

На правах рукописи

Беналлал Мохамед Наджиб

**ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМЫХ
ЛИНЕЙНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПРИ
ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.01 – электромеханика и электрические аппараты

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2004.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук,
профессор Коськин Ю. П.

Официальные оппоненты

Доктор технических наук
Тазов Г. В.
Кандидат технических наук
Федосов М. И.

Ведущее предприятие – филиал ОАО «Силовые машины» Электросила в Санкт-Петербурге

Защита состоится « » ноября 2004г в часов на заседании диссертационного совета К212.229.02 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ауд. 325. Главное здание.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан « » 2004г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Кандидат технических наук, доцент

Терешкин А. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Во всех развитых странах мира в настоящее время разрабатываются новые энергосберегающие технологии, основанные на применении короткозамкнутых асинхронных двигателей (к. з. АД) с частотным управлением (ЧУАД). В качестве преобразователей частоты (ПЧ) широко используются электронные ПЧ со звеном постоянного тока, формирование выходных сигналов в которых осуществляется посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Применение линейных АД (ЛАД) в электроприводах возвратно-поступательного движения обеспечивает упрощение кинематической схемы электропривода, повышение надежности, снижение механических потерь и ряд других преимуществ.

Совмещение ЛАД с ПЧ-ШИМ обеспечивает электроприводу указанные преимущества и, в тоже время, вызывает появление перенапряжений влияющих на эксплуатационную надежность механизмов с ЛАД.

Анализ опубликованных трудов, посвященных ЛАД, ЧУАД и перенапряжениям в электрических машинах, а также опыт, приобретенный автором при выполнении НИР в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 1998-2003гг., позволяют считать, что до самого последнего времени в электромеханике остаются актуальными и нерешенными задачи, связанные с особенностями частотного регулирования ЛАД с ПЧ-ШИМ, определения волновых параметров ЛАД и перенапряжений в индукторных обмотках ЛАД, зависимости перенапряжений от конструктивных особенностей ЛАД и их обмоток.

Актуальность темы подтверждается потребностями СПб метрополитена (хоздоговор № 5895/ЭМ и ЭМТ-116 от 12. 03.1998) и завода «Электросила» (хоздоговор № 6343/РАПС-48 от 1.04.03), с учетом которых решались задачи при подготовке диссертации.

Цель диссертационной работы: разработка методик расчета волновых параметров и перенапряжений в обмотках ЛАД небольшой и средней мощности при широтно-импульсной модуляции подводимого к ним напряжения

Основные задачи исследования

- Разработка математической модели ЧУЛАД, учитывающей конструктивные особенности обмоток, продольные краевые эффекты и взаимно-индуктивные связи;
- Разработка методики расчета волновых параметров ЛАД, учитывающей магнитное насыщение ферромагнитопроводов и вихревые токи в них;
- Выполнение компьютерного моделирования высокочастотных электромагнитных процессов в статорных обмотках ЛАД, отличающихся исполнением зубцово-пазовой зоны и способами включения компенсационных и основных катушек;
- Изготовление физических моделей ПЛАД и ЦЛАД и экспериментальная проверка предлагаемых методик расчета волновых параметров, перенапряжений и способов соединения катушек и образования параллельных ветвей в статорных обмотках ЛАД;
- Разработка рекомендаций, обеспечивающих повышение надежности ЛАД за счет уменьшения перенапряжений.

Метод исследования. В работе используется комплексный метод, включающий теоретическое исследование, имитационное моделирование и эксперимент. Теоретическое исследование основывается на современной теории электрических машин, основах матричного анализа электромеханических преобразователей, теории электромагнитного поля. Компьютерное моделирование и исследование волновых параметров и перенапряжений выполнено с применением программных комплексов MATLAB, MathCAD, Matematica, AG Graphic и др.

Экспериментальное исследование и доказательство адекватности полученных результатов осуществлено в лабораторных условиях на опытных образцах ЛАД с обработкой экспериментальных данных с применением программ Excel.

Научная новизна. Научная новизна диссертации заключается в учете особенностей однослойных и двухслойных обмоток, способов образования параллельных ветвей и включения компенсационных катушек ЛАД, а также магнитного сопротивления и вихревых токов ферромагнитопроводов при разработке методик расчета волновых параметров и перенапряжений в системе ПЧ-ШИМ-ЛАД. Получены новые экспериментальные данные по параметрам и перенапряжениям, учитывающие особенности взаимодействия электромагнитных волн рабочей частоты и высоких частот, обусловленных ШИМ подводимого к обмоткам напряжения.

Практическая ценность состоит в следующем:

- Разработаны рекомендации, позволяющие повысить надежность ЧУЛАД на стадии их проектирования;
- Разработаны методики расчета волновых индуктивностей ЛАД, соответствующие высоким частотам электромагнитных процессов в обмотках при ШИМ напряжения;
- Сформулированы алгоритмы и предложены математические модели, обеспечивающие расчет перенапряжений в ЛАД различных конструктивных модификаций.

Апробация работы. Основные положения и результаты были представлены и обсуждены на 2-ой международной конференции «Электромеханика и электротехнологии» МКЭЭ-98, Россия, г. Клязьма, 14-18 сентября 1998г; 4-ой международной конференции по нетрадиционным электромеханическим и электрическим системам «UEES-99», Россия, Санкт-Петербург, 21-24 июня 1999 г; первой международной конференции по мехатронике и робототехнике «МиР' 2000», Санкт-Петербург, 29 мая – 2 июня 2000 г; внутривузовских научно-технических конференциях, а также на научных семинарах кафедры электромеханики и электромеханотроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 печатных работы: тезисы и два доклада на международных научных конференциях и одно учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из пяти разделов, заключения и списка литературы, включающего 148 наименований. Основная часть работы изложена на 120 страницах машинописного текста. Работа также содержит 63 страницы с рисунками и таблицами.

Содержание работы

В первом разделе обоснована актуальность темы диссертации, выполнен обзор

состояния теории ЛАД, рассмотрены особенности частотного регулирования АД с применением ПЧ-ШИМ и опубликованные методики расчета волновых параметров. Установлено, что разработка и экспериментальная проверка теории ЧУЛАД с ПЧ-ШИМ, связанной с волновыми процессами и перенапряжениями в статорных обмотках ЛАД является актуальной научно-технической задачей.

Во втором разделе разрабатывается математическая модель ЧУЛАД с ПЧ-ШИМ, учитывающая особенности статорных обмоток ЛАД, взаимно-индуктивные связи между фазами и катушками, а также особенности работы ПЧ-ШИМ.

Уравнения составляются при следующих общих допущениях:

1. Считается, что ПЧ-ШИМ формирует на выходе трехфазную систему напряжений, образующуюся из трапецеидальных импульсов;
2. Соединительная кабель рассматривается как однородная длинная линия;
3. Статорная обмотка ЛАД рассматривается как линия с распределенными параметрами и считается линейной цепью.
4. Статорные обмотки и компенсационные катушки располагаются в ЛАД, образуя симметрированную трехфазную систему;
5. Магнитное поле в активной зоне ЛАД при частотах регулирования является бегущим полем и определяет степень магнитного насыщения цихтованной стали сердечников.

Установлено, что на фазу ЛАД подаются трапецеидальные импульсы с длительностью фронта $t_{\phi} \sim 5 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-4}$ с, которым соответствуют значения эквивалентной частоты волновых процессов $f_{\text{экв}} = (5 - 20)$ кГц.

Рассматриваются известные модификации плоских (ПЛАД) и цилиндрических (ЦЛАД) линейных АД с однослойными и двухслойными обмотками и компенсационными катушками (КК), применение которых было обосновано в работах А. И. Вольдека.

Конструктивные оболочки ЛАД учитываются при определении волновых параметров. Особенности статорных обмоток ЛАД и наличие КК учитываются при составлении эквивалентных схем замещения и в математических моделях ЛАД (Рис.1).

На схеме катушки трех фаз представлены через их эквивалентные волновые параметры: r_m – эквивалентное активное сопротивление витков катушки, учитывающее потери в меди; r – активное сопротивление, учитывающее потери в стали; L – эквивалентная индуктивность катушки; C – поперечная емкость (емкость катушки на корпус); G – поперечная проводимость учитывающая потери в изоляции; K – продольная (межвитковая) емкость; n, k – начало и конец катушки.

Индекс $n = 1, 2 \dots N$ соответствует номеру катушки в фазе обмотки статора ЛАД. Сочетания nA, nB, nC учитывают принадлежность катушек к разным фазам. Считается, что взаимные индуктивности между катушками $M_{nAB} = M_{nBA}$, $M_{nAC} = M_{nCA}$, $M_{nBC} = M_{nCB}$.

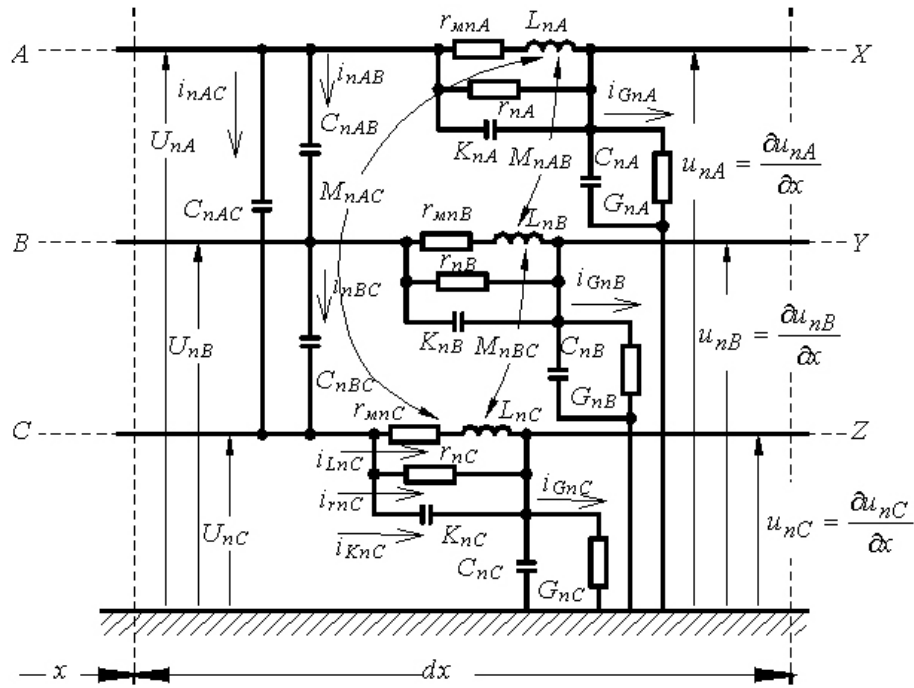


Рис. 1

Схеме рис. 1 соответствуют матричные уравнения ЛАД как цепи с распределенными параметрами

$$-\frac{\partial \mathbf{u}_n}{\partial x} = \left(\mathbf{L}_n \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{i}_{Ln} + \mathbf{r}_{mn} \mathbf{i}_{Ln} = \mathbf{r}_n \mathbf{i}_{rn}; \quad (1)$$

$$-\frac{\partial \mathbf{i}_n}{\partial x} = \left[(\mathbf{C}_n + 2\mathbf{C}_{nn}) \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{G}_n \right] \mathbf{u}_n - \mathbf{C}_{nn} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u}'_n - \mathbf{u}''_n). \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) параметры \mathbf{L}_n , \mathbf{r}_{mn} , \mathbf{r}_n , \mathbf{C}_n , \mathbf{G}_n , \mathbf{C}_{nn} являются квадратными матрицами.

Тензорам напряжений в уравнении (1) соответствуют матрицы-столбцы:

$$\mathbf{u}_n = \begin{vmatrix} \mathbf{u}_{nA} \\ \mathbf{u}_{nB} \\ \mathbf{u}_{nC} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{u}_{nA} = \begin{vmatrix} u_{1A} \\ \dots \\ u_{NA} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{u}_{nB} = \begin{vmatrix} u_{1B} \\ \dots \\ u_{NB} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{u}_{nC} = \begin{vmatrix} u_{1C} \\ \dots \\ u_{NC} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Определение емкостных токов между фазами производится, используя матрицы-столбцы напряжений:

$$\mathbf{u}'_n = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_{nB} \\ \mathbf{u}_{nC} \\ \mathbf{u}_{nA} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{u}''_n = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_{nC} \\ \mathbf{u}_{nA} \\ \mathbf{u}_{nB} \end{Bmatrix}, \quad (4)$$

в которых матрицы \mathbf{u}_{nA} , \mathbf{u}_{nB} и \mathbf{u}_{nC} определяются по ур. (3).

Фазные напряжения определяются по уравнениям:

$$u_{AX} = \sum_{n=1}^{N_A} u_{nA}; \quad u_{BY} = \sum_{n=1}^{N_B} u_{nB}; \quad u_{CZ} = \sum_{n=1}^{N_C} u_{nC}. \quad (5)$$

Используемая в работе матричная модель трехфазного ЛАД отличается от известных возможностью учета неодинаковых волновых параметров компенсационных и основных катушек, а также взаимных индуктивных и емкостных связей между катушками разных фаз.

Модель кабеля, соединяющего ЛАД с ПЧ, как цепи с распределенными параметрами, составляют матричные уравнения

$$-\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} = \mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial t} + \mathbf{r} \mathbf{i} \quad (6)$$

$$-\frac{\partial \mathbf{i}}{\partial x} = \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{G} \mathbf{u} \quad (7)$$

где \mathbf{L} , \mathbf{C} , \mathbf{r} , \mathbf{G} – матрицы эквивалентных параметров кабеля;

\mathbf{u} , \mathbf{i} – матрицы-столбцы напряжений и токов.

В третьем разделе разрабатываются методики расчета магнитных и электрических волновых параметров ЛАД при следующих допущениях:

- Учитывается, что в стали сердечников одновременно имеют место основной магнитный поток и потоки рассеяния, соответствующие рабочей частоте, и высокочастотные магнитные потоки, обусловленные ШИМ напряжения в преобразователе частоты. Считается, что магнитное насыщение и проницаемость стали обуславливаются, главным образом, потоками рабочей частоты (частоты регулирования).
- Двойное намагничивание не позволяет считать $\mu_{cm} = \infty$ при расчете индуктивностей и реальное насыщение учитывается через величину μ_{cm} , определяемую из расчета магнитной цепи ЛАД, осуществляемого по обычным методикам.
- Вихревые токи, возникающие в стали из-за высокочастотных волновых магнитных потоков, уменьшают сечения участков магнитной цепи, по которым замыкаются эти потоки, увеличивают соответствующие магнитные сопротивления и уменьшают индуктивности.
- Токи высокой частоты, обусловленные ШИМ напряжения, образуют в обмотках и других контурах трехфазные системы и подчиняются тем же законам, что и трехфазные токи основной частоты.

- Считается, что частота волновых процессов равняется $f_{эКВ} = \frac{1}{2t_{\phi}}$, где t_{ϕ} –

время нарастания импульса напряжения. При этой частоте производится первоначальный расчет волновых параметров. После компьютерного моделирования и определения фактической частоты f_{en} значения параметров уточняются, используя методики последовательных приближений.

Получено уравнение магнитного поля в воздушном зазоре ЦЛАД в виде

$$b = b_s + b_1 + b_2 = B_s \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} z + \alpha_s \right) \right] + \dot{B}_1 \exp \left(-\frac{z}{\alpha_1} \right) \exp \left[j \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau_l} z \right) \right] + \dot{B}_2 \exp \left(\frac{z}{\alpha_2} \right) \exp \left[j \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau_l} z \right) \right] \quad (8)$$

В ур. (8) первое слагаемое определяет основную бегущую волну; второе слагаемое – затухающая волна, движущаяся в положительном направлении оси z ; третье слагаемое – затухающая и движущаяся в обратном направлении волна.

Волна индукции \dot{B}_1 возникает из-за разомкнутости сердечника индуктора со стороны входа, \dot{B}_2 – из-за разомкнутости сердечника со стороны выхода. Обе волны характеризуют продольный краевой эффект (ПрКЭ) и имеют угловую частоту ω , равную частоте источника питания.

Уравнение (8) позволяет рассчитывать обычным образом результирующие магнитные потоки в стали сердечников, учитывая добавочные потоки от ПрКЭ. По результирующим МДС и потокам находятся магнитные проницаемости, потокосцепления и индуктивности катушек, находящихся в зонах действия ПрКЭ. Установлено, что влияние ПрКЭ на индуктивности катушек является практически одинаковым для ПЛАД и ЦЛАД.

Расчет L и M осуществляется с учетом магнитной проницаемости стали, действия вихревых токов и наличия в ферромагнитных экранах воздушных промежутков-щелей. Получено, что в расчетах следует ориентироваться на значения $\bar{\mu}_{cm} = 500 - 1500$.

Для учета вихревых токов используется коэффициент

$$K_{\text{ВТ}} = \frac{\sqrt{2}}{kd} \sqrt{\frac{ch kd - \cos kd}{ch kd + \cos kd}} \quad (9)$$

где d – толщина листа стали; $k = \sqrt{\frac{\omega \mu \gamma}{2}}$ – волновое число; $\omega = 2\pi f_{\text{en}}$.

При расчете волновых параметров используются зависимости $K_{\text{ВТ}}$ от f_{en} и $\bar{\mu}_{cm}$, представленные на рис.2

В работе рассматриваются низковольтные ЛАД со всыпными обмотками и полузакрытыми пазами трапецеидальной и овальной форм. Указанные пазы заменяются (Рис. 3) круглыми пазами с тем, чтобы иметь возможность выполнить в общем виде аналитическое исследование по оценке влияния ферромагнитных

материалов и вихревых токов в них на волновые индуктивности.

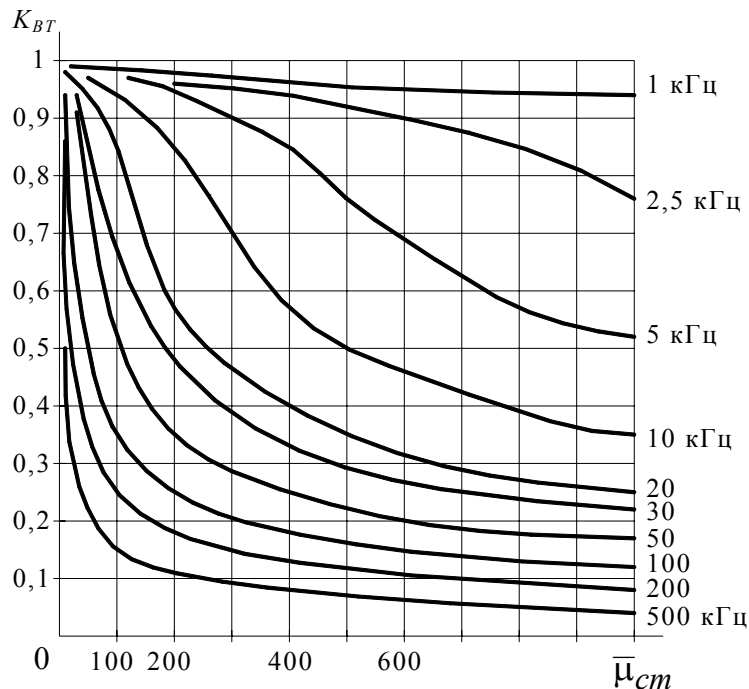


Рис. 2

В расчетах используется метод эквивалентного массивного провода, ток в котором, ввиду весьма высокого значения частоты $f_{вп}$, распределяется равномерно в тонком слое вблизи поверхности.

Магнитные потоки внутри эквивалентных и реальных проводов и их влияние на собственные и взаимные индуктивности не учитывается.

Предполагается, что направляющие системы–волноводы, каковыми являются стенки пазов и сплошные конструктивные оболочки вокруг лобовых частей обмоток, можно рассматривать как электромагнитные экраны. В результате вносимые ими собственные ΔL и взаимные ΔM индуктивности находятся как добавки к индуктивностям, определенным без учета экранирования.

Ферромагнитные экраны в виде ряда оболочек с радиусами $R_1 = R_{эн}$, R_2 , $R_3 \dots R_e$ имеют толщины $h_{э1}$, $h_{э2} \dots h_{эe}$. Число экранирующих оболочек и их толщины зависят от конструкции паза. Магнитная проницаемость стали определяется из расчета магнитной цепи ЛАД по основному магнитному потоку.

Используя закон полного тока в одномерном приближении, получены выражения для эквивалентных магнитных проводимостей $\lambda'_э$. Для экранов без щелей в виде:

$$\lambda'_э = \frac{\mu_{стэ}}{2\pi} \ln \frac{R_{э+1}}{R_э} \quad (10)$$

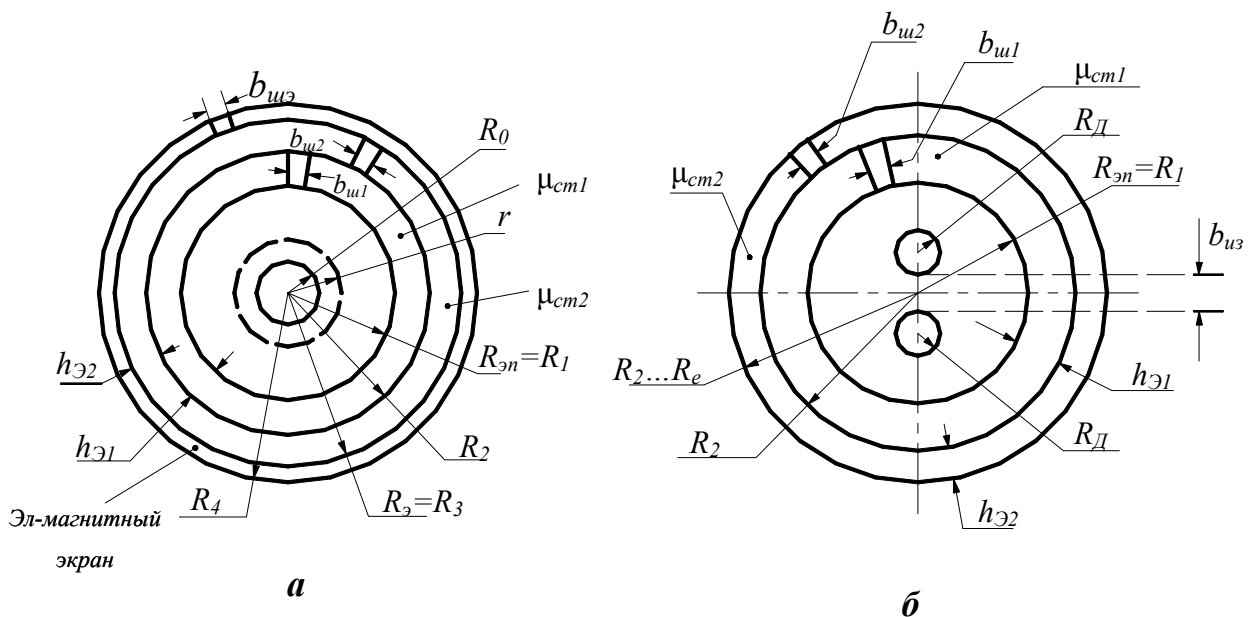


Рис. 3. Эквивалентные расчетные схемы пазов с однослойной (а) и двухслойной (б) обмотками

и со щелями

$$\lambda_{\mathcal{E}}'' = \frac{\mu_{\text{экв}\mathcal{E}}'' \ln \frac{R_{\mathcal{E}+1}}{R_{\mathcal{E}}}}{2\pi} \quad (11)$$

где $\mu_{\text{экв}\mathcal{E}}'' = \frac{\bar{\mu}_{\text{ст}\mathcal{E}} \mu_0}{\bar{\mu}_{\text{ст}\mathcal{E}} \bar{b}_{\text{щ}\mathcal{E}} + \bar{l}_{\text{ст}\mathcal{E}}}$ – эквивалентная магнитная проницаемость \mathcal{E} – того ферромагнитного экрана с одной щелью длиной $b_{\text{щ}}$; $\mu_{\text{ст}\mathcal{E}} = \bar{\mu}_{\text{ст}\mathcal{E}} \cdot \mu_0$ – магнитная проницаемость стали \mathcal{E} – того экрана; на любом расчетном радиусе $r_{\mathcal{E}}$ в пределах $R_{\mathcal{E}} \dots R_{\mathcal{E}+1}$ выдерживается условие $b_{\text{щ}} + l_{\text{ст}\mathcal{E}} = 2\pi r_{\mathcal{E}}$, а безразмерные величины отвечают равенствам:

$$\bar{l}_{\text{ст}\mathcal{E}} = \frac{l_{\text{ст}\mathcal{E}}}{2\pi r}, \bar{b}_{\text{щ}\mathcal{E}} = \frac{b_{\text{щ}\mathcal{E}}}{2\pi r}, \bar{b}_{\text{щ}\mathcal{E}} + \bar{l}_{\text{ст}\mathcal{E}} = 1$$

Влияние $b_{\text{щ}}$ на $\mu_{\text{экв}}$ и, следовательно, эквивалентную магнитную проводимость и индуктивность обмотки проявляется сильнее с увеличением $\mu_{\text{ст}}$.

В случае составных экранов с несколькими щелями в ур. (11) вместо $\mu_{\text{экв}}''$ используется $\mu_{\text{экв}}'''$, определяемая по формуле $\mu_{\text{экв}\mathcal{E}}''' = \frac{\mu_0}{\Gamma_{\mathcal{E}}}$, где $\Gamma_{\mathcal{E}} = \sum_{j=1}^{j_{\text{щ}}} \left(\frac{\bar{l}_{\text{ст}\mathcal{E}j}}{\bar{\mu}_{\text{ст}\mathcal{E}j}} + \bar{b}_{\text{щ}\mathcal{E}j} \right)$ –

безразмерный коэффициент, учитывающий геометрические и магнитные параметры участков, составляющих экран; j – номер участка в i -том экране; $j_{\text{щ}}$ – число щелей в j -том экране.

Полная магнитная проводимость на единицу длины одной катушечной стороны, находящейся в пазу, равняется

$$\lambda_{kn} = \lambda_{изн} + \sum_{i=1}^{i=\varepsilon} \lambda_{\varepsilon i} \quad (12)$$

где $\lambda_{изн}$ – эквивалентная магнитная проводимость изоляции внутри паза, ε – число расчетных экранирующих оболочек-экранов. По аналогичным формулам определяются магнитные проводимости лобовых частей катушек.

Для расчета взаимных индуктивностей разработаны методики, учитывающие расстояния между соседними катушками в катушечной группе, между катушечными группами внутри фазы и между фазами.

Взаимные индуктивности M_{ii} между катушками одной катушечной группы в пазу определяются значениями эквивалентных взаимных проводимостей $\lambda_{i2}, \lambda_{i3}, \dots, \lambda_{iq}$, в каждой из которых к суммарной круговой проводимости катушечной стороны, определяемой по ур. (10) – (12), добавляется магнитная проводимость прямолинейных участков равных t_1 для $q=2$, $2t_1$ для $q=3$ и $(q-1)t_1$ для любого q .

Проводимость прямолинейного участка $(q-1)t_1$ между катушечными сторонами внутри катушечной группы определяется по формуле

$$\lambda_{\varepsilon q} = \mu_0 \bar{R}_\varepsilon \left(\frac{\bar{R}_{\varepsilon+1}}{\bar{R}_\varepsilon} - 1 \right) \frac{[2 - \bar{b}_{ц\varepsilon} (1 - \bar{\mu}_{см\varepsilon})]}{\bar{\mu}_{см\varepsilon}} \quad (13)$$

где $\bar{R}_\varepsilon = \frac{R_\varepsilon}{t_1}$; $\bar{R}_{\varepsilon+1} = \frac{R_{\varepsilon+1}}{t_1}$; $\bar{b}_{ц\varepsilon} = \frac{b_{ц\varepsilon}}{t_1}$, t_1 – зубцовое деление.

Разработанные алгоритмы допускают возможность расчета λ , используя практически любые конфигурации (не только круговые и прямолинейные) путей для волновых потоков.

Волновые индуктивности определяются через число эффективных проводов u_{II} в пазу и эквивалентные проводимости. Приводимые в диссертации формулы учитывают действие вихревых токов, а также сокращение шага в двухслойных обмотках. Значения магнитной индукции в местах расположения КК определяются с учетом ПрКЭ.

Электрические волновые параметры определяются известными способами.

Переход от полных сопротивлений и проводимостей катушек к эквивалентным параметрам на единицу длины, используемым в матричных моделях раздела 2 осуществляется или путем деления соответствующего параметра катушки на длину ее провода или параметра фазы – на число последовательно соединенных катушек в фазе. В последнем случае в качестве координаты x используется n – порядковый номер катушки.

В четвертом разделе осуществляется компьютерное исследование волновых параметров и перенапряжений.

Расчеты выполняются с применением программных комплексов “MATLab+Simulink” с пакетом расширения “Power system blockset”, предназначенным для моделирования электротехнических и энергетических устройств.

Анализ расчетных данных позволяет выявить некоторые закономерности

изменения волновых параметров в зависимости от мощности и схем обмоток АД, а также f_{en} .

- Активное сопротивление меди r_m катушки двухслойной обмотки уменьшается по сравнению с однослойной из-за уменьшения W_K . С увеличением числа пазов активное сопротивление катушки также уменьшается. То же происходит в случае увеличения числа параллельных ветвей и мощности машины.
- Индуктивность $L_{K\partial}$ катушки двухслойной обмотки уменьшается по сравнению с L_{KO} однослойной. С увеличением числа пазов АД также уменьшается индуктивность катушки. В случае увеличения числа параллельных ветвей индуктивность эквивалентной катушки увеличивается. При увеличении мощности машины индуктивное сопротивление катушки уменьшается.
- Сопротивление r , эквивалентное потерям в стали на одну катушку двухслойной обмотки меньше, чем в однослойной обмотке. С увеличением числа пазов Z_1 , эквивалентное сопротивление r катушек также уменьшается. В случае увеличения числа параллельных ветвей эквивалентное сопротивление r увеличивается. При увеличении мощности машины эквивалентное сопротивление r катушек уменьшается.
- Продольная емкость катушки K_K в двухслойных обмотках увеличивается по сравнению с однослойными обмотками. С увеличением числа пазов АД, продольная емкость катушки также увеличивается. В случае увеличения числа параллельных ветвей продольная емкость катушки увеличивается.
- В двухслойной обмотке поперечная емкость катушки на корпус C_K уменьшается по сравнению с однослойной. С увеличением числа пазов Z_1 , поперечная емкость катушки на корпус также уменьшается. В случае увеличения числа параллельных ветвей поперечная емкость практически постоянна. При увеличении мощности машины продольная емкость катушки незначительно увеличивается.
- В двухслойной обмотке эквивалентное сопротивление на корпус r_K увеличивается по сравнению с однослойной. С увеличением числа Z_1 пазов r_K также увеличивается. В случае увеличения числа параллельных ветвей эквивалентное сопротивление на корпус практически не изменяется. При увеличении мощности машины эквивалентное сопротивление на корпус немного уменьшается.
- С увеличением f_{en} волновая индуктивность L_K уменьшается, поперечная емкость C_K уменьшается. Потери в стали и r увеличиваются. Активное сопротивление катушек увеличивается.

Взаимные индуктивности и емкости изменяются при изменении основных обмоточных данных и геометрии ЛАД также, как и собственные волновые емкости и индуктивности катушек.

Компьютерное моделирование системы ПЧ-ШИМ – кабель – ЛАД осуществлено с представлением ЛАД в виде модели с тремя фазами, соединенными в звезду.

При изменении схемы включения катушек, числа параллельных ветвей, схемы включения фаз соответственно изменяется вид компьютерной модели. Трапецеидальные импульсы создаются генераторами импульсов и интегратором.

Результаты моделирования представлены в виде таблиц и графиков.

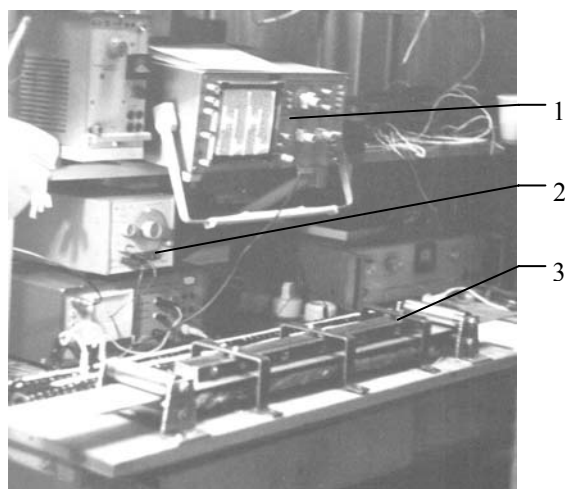
Анализ расчетных данных показывает, что уменьшение крутизны фронта t_ϕ резко увеличивает перенапряжения U_{mk} ; увеличение C_K приводит к увеличению U_{mk} ; изменение K_K практически не сказывается на U_{mk} ; увеличение r_{mk} и r повышает U_{mk} ; повышенные значения L_K и междуфазных емкостей сопровождаются увеличением U_{mk} ; с увеличением числа катушек в фазе перенапряжения уменьшаются.

Практически во всех рассмотренных вариантах значений и сочетания волновых параметров максимальные перенапряжения имеют место на первой или двух первых катушках фазы.

Установлено, что ЧУЛАД целесообразно проектировать, ориентируясь на увеличение Z_1 и уменьшение числа параллельных ветвей в фазах. Увеличение мощности АД сопровождается уменьшением амплитуд перенапряжений. При компоновке системы ПЧ-ЛАД следует уменьшать длину кабеля. Также необходимо добиваться уменьшения емкости обмоток на землю, увеличивая расстояние между обмотками и подшипниковыми щитами и усиливая корпусную изоляцию.

Для уменьшения перенапряжений в ЧУАД целесообразно применять двухслойные обмотки.

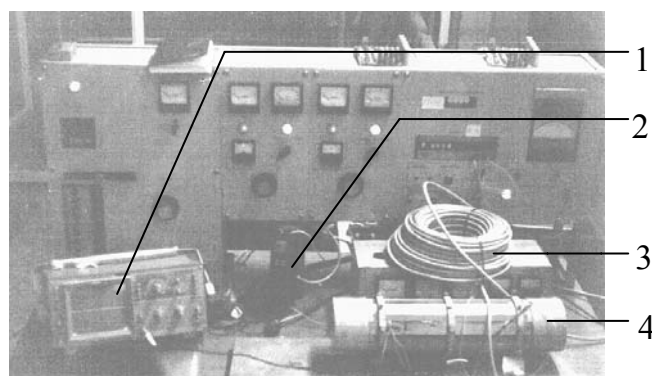
В пятом разделе описывается экспериментальная установка с ПЛАД (рис. 4, а) и ЦЛАД (рис. 4, б) и анализируются данные экспериментальных исследований волновых параметров и перенапряжений.



а)

а) 1- осциллограф, 2- генератор импульсов, 3- ПЛАД

б) 1- осциллограф, 2- ПЧ-ШИМ, 3- кабель, 4- ЦЛАД



б)

Рис.4

В ПЛАД предусматриваются: легкость разборки и переключений; съемные ферромагнитные экраны вокруг лобовых частей статорной обмотки; съемный сердечник ротора; легко заменяемые электропроводящие полосы (бегун) из алюминия, латуни, меди; выводы от всех катушек двухслойной обмотки статора.

Экспериментальная установка также включает:

ПЧ-ШИМ типа MOVITRAC 0508-231-1; соединительный кабель NYM длиной 50 м; осциллограф двухлучевой С1-96; двухлучевой С1-65А и др.

Для измерения волновых параметров и оценки распределения перенапряжений используются: измеритель Е7-11 (на частоте 1000 Гц) и цифровой L-C измеритель МУ6243 (на частоте 900 Гц). Качественные зависимости параметров от частоты сняты с помощью Е7-11 в режиме «Внешний генератор» при изменении частоты в диапазоне 0,1– 100 кГц. Обработка результатов опытов производится на компьютере Pentium(R) II 400 МГц.

Эксперимент подтвердил принципиальную правильность разработанных методик расчета собственных и взаимных индуктивностей и емкостных параметров ЛАД. Расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 10-15%. Указанную погрешность можно считать допустимой, учитывая трудность измерения индуктивностей в диапазоне 1-100 кГц изменения частоты волновых процессов.

Экспериментальная оценка влияния вида схем обмоток и экранов на значения собственных и взаимных индуктивностей показала, что использование теории волноводов и пренебрежение междуфазными взаимно-индуктивными связями при исследовании перенапряжений приводит к значительным погрешностям. Сердечник ротора увеличивает индуктивности в 2-3 раза, а электропроводящие полосы-бегуны уменьшают индуктивности на 20-30%.

Получено, что индуктивности лобовых частей обмоток составляет значительную долю (до 40%) в полной индуктивностей обмоток ПЛАД. На значения лобовых собственных и взаимных индуктивности значительное влияние оказывают конструктивные оболочки (подшипниковые щиты), выполняющие роль ферромагнитных экранов. Устранение ЛФМЭ изменяет индуктивности на 15-20%.

При обработке экспериментального материала разработана методика последовательного переключения числа катушек в фазах статорных обмоток и расчета средних и локальных внутрифазных и междуфазных взаимных индуктивностей.

Установлено, что значения междуфазных емкостей соизмеримы со значениями емкостей обмоток на корпус и ими нельзя пренебрегать в расчетах перенапряжений.

Экспериментально подтверждена значительная зависимость волновых индуктивностей от частоты волновых процессов. В ПЛАД с ферромагнитными сердечниками статора и ротора при переходе от 1 кГц к 100 кГц индуктивности уменьшаются на 20- 70%.

Эксперимент подтвердил возможность использования разработанных матричных моделей для исследования волновых перенапряжений при ШИМ напряжения в ЧУЛАД. Погрешность расчета перенапряжений доходит до 10-15%.

Заключение

В соответствии с целью и задачами диссертационной работы проведены теоретические и экспериментальные исследования ЧУЛАД с ПЧ-ШИМ. Основными результатами научных исследований, выполненных автором, являются:

1. Произведен аналитический обзор литературы по состоянию разработок частотно управляемых ЛАД и исследованию и расчету перенапряжений в ЛАД с ПЧ-ШИМ. Интерес к проблеме перенапряжений сохраняется как в

- электроэнергетике, где решаются задачи расчета и ограничений перенапряжений в генераторах и линиях электропередачи, так и электромеханике, где особую остроту приобретают задачи, связанные с применением ПЧ-ШИМ в системах электропривода и электромехатроники. Показано, что тема и задачи, решаемые в диссертации являются актуальными, т.к. расчет волновых перенапряжений и параметров ЦЛАД и ПЛАД, учитывающий конструктивные особенности ЛАД и обмоток, не обеспечен необходимыми методиками и экспериментальными данными.
2. Рассмотрены особенности конструкции и электрических схем статорных обмоток ЛАД и предложены конструктивные и электрические расчетные схемы, обеспечивающие математическое описание волновых электромагнитных процессов и расчет эквивалентных параметров схем замещения ЛАД. Составлены матричные уравнения ЛАД, учитывающие возможность применения в машинах с разомкнутым магнитопроводом компенсационных катушек, изменение числа параллельных ветвей в фазах, учет междофазных индуктивных и емкостных связей.
 3. Рассмотрены опубликованные методики расчета волновых параметров АД и обоснована целесообразность внесения в них дополнений, связанных с учетом магнитной проницаемости стали, вихревых токов и конструктивных особенностей статорных обмоток ЛАД. Предложено учитывать магнитную проницаемость стали сердечников, определяя ее значение из расчета магнитной цепи ЛАД при частотном регулировании. Разработана методика расчета магнитных проводимостей катушек и индуктивностей ЛАД, основанная на теории многослойных экранов с воздушными промежутками. Предлагается использовать для учета влияния вихревых токов формулу для коэффициента K_{BT} . Установлены значения магнитной проницаемости стали и частоты $f_{\text{вн}}$ волновых процессов, при которых нельзя пренебрегать воздействием вихревых токов.
 4. Выполнено компьютерное моделирование и анализ волновых параметров и перенапряжений ЛАД с ПЧ-ШИМ. Установлена зависимость волновых параметров от факторов, связанных с разомкнутостью магнитопроводов ЛАД. Показана и оценена роль междофазных индуктивностей и емкостей в расчетах перенапряжений. Установлено, что включенные перед основными дополнительные катушки ослабляют перенапряжения на основных катушках, но не влияют на положение амплитуды перенапряжения, соответствующее двум первым основным катушкам.
 5. Установлена зависимость амплитуд волновых перенапряжений от схемы статорной обмотки: в однослойных обмотках и в обмотках с $a > 1$ отрицательная роль перенапряжений усиливается.
 6. Спроектированная при выполнении работы модель ПЛАД отличается от известных возможностью осуществления переключений в статорных обмотках, образуя фазы из разного числа катушек и катушечных групп и изменяя числа параллельных ветвей. Модель позволила экспериментально подтвердить правильность разработанных методик и результатов компьютерного моделирования волновых параметров и

перенапряжений. Погрешность расчетов, используя предлагаемые модели и методики, составляет 10-15%.

7. Предложены методики расчета средних и локальных значений взаимных индуктивностей и емкостей, основанные на эксперименте с последовательным увеличением числа катушек в фазах статорных обмоток. Методики позволили экспериментально подтвердить расчетные значения волновых параметров и, в принципе, обеспечивают оптимизацию статорных обмоток.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Коськин Ю.П., Осипов П. П., Беналлал М. Н. Особенности теории и технологий тихоходных линейных асинхронных двигателей, совмещенных с преобразователями частоты // Тезисы докладов МКЭЭ-98, Россия, Клязьма, изд. МЭИ, 1998, том III, с. 153.
2. Осипов П. П., Беналлал М. Н. О критериях устойчивой работы частотно-управляемых линейных асинхронных двигателей // Труды 4-ой международной конференции по нетрадиционным электромеханическим и электрическим системам «UEES' 99», Россия, С-Петербург, 21-24 июня 1999, том III, с. 1363-1366.
3. Коськин Ю.П., Беналлал М. Н., Герайбах З. М. Электромеханотроника и мехатронные системы // Труды первой международной конференции по мехатронике и робототехнике «МиР' 2000»: Сб. трудов. СПб.: НПО Омега, 2000, т.2, с. 146-151.
4. Коськин Ю.П., Беналлал М. Н. Перенапряжения в частотно-управляемых линейных асинхронных двигателях. Учебное пособие. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003, 4 п. л.