЕЙНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ПОПЕРЕЧНОГО ПОТОКА

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2009

Работа выполнена в ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет", г. Красноярск

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Иванчура Владимир Иванович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Христинич Роман Мирославович
	кандидат технических наук, доцент Забуга Виктор Александрович
Ведущая организация:	Обособленное подразделение "Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники" (г. Томск)

Защита состоится "25" сентября 2009 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.06 при ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет" по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. УЛК 115.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОУ ВПО "Сибирского федерального университета" по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. ак. Киренского, 26, ауд. Г-274.

Автореферат разослан "__" _____ 2009

Ученый секретарь
диссертационного совета Р. Ю. Царев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Линейные асинхронные двигатели (ЛАД) во многих случаях наилучшим способом удовлетворяют задаче максимального сочленения, сращивания электромеханического преобразователя энергии и исполнительного механизма. За счет бесконтактной передачи усилия линейные двигатели обеспечивают такие дополнительные преимущества, как отсутствие потерь на трение и износ механических передач. Кроме того, линейный асинхронный двигатель с поперечным магнитным потоком (ЛАДПП) развивает усилия левитации, достаточные для левитации индуктора в собственном магнитном поле машины.

Вопросами исследования линейных асинхронных двигателей поперечного потока и их применения для высокоскоростного наземного транспорта и металлургии посвящены работы Т. В. Щурской, Т. К. Калниня, В. А. Соломина. В них не учитывались высшие пространственные гармоники и число фаз, а также не рассмотрены вопросы исследования электропривода на основе этих двигателей.

Другой важной составляющей повышения эффективности электропривода является решение проблемы повышения качества асинхронного инверторного электропривода (АИП). В последние годы все большие внимание исследователей привлекает улучшение характеристик электропривода за счет увеличения числа фаз системы автономный инвертор (АИ) – асинхронный двигатель (АД). Автономность структуры асинхронного инверторного электропривода (наличие собственного источника регулируемого переменного напряжения или тока) не накладывает принципиальных ограничений на число фаз системы АИ - АД.

В ходе дальнейшего развития машин с поперечным потоком возникла необходимость в более глубоком изучении свойств этих машин в составе электропривода и в создании теории, описывающие происходящие в них физические явления, а также методики расчета. Исследование установившихся и переходных режимов электропривода на базе многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока, разработка методов расчета ЛАДПП, а также методики расчета в системе асинхронного инверторного электропривода являются актуальными задачами.

Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы)”, в соответствии с планами по НИР ПИ СФУ, а также грантами DAAD (программа Михаил Ломоносов 2007-2008) и Технического Университета Брауншвейга (Германия, 2008 г.).

Объектом исследования являются электроприводы на основе многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока.

Предмет исследования представляют электромагнитные процессы и характеристики в системе асинхронного инверторного электропривода.

Цель работы. Развитие теории рабочих процессов, методов и средств проектирования электропривода с частотно-токовым управлением на основе многофазных линейных асинхронных двигателей с учетом особенностей магнитных систем, обусловленных наличием продольных и поперечных составляющих магнитного потока, а также высших пространственных гармоник и взаимосвязи тягового и подъемного усилий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования**:

1. Анализ особенностей многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока.
2. Разработка математической модели многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока в установившихся режимах с учетом высших пространственных гармоник и числа фаз для определения параметров двигателя, тягового и подъемного усилий.
3. Разработка математической модели переходных процессов в многофазных линейных асинхронных двигателях поперечного потока.
4. Создание комплексной имитационной модели электропривода с частотно-токовым управлением, включающей в себя модели устройств преобразования электроэнергии и многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока, позволяющей проводить исследования установившихся и переходных процессов, а также осуществлять синтез системы автоматического регулирования, обеспечивающей требуемые показатели качества управления электропривода.
5. Экспериментальные исследования макетного образца линейного асинхронного двигателя поперечного потока.

Методы исследования. Теория электромагнитного поля, теория электрических и магнитных цепей, теория электропривода, теория автоматического управления. Численное моделирование в программных средах MathCAD, MatLab, COMSOL Multiphisics. Экспериментальные исследования на специализированных испытательных стендах и на действующем оборудовании.

Результаты, выносимые на защиту и представляющие научную новизну:

1. Математическая модель многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока с учетом высших пространственных гармоник и числа фаз, выполненная в трехмерной системе координат и позволяющая определять параметры, тяговое и подъемное усилия двигателя.
2. Установлено, что с увеличением числа фаз спектр пространственных гармоник сдвигается в область высоких частот. Это является причиной уменьшения пульсаций тягового усилия.
3. Тяговые и подъемные характеристики усилий многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока, нелинейно зависящие от потребляемого тока, скольжения и величины, изменяющегося зазора между индуктором и вторичным элементом, и используемые для построения нелинейных блоков в электроприводе с частотно-токовым управлением.

4. Имитационная модель электропривода на основе многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока с частотно-токовым управлением, включающая блоки, определяющие тяговое и подъемное усилия.

Значение для теории состоит в развитии методов исследования многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока с учетом высших пространственных гармоник, а также методов повышения качества управления асинхронного инверторного электропривода с линейным асинхронным двигателем поперечного потока.

Значение для практики имеют:

1. Методика электромагнитного расчета многофазного линейного асинхронного двигателя поперечного потока, позволяющая оценить тяговые и подъемные усилия, создаваемые двигателем с учетом высших пространственных гармоник и числа фаз.
2. Имитационная комплексная модель электропривода, позволяющая осуществлять синтез системы автоматического регулирования.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов имитационного моделирования с данными экспериментов на специализированных лабораторных стендах, а также путем сопоставления данных диссертации с соответствующими материалами других авторов и математической моделью, выполненной на основе метода конечных элементов при помощи пакета COMSOL Multiphisics.

Реализация результатов работы. Результаты работы используются на ЗАО СМНУ-70 в рамках технического предложения по одному из проектов разработки электропривода для транспортировки листов цветного проката. Разработанные программы расчета используются в учебном процессе по курсу “Системы управления электроприводами” в Политехническом институте Сибирского федерального университета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: начало 21 века» (г. Красноярск, 2006 г.).
2. IV Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Красноярск, 2006 г.).
3. Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации» (г. Новосибирск, 2006 г.).
4. V международной (XVI Всероссийской) научной конференции по автоматизированному электроприводу (Санкт-Петербург, 2007 г).
5. 11th International Conference on New Actuators and Drive Systems (г. Бремен, Германия, 2008 г.).

Публикации. Основной материал диссертации отражен в 11 научных работах, в числе которых: 2 научные статьи по списку ВАК РФ; 4 научных статей в сборниках научных трудов; 5 докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа представлена на 154 страницах, иллюстрируется 61 рисунком и состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы из 101 наименования и 2-х приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, перечислены основные результаты, выносимые на защиту, определена их научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приводится обзор литературы; определены основные направления исследования электроприводов с многофазными линейными асинхронными двигателями поперечного потока; проведен анализ особенностей многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного; а также рассмотрены методы математического описания двигателя в установившемся и переходном режимах.

Использование численных методов решения, описанных в работах А.И. Вольдека, Ф.Н. Сарапулова, О.Н. Веселовского, Э. Лайтвейта, Й. Бабы, Т.К. Калниня, ограничивает возможности проведения анализа путей улучшения характеристик ЛАДПП. Так как теория явлений в машинах с продольным магнитным потоком слишком груба, и она не учитывает основной особенности исследуемых машин – замыкание магнитного потока в ярме в поперечном направлении, что в конечном счете приводит к существенному различию опытных и расчетных данных.

В ходе дальнейшего развития машин с поперечным потоком возникает необходимость в более глубоком изучении свойств этих машин и в создании теории, описывающей происходящие в них физические явления, а также в разработке методик их расчетов.

Автором предпринята попытка описать поле рабочего зазора с учетом высших пространственных гармоник и числа фаз в трехмерной системе координат, так как именно трехмерная модель дает возможность получить характеристики подъемного усилия.

Анализ работ В.И. Иванчуры, В.Ф. Бражникова, Б.П. Соустина в области исследования многофазных асинхронных инверторных электроприводов показал, что при увеличении числа фаз улучшаются условия компенсации реактивной энергии АД передачей из фазы в фазу. С увеличением числа фаз пропорционально снижается мощность АИ на фазу, т.е. обеспечивается наращивание мощности АИП без увеличения числа параллельно включаемых силовых элементов АИ, в том числе с транзисторными АИ.

В настоящее время не решены проблемы создания и исследования многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока в составе электропривода и в создании теории, описывающие происходящие в них физические явления, а также методики расчета.

С точки зрения математического описания наиболее сложным элементом в системе АИ – ЛАДПП является ЛАДПП. В связи с этим центральное место при моделировании электропривода занимает модель многофазного ЛАДПП, предназначенная для совместной модели с моделью системы преобразования электроэнергии.

Во второй главе с целью упрощения анализа m – фазного мостового инвертора, вводятся потенциальные и коммутационные функции точек присоединения линий нагрузки.

При исследовании инверторов делаются следующие допущения: коммутация вентилей мгновенна, сопротивление открытого ключа равно нулю, закрытого – бесконечности, сопротивление источника постоянного тока равно нулю.

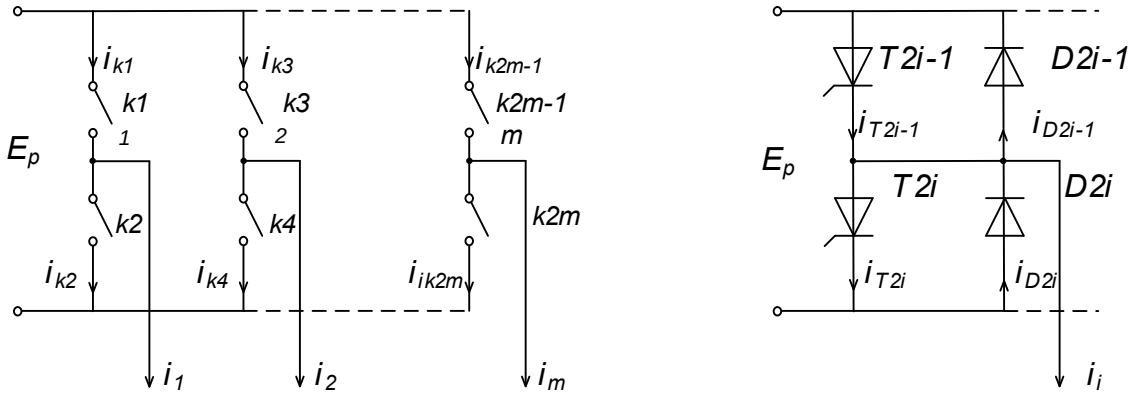

Рисунок 1 - Идеализированная схема m - фазного МИН

На рис. 1 представлена идеализированная схема m - фазного мостового инвертора напряжения (МИН). Точками $1, 2..., i, .., m$ обозначены места присоединения линий нагрузки, которые имеют те же самые номера, что и точки i; мгновенные значения фазных напряжений относительно нуля нагрузки записываются через $U_1(e), U_2(e), ..., U_i(e), .., U_m(e)$; токи линий - $I_i(e)$, линейные напряжения между i и j через $U_{ij}(e)$.

Из рис. 1 видно, что потенциалы точки i относительно нуля источника питания принимают значения $V_i(e) = \frac{1}{2}E_p(e)$, $V_i(e) = -\frac{1}{2}E_p(e)$ и $V_i = f(V_p)$, если точка i присоединена соответственно к плюсу, минусу источника питания и никуда не присоединена. Таким образом, потенциальную функцию точки представляют произведением $V_i(e) = \frac{1}{2}E_p(e)F_i(e)$, где $F_i(e)$ - коммутационная функция и принимает соответственно значение +1, -1 и $F(F_n)$. Выражения фазных и линейных напряжений m - фазного мостового инвертора напряжения найдем, решив характерные в этом случае уравнения на всем множестве точек i.

$$\begin{cases} U_{ij}(e) = U_i(e) - U_j(e) \\ U_{ij}(e) = V_i(e) - V_j(e) \\ \sum_{l=0}^{m-i} U_l(e) = 0 \end{cases}. \qquad (1)$$

Откуда

$$U_i(e) = V_i(e) - \frac{1}{m}\sum_{l=0}^{m-1} U_l(e). \qquad (2)$$

Важной характеристикой m - фазной системы является обобщенный вектор напряжения m - фазного МИН.

$$\bar{U}(e) = \frac{2}{m}\sum_{l=0}^{m-1} \bar{a}^l \cdot U_l(e), \qquad (3)$$

где $\bar{a} = e^{j\frac{2p}{m}}$.

Подставляя в (3) выражение фазного напряжения получается:

$$\bar{U}(e) = \frac{1}{2}E_p(e) \cdot \frac{2}{m}\sum_{l=0}^{m-1} \bar{a}^l \cdot F_l(e). \qquad (4)$$

Если обозначить $\bar{F}(e) = \frac{2}{m}\sum_{l=0}^{m-1} \bar{a}^l \cdot F_l(e)$ через обобщенный коммутационный вектор m - фазного МИН, то

$$\bar{U}(e) = \frac{1}{2}E_p(e) \cdot \bar{F}(e). \qquad (5)$$

Вводя спектры коммутационных функций точек $i \in m$, определяются спектры коммутационных функций линий F_{ij} и фаз F_{iphase}.

Гармоники, некратные числу фаз инвертора, передаются в фазную коммутационную функцию без искажения, кратные гармоники отсутствуют.

Спектр m - фазного МИН можно разложить на гармоники прямой последовательности $n = mk + 1$, гармоники обратной последовательности $n = mk - 1$ и остальные гармоники, образующие колебательные последовательности. Такое разложение физически объяснимо при формировании магнитодвижущей силы в воздушном зазоре машины переменного тока. Ближайшей обратной гармоникой в спектре m - фазного МИН будет гармоника $n = m - 1$. С этой точки зрения, для двигателя, питающегося от МИН, желательно увеличение числа фаз.

При аналитическом исследовании электромагнитного поля линейных асинхронных машин используется математическая модель машины в виде анизотропных слоев. Для большинства ЛАД могут быть определены следующие характерные зоны: активный слой индуктора, воздушный зазор, сплошная проводящая среда. Размеры зон при выбранной системе координат не зависят от числа фаз моделируемой машины.

Токовый слой имеет пространственно-периодическое распределение линейной токовой нагрузки по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Он распределен синусоидально, бежит вдоль оси x и имеет синусоидальное распределение вдоль оси z.

Расчетная модель линейной индукционной машины с поперечным магнитным потоком представлена на рис. 2.

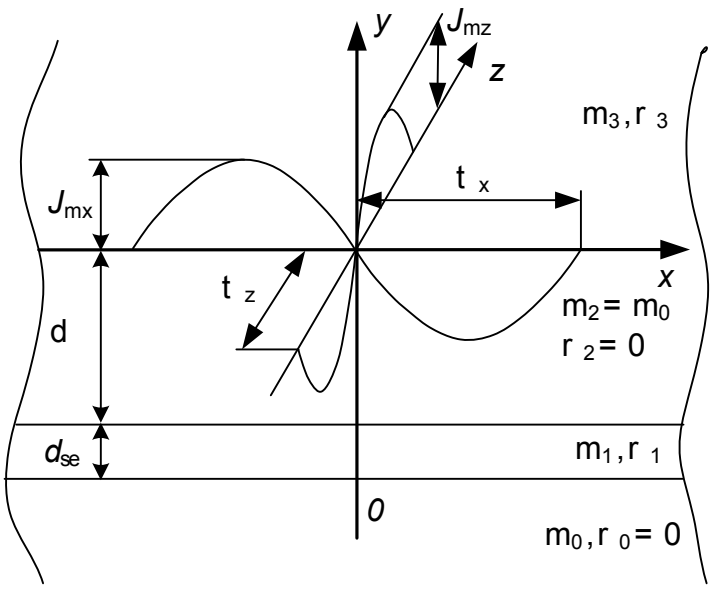

Рисунок 2 - Математическая модель одностороннего ЛАДПП

При построении расчетной модели приняты основные допущения:

1. Сердечник индуктора моделируется бесконечно длинной в поперечном и продольном направлениях средой с μ_3 и ρ_3.
2. На поверхности сердечника расположен бесконечно тонкий токовый настил с линейной плотностью

$$D = \frac{wm\,I k_p}{2pt_x} e^{jwt}\left(e^{-jb_x x} + \sum_{n=1}^{\infty}\left(e^{-j(1-nm)b_x x} + e^{-j(1+nm)b_x x}\right)\right)\cos b_z z\,. \qquad (6)$$

3. Система координат жестко связана с индуктором, который отстоит от электропроводного рабочего тела на расстоянии δ.
4. Вторичный элемент представлен, как твердое тело с параметрами m_1 и r_1, который движется со скоростью u в направлении бегущего электромагнитного поля, создаваемого индуктором.
5. Воздушный зазор определен параметрами $m_2 = m_0$ и $r_2 = 0$.

При заданном пространственно-временном законе изменения линейной токовой нагрузки, электромагнитное поле в любой области машины описывается уравнениями Максвелла. В результате их решения получены выражения напряженностей электрических и магнитных составляющих электромагнитного поля в любой из сред принятой расчетной модели одностороннего линейного асинхронного двигателя с поперечным потоком, учитывающей гармонический состав и число фаз. Постоянные интегрирования определены по принятым граничным условиям на границах моделируемых сред. Функциональная зависимость полученных решений от геометрических размеров, обмоточных данных и скольжения двигателя позволяет проводить анализ процессов, происходящих в двигателе, с учетом его конструктивных и технологических особенностей, что дает возможность найти пути улучшения характеристик двигателя.

Для каждой гармоники будет свое скольжение, поскольку скорость распространения поля, соответствующего различным гармоникам, различна. Для гармоник, движущихся в сторону первой гармоники (в основном направлении) и в противоположную сторону, скорость движения будет соответственно

$$u_{fn} = \frac{w}{b_{x_{nm+1}}}; \; u_{bn} = \frac{w}{b_{x_{nm-1}}}.$$

Выражения для y- и z-составляющих магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_{y2} = j\frac{wm\,\mathrm{I}k_p}{2pt}e^{jwt}m_2\sum_{n=0}^{\infty}\frac{1}{b_{2n}}\frac{V_n}{K_n}\left[\frac{n^2b_x^{\,2}+b_z^{\,2}}{n^2b_x}e^{-jnb_xx}\right]_{n=nm\pm1}\cos b_z z; \quad (7)$$

$$B_{2z} = -j\frac{wm\,\mathrm{I}k_p}{2pt}e^{jwt}m_2\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{1}{b_{2n}}\frac{V_n}{K_n}\frac{b_z}{nb_x}e^{-jnb_xx}\right]_{n=nm\pm1}\sin b_z z. \quad (8)$$

Выражения для x- и z-составляющих линейной плотности тока во вторичном элементе:

$$J_{1x} = s_1 w\frac{wm\,\mathrm{I}k_p}{2pt}e^{jwt}m_2\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{1}{b_{2n}}\frac{U_n}{K_n}\frac{b_z}{nb_x}e^{-jnb_xx}\right]_{n=nm\pm1}\sin b_z z; \quad (9)$$

$$J_{1z} = -s_1 jw\frac{wm\,\mathrm{I}k_p}{2pt}e^{jwt}m_2\sum_{n=0}^{\infty}\left[\frac{1}{b_{2n}}\frac{U_n}{K_n}e^{-jnb_xx}\right]_{n=nm\pm1}\cos b_z z. \quad (10)$$

Таким образом, тяговое и подъемное усилия, создаваемые при взаимодействии составляющих магнитной индукции и тока вторичного элемента, определяются в следующем виде:

$$F = \iiint_V (J \times B)dV. \quad (11)$$

На рис. 3, 4 приведены графики зависимостей тягового и подъемного усилий от скольжения, выполненные для номинального режима при пересчете параметров ЛАДПП при сохранении потребляемой мощности. Электромеханическая характеристика тягового усилия похожа на характеристику асинхронного двигателя. Увеличение числа фаз приводит к улучшению механических характеристик двигателя при неизменном исполнении вторичного элемента. При $m = 9$ характеристики занимают более высокое положение.

Высшие гармоники (за исключение первых) создают как тяговое, так и тормозное усилие, пульсации усилий. Причем тяговые и тормозные усилия, создаваемые высшими гармониками, имеют не существенное значение, но пульсации усилий, создаваемые ими, оказывают значительное отрицательное влияние на качество работы двигателя. Поэтому для уменьшения пульсаций усилия ЛАДПП целесообразно исключение из обмена энергией между статором и вторичным элементом наиболее низкочастотных высших гармоник. С увеличением числа фаз системы возрастает частота, а следовательно,

уменьшается амплитуда как синхронных гармоник э.д.с. и токов, так и пульсаций тягового усилия.

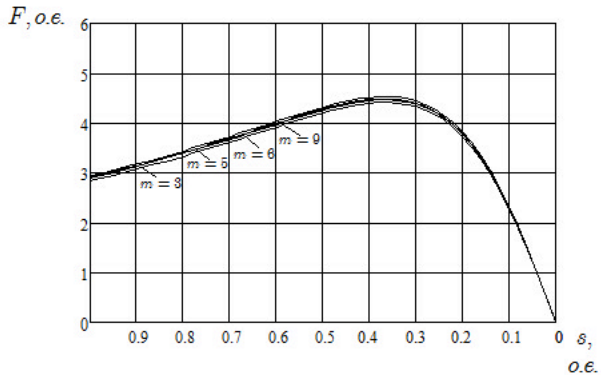

Рисунок 3 - Электромеханические характеристики для различных m

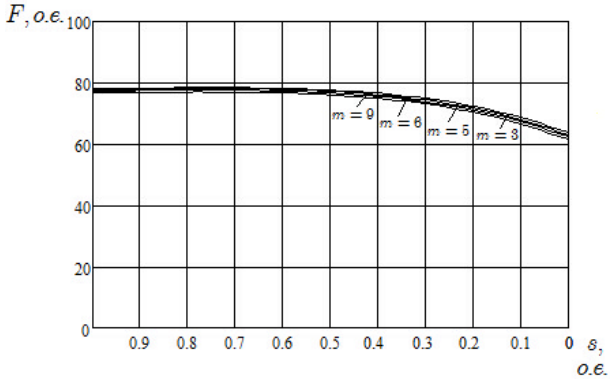

Рисунок 4 - Подъемные усилия для различных m

В третьей главе для получения уравнений электромеханического преобразования энергии в ЛАДПП использована теория обобщенной электрической машины. С точки зрения математической теории электрические машины отличаются друг от друга формой поля в воздушном зазоре, количеством обмоток и их параметрами.

Для линейного асинхронного двигателя связь мгновенных значений фазных напряжений статора с токами и потокосцеплениями выражается уравнениями с учетом метода результирующих векторов в векторной форме:

$$\overline{U_s} = r_s \overline{i_s} + \frac{d}{dt}\overline{\Upsilon_s}, \tag{12}$$

$$0 = r_r \overline{i_r} + \frac{d}{dt}\overline{\Upsilon_r}. \tag{13}$$

Эти уравнения позволяют составить системы уравнений в нескольких формах записи, где будут фигурировать в качестве неизвестных токи статора и ротора i_s, i_r и потокосцепление статора и ротора Υ_s, Υ_r.

Из условий равенства мощности при вращательном и поступательном движении имеем:

$$M \frac{1}{p} 2pf(1 - s_{rot}) = F \text{Ч} 2t f(1 - s_{mov}), \tag{14}$$

где s_{rot}, s_{mov} - скольжения для вращательного и поступательного движения, соответственно равны: $s_{rot} = (w_0 - w)/w_0$; $s_{mov} = (u_0 - u)/u_0$.

Уравнения линейного асинхронного двигателя в декартовой системе координат, движущейся в пространстве с произвольной скоростью u_k:

$$U_{xs} = r_e(T_e \frac{d}{dt} i_{xs} + i_{xs}) - v_k r_e T_e i_{ys} - \frac{K_r}{T_r}\Upsilon_{xr} - K_r Z_p v \Upsilon_{yr}, \tag{15}$$

$$U_{ys} = r_e(T_e \frac{d}{dt} i_{ys} + i_{ys}) + v_k r_e T_e i_{xs} - \frac{K_r}{T_r}\Upsilon_{yr} + K_r Z_p v \Upsilon_{xr}, \tag{16}$$

$$i_{xs} = \frac{1}{K_r r_r T_r}[T_r \frac{d}{dt}\Upsilon_{xr} + \Upsilon_{xr} - T_r(v_k - Z_p v)\Upsilon_{yr}], \quad (17)$$

$$i_{ys} = \frac{1}{K_r r_r T_r}[T_r \frac{d}{dt}\Upsilon_{yr} + \Upsilon_{yr} - T_r(v_k - Z_p v)\Upsilon_{xr}], \quad (18)$$

$$F = \frac{m Z_p K_r}{2t}(\Upsilon_{xr} i_{ys} - \Upsilon_{yr} i_{xr}), \quad (19)$$

$$\frac{dv}{dt} = (F - F_c)/m, \quad (20)$$

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad (21)$$

где F, F_c - электромагнитное и статическое усилие; T_r - электромагнитная постоянная времени вторичного элемента; T_e - электромагнитная постоянная времени главной цепи двигателя; L_m, L_s, L_r, r_s, r_r - параметры цепей ЛАДПП, приведенные к обмотке статора; $r_e = r_s + K_r^2 r_r$ - эквивалентное активное сопротивление фазы двигателя; K_r - коэффициент связи ротора; x - перемещение в направлении движения вторичного элемента.

Системе уравнений соответствует структурная схема, представленная на рис. 5. На этой структурной схеме можно выделить прямые тракты регулирования (переменные $i_{xs}, i_{ys}, \Upsilon_{xr}, \Upsilon_{yr}$), обеспечивающие формирование требуемого значения электромагнитного усилия ЛАДПП, и каналы внутренних связей, приводящих к отклонению регулируемых переменных от заданных значений. Кроме того, на структурных схемах фигурирует канал задания скорости v_k координатной системы, где представлены переменные ЛАДПП.

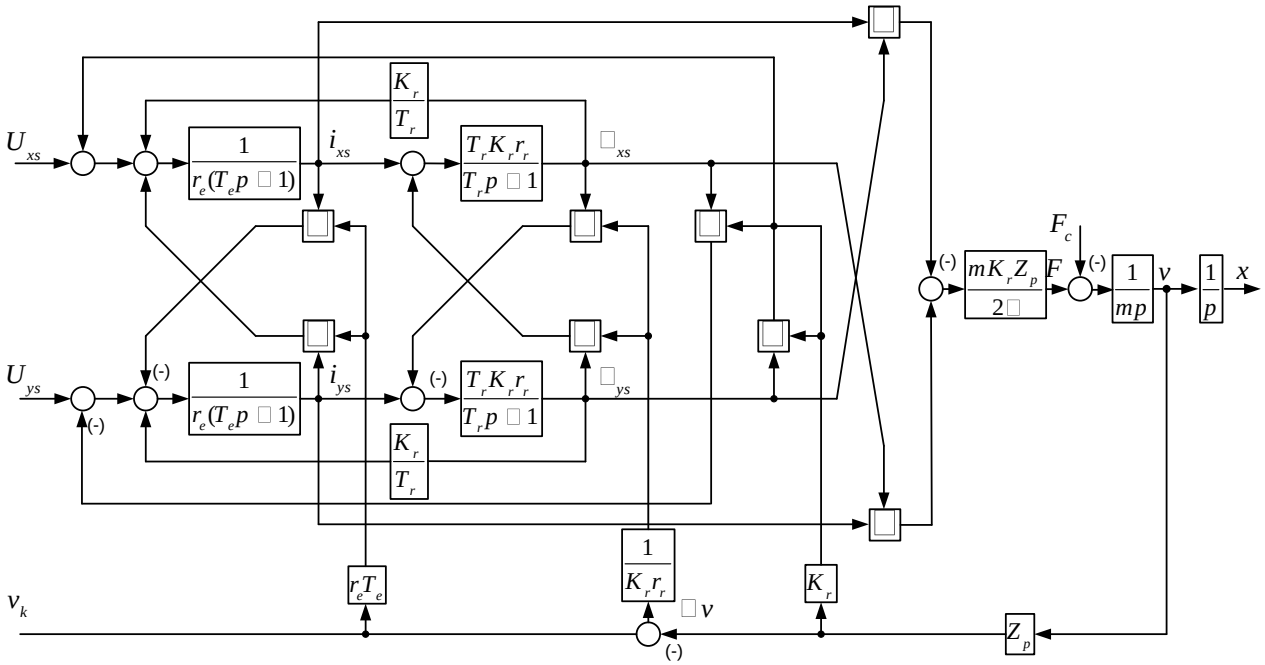

Рисунок 5 - Структурная схема ЛАДПП

По графикам переходного процесса пуска двигателя с различным числом фаз заметно, что с увеличением числа фаз происходит снижение пульсаций тягового усилия.

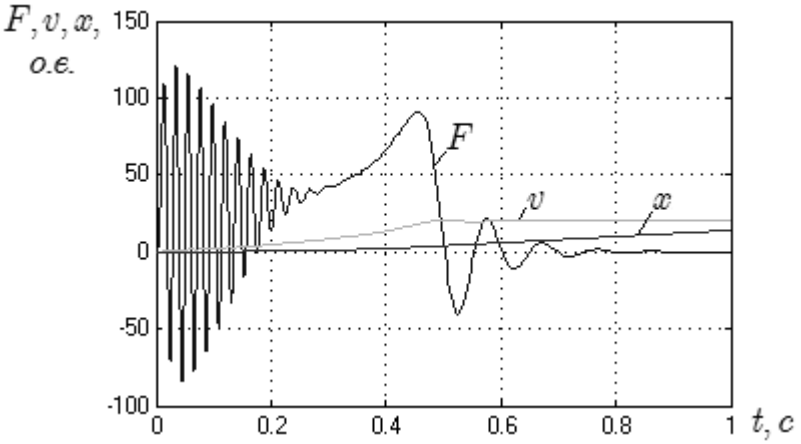

Рисунок 6 - Графики усилия, скорости и перемещения при пуске ЛАДПП для $m = 5$

Проводится исследование переходных процессов в схемах с автономными многофазными инверторами, при которых связываются в единую систему дифференциальные уравнения, как звена постоянного тока, так и нагрузки на входе инвертора. При этом система рассматривается как непрерывная, хотя она содержит вентильные дискретные преобразователи: инвертор и выпрямитель.

Ток нагрузки однозначно определяется током инвертора i_d и программой работы коммутатора (рис. 7). Фазные токи запишем в виде

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= i_d F_1(t); \\ i_2 &= i_d F_2(t); \\ &\dots\dots\dots\dots; \\ i_m &= i_d F_m(t), \end{aligned}\right\} \qquad (22)$$

где $F_1(t), F_2(t), ..., F_m(t)$ - функции времени (коммутационные функции), определяющиеся программой работы ключей и представляющие последовательность разнополярных единичных импульсов, соответствующих включенному состоянию ключей.

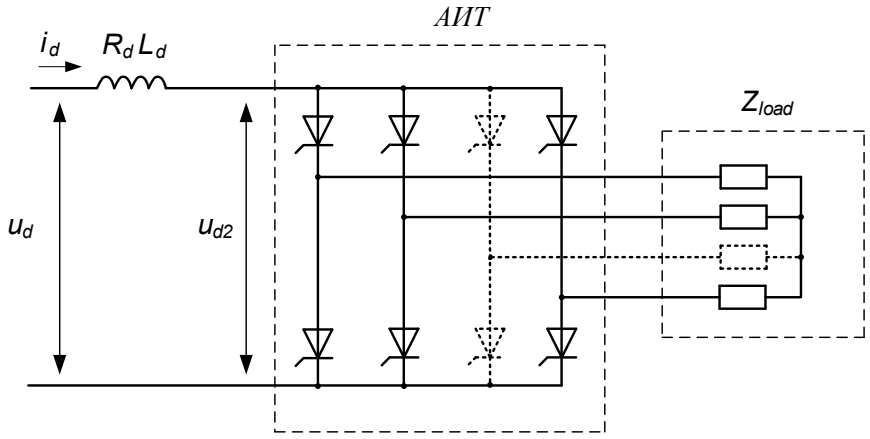

Рисунок 7 - Схема многофазного инвертора тока

Формулы (22) выражают основное отличительное свойство автономных инверторов тока. При фиксированной частоте, принимая за начало отсчета момент $t = 0$, можно записать:

$$\left.\begin{aligned} F_1(t) &= \frac{4}{p}\sum_{n=2mk\pm1}\frac{\sin(n\frac{p}{3})}{n}\cos nwt; \\ F_2(t) &= \frac{4}{p}\sum_{n=2mk\pm1}\frac{\sin(n\frac{p}{3})}{n}\cos(nwt-\frac{2p}{m}); \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots; \\ F_m(t) &= \frac{4}{p}\sum_{n=2mk\pm1}\frac{\sin(n\frac{p}{3})}{n}\cos(nwt-\frac{2(m-1)p}{m}), \end{aligned}\right\} \quad (23)$$

где $k = 0,1,2,3...$

Учитывая, что в любой момент времени $i_1 + i_2 + ... + i_m = 0$, запишем выражение для результирующего вектора тока нагрузки:

$$\bar{i} = \frac{2}{m} i_d[F_1(t) + \bar{a}F_2(t) + ... + \bar{a}^{(m-1)}F_m(t)] = i_d\overline{F_T}(t), \quad (24)$$

где $\overline{F_T}(t)$ - результирующий вектор коммутационной функции инвертора тока.

Система уравнений, устанавливающая взаимосвязь между входными и выходными величинами АИ с m - числом фаз, имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} \overline{i_{load}} &= F_T i_d; \\ u_{d2} &= \frac{m}{2}F_T\,\mathrm{Re}[\overline{u_{load}}]. \end{aligned}\right\} \quad (25)$$

Для исследования динамики системы «АИ - нагрузка» уравнения (25) необходимо решать совместно с уравнением нагрузки, устанавливающим взаимосвязь между результирующими векторами $\overline{i_{load}}$ и $\overline{u_{load}}$ нагрузки. Рассмотрим случай, когда процессы в нагрузке описываются линейной системой дифференциальных уравнений и инвертор работает при фиксированной частоте. В этом случае остается линейной и полная система уравнений, описывающая переходные процессы в системе «АИ - нагрузка».

$$\left.\begin{aligned} \overline{i_{load}}(p) &= F_T i_d(p); \\ \overline{u_{load}}(p) &= Z(p + jw)\overline{i_{load}}(p); \\ u_{d2}(p) &= \frac{m}{2}F_T\,\mathrm{Re}[\overline{u_{load}}(p)]. \end{aligned}\right\} \quad (26)$$

Тяговое усилие определяется в равной степени потоком и током. Однако в подавляющем большинстве случаев регулируемых приводов при любом типе двигателя управление моментом осуществляется током. Поток, как более инерционную величину, ограниченную сверху условиями насыщения

магнитной системы, в процессе работы поддерживают неизменным или изменяют по сравнению с током в значительно более узких пределах. Причем не для регулирования момента, а для улучшения использования силового оборудования привода (двигателя и преобразователя).

Пользуясь результатами математической модели двигателя в установившемся режиме, программируем элемент (блок формирования усилия), характеризующий усилия, возникающие в ЛАДПП с учетом скольжения и воздушного зазора (рис. 9, 10).

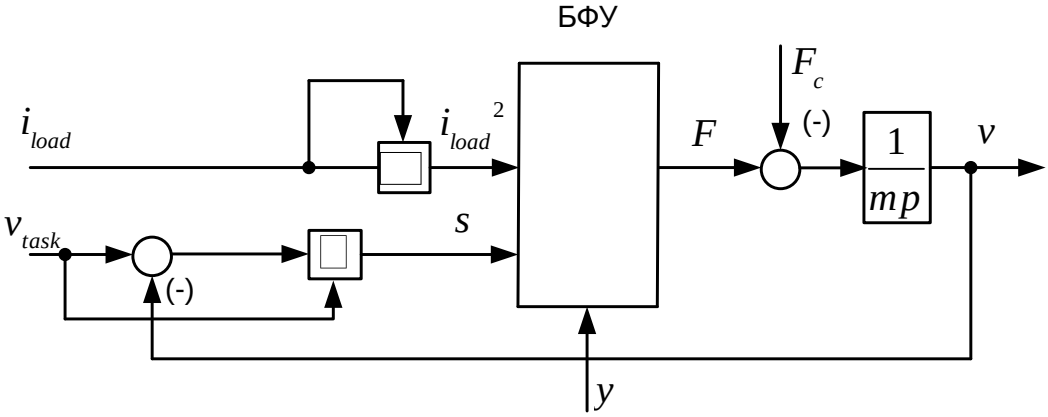

Рисунок 8 - Структурная схема ЛАДПП

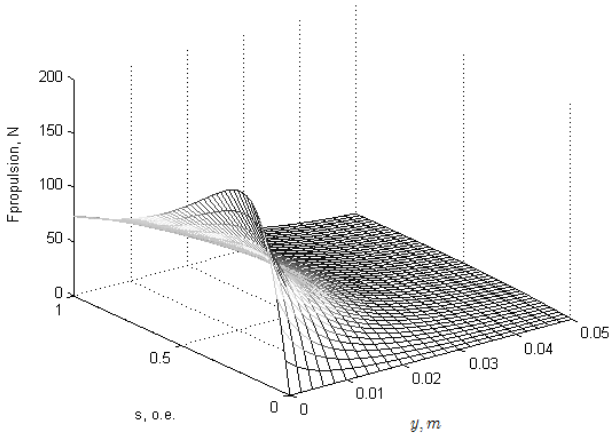

Рисунок 9 - Зависимость тягового усилия от скольжения и зазора

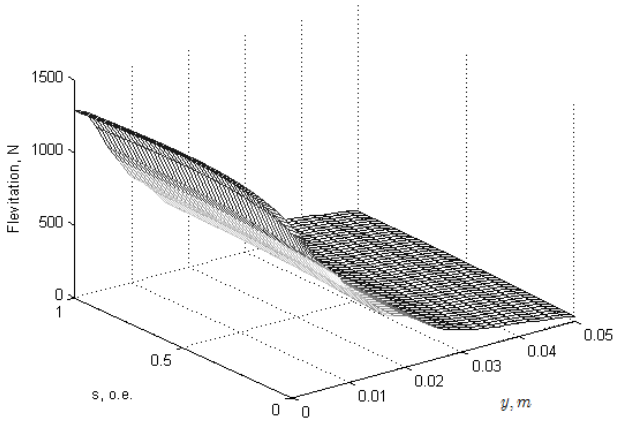

Рисунок 10 - Зависимость подъемного усилия от скольжения и зазора

На рис. 11. представлена структурная схема регулируемого электропривода с частотно-токовым управлением. Выходной сигнал пропорционально-интегрального регулятора скорости является заданием тягового усилия двигателя. При управлении с неизменным током статора машина приобретает неблагоприятные свойства, заключающиеся в том, что с увеличением нагрузки (скольжения) резко падает магнитный поток. Поэтому система должна быть замкнута таким образом, чтобы с увеличением нагрузки по определенному закону увеличивался и ток статора так, чтобы поток машины поддерживался постоянным. При всех частотах ток двигателя пропорционален скольжению. Сигнал, преобразованный в функциональном построителе, рассчитанном на основе математической модели двигателя в установившемся режиме,

выполняет данное условие. Является заданием амплитуды тока, которое отрабатывается замкнутой системой автоматического управления. Быстродействие в отработке задания тягового усилия определятся быстродействием системы регулирования амплитуды тока статора.

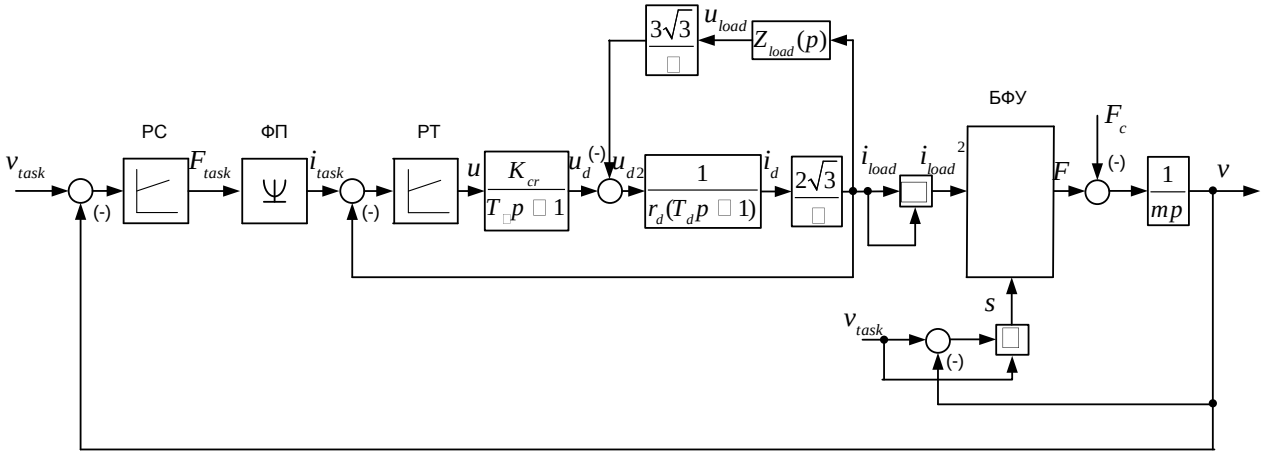

Рисунок 11 - Структурная схема электропривода с частотно-токовым управлением

Модель представляет собой двухконтурную систему подчиненного регулирования и позволяет оценить динамику, а также рассчитать регуляторы тока и скорости. Настройка контуров регулирования произведена по критерию модульного оптимума. В контуре регулирования скорости используется ПИ – регулятор, параметры которого подобраны экспериментально, ввиду того, что модель содержит нелинейные блоки.

Система является устойчивой к возмущающим воздействиям, таким как наброс нагрузки, а также синусоидальное воздействие.

В четвертой главе производится проверка правильности полученных теоретических выражений. Эксперименты включали в себя исследование кругового аналога линейного асинхронного двигателя с поперечным потоком с регистрацией основных величин и сравнение их с расчетными. Исследован многофазный линейный асинхронный двигатель с поперечным потоком при помощи программы COMSOL Multiphisics. Приведены основные характеристики.

Проведено сравнение расчетных и экспериментальных кривых, указывающее на удовлетворительную сходимость результатов. Подтверждены принимаемые при теоретических исследованиях допущения.

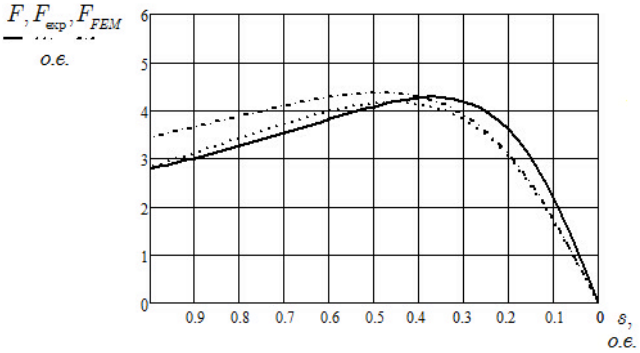

Рисунок 12 - Зависимость тягового

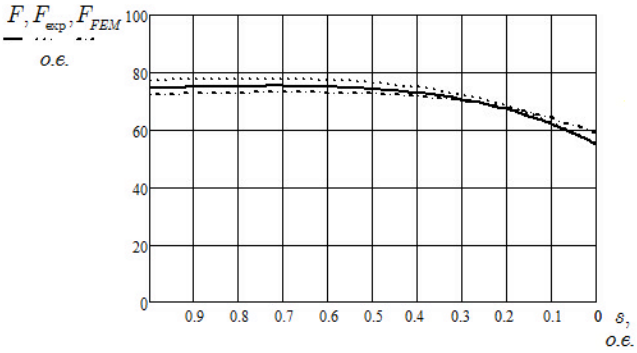

Рисунок 13 - Зависимость подъемного

усилия от скольжения

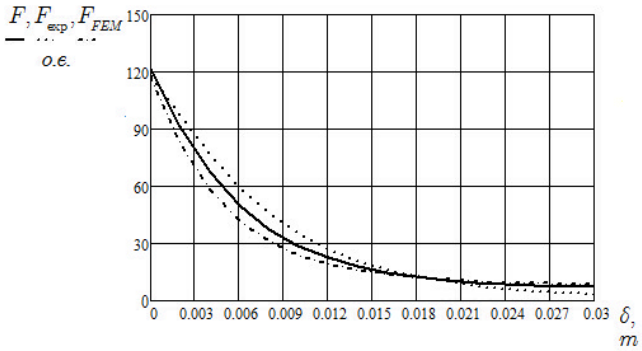

Рисунок 14 - Зависимость подъемного усилия от величины зазора

усилия от скольжения

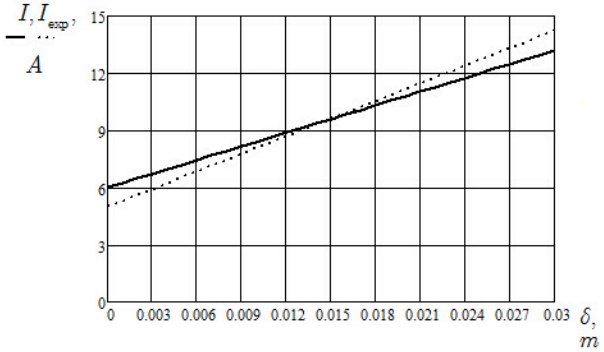

Рисунок 15 - Зависимость тока от величины зазора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретических и экспериментальных исследований электропривода с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока решены поставленные задачи и получены следующие результаты:

1. В результате проведения анализа особенностей магнитных систем многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока для исследования выбрана односторонняя конструкция двигателя, характеризующаяся созданием значительного подъемного усилия. При этом выявлено, что число фаз не оказывает принципиального влияния на конструктивные элементы двигателя. С увеличением числа фаз пропорционально снижается мощность на фазу, т.е. обеспечивается наращивание мощности асинхронного инверторного электропривода без увеличения числа параллельно включаемых силовых элементов автономного инвертора.

2. На основе математической модели многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока в установившихся режимах с учетом высших пространственных гармоник и числа фаз получены соотношения для определения основных величин, характеризующих электромагнитное поле в реальной машине, а также тягового и подъемного усилий. Выявлено, что увеличение числа фаз приводит к улучшению механических характеристик двигателя при неизменном исполнении вторичного элемента. Рациональное число фаз равно 9.

3. Введение коммутационных функций точек присоединения линий нагрузки в автономных инверторах позволяет: разделить управление инвертором со стороны источника питания и со стороны системы управления; сложное воздействие, каким является выходное напряжение инвертора, представить линейной комбинацией более простых функций; найти ток источника питания.

4. При помощи математической модели переходных процессов в многофазных линейных асинхронных двигателях поперечного потока в уравнениях состояния обобщенной машины исследованы динамические

режимы двигателя. Выявлено, что с увеличением числа фаз спектр пространственных гармоник сдвигается в область высоких частот, что является причиной снижение пульсаций тягового усилия на 12% для девятифазного двигателя, на 9% для шестифазного и на 7% для пятифазного по сравнению с трехфазным вариантом двигателя.

5. На основе имитационной модели электропривода с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока, проведен расчет характеристик электропривода с частотно-токовым управлением в установившихся и переходных режимах. В математической модели использовано приведение цепей переменного тока к цепи постоянного тока. Настройка контуров регулирования произведена по критерию модульного оптимума. Запас устойчивости по фазе в контуре тока увеличился с 23° до 65°. При единичном ступенчатом воздействии перерегулирование составило 4,3 %. Система является устойчивой к возмущающим воздействиям, таким как наброс нагрузки, а также синусоидальное воздействие.

6. При построении моделей в пакете программ MatLab, используются программируемые нелинейные блоки, значения которых получены при помощи математической модели двигателя в установившемся режиме на основе уравнений Максвелла.

7. Выполнены макетные образцы линейного асинхронного двигателя с поперечным замыканием магнитного потока. Проведены экспериментальные исследования. Количественная погрешность теоретического расчета величин не превышает 15%.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По списку ВАК

1. Никулин Н.А., Уравнения трехмерной модели электромагнитного поля многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным потоком / В.И. Иванчура, В. В. Суханов, Н.А. Никулин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университете имени академика М. Ф. Решетнева. / Гл. ред. Г. П. Беляков. – Красноярск: СибГАУ, выпуск 1 (22), ч. 1, 2009 г. - С. 11-14.

2. Никулин Н.А., Исследование электропривода с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока / В.И. Иванчура, В. В. Суханов, Н.А. Никулин // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университете имени академика М. Ф. Решетнева. / Гл. ред. Г. П. Беляков. – Красноярск: СибГАУ, выпуск 2 (23), 2009 г. - С. 157-161.

В других изданиях:

3. Никулин Н.А., Линейный асинхронный двигатель с поперечным магнитным полем / В. В. Суханов, Н.А. Никулин // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 12 / Под ред. С.И. Лукьянова. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. – 318 с. - С. 263-266.

4. Никулин Н.А., Многофазный линейный асинхронный двигатель с поперечным магнитным полем / В.И. Иванчура, В. В. Суханов, Н.А. Никулин //

Оптимизация режимов работы электротехнических систем: Межвуз. сборник / Отв. ред. С.Р. Залялеев. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 315 с. - С. 64-73.
5. Nikulin N.A., Multiphase linear induction motor with transverse flux V.I. Ivanchura, V.V. Suchanov, N.A. Nikulin, V.N. Yurdanova // Молодежь и наука: начало 21 века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. Ч. 3. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006 – 314 с. - С. 254-255.
6. Никулин Н.А., Пространственная картина магнитного поля многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком / В. В. Суханов, Н.А. Никулин // Политранспортные системы: материалы 4 Всеросс. науч.-техн. конф., Красноярск, 22-24 ноября 2006 г.: В 2 ч. Ч. 2 / ред. В.Н. Катаргин. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006 – 182 с. - С. 137-139.
7. Никулин Н.А., Многофазный линейный асинхронный двигатель с поперечным магнитным потоком для конвейерно-транспортных систем/ В.И. Иванчура, В. В. Суханов, Н.А. Никулин // Труды КГТУ: Научно –технический журнал Красноярского государственного технического университета / ред. С.А. Подлесный. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006 – №4. – 200с. - С. 81-84.
8. Никулин Н.А., Теоретическое исследование многофазного линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком / В.И. Иванчура, Н.А. Никулин // Наука. Технологии. Инновации // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Часть 3 -245 с. - С. 103-104.
9. Никулин Н.А., Аналитическое исследование электромагнитного поля в активном объеме многофазной линейной асинхронной машины / В. В. Суханов, Н.А. Никулин // Проблемы энергетики, электротехники и электротехнологии. Самара. – 2007. - С. 325-328.
10. Никулин Н.А., Трехмерная модель линейного асинхронного двигателя с поперечным магнитным потоком / В. В. Суханов, Н.А. Никулин // Сборник материалов V международной (XVI Всероссийской) научной конференции по автоматизированному электроприводу., Санкт-Петербург, 18-21 сентября 2007 г. - С. 213 – 215.
11. Nikulin N. Analysis of planar drive structure based on the principle of induction motor/ N. Nikulin, J. Zentner // 11th International Conference on New Actuators and Drive Systems., г. Бремен, Германия, 9 – 11 июня 2008 г. - С. 673 – 676.

Никулин Николай Анатольевич
Электропривод с многофазным линейным асинхронным двигателем поперечного потока
Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук
Подписано в печать 02.07.2009. Заказ №_____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.
Отпечатано в ИПК ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет"
660074, Красноярск, ул. Киренского, 28