

На правах рукописи

Ватаев Андрей Сергеевич

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ И
ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ**

Специальность 05.09.01– электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург–2009 г.

Работа выполнена на кафедре «Электрические машины» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Попов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Коськин Юрий Павлович

кандидат технических наук
Кади-Оглы Евгений Федорович

Ведущая организация: ОАО «Силовые машины» филиал «Электросила»

Защита состоится « 11 » декабря 2009 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Главное здание, ауд. 325.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важной современной тенденцией развития промышленности и транспорта является внедрение энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий. К их числу относится широкое применение частотно-регулируемых электроприводов на базе асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором и преобразователей частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения. Этому способствуют высокий КПД, простота конструкции и надежность АД, а также возможность реализовывать с помощью ПЧ и встроенной в него системы управления эффективные с точки зрения экономии электроэнергии алгоритмы управления двигателем.

Известно, что для достижения высоких энергетических и эксплуатационных показателей частотно-регулируемых электроприводов необходимо, чтобы частота модуляции напряжения, формируемого ПЧ, была высокой, т.к. в этом случае уменьшаются несинусоидальность кривой выходного тока ПЧ и, как следствие, потери в АД от высших гармоник. Вместе с тем, увеличение частоты модуляции приводит к возрастанию потерь в самом ПЧ. Частично это можно предотвратить за счет использования быстродействующих транзисторов с малым временем переключения. Однако, при этом происходит значительное снижение длительности (до 100–500 нс) фронта импульсов ШИМ, формируемых ПЧ, в результате чего в обмотке статора АД возникают высокочастотные электромагнитные процессы и перенапряжения, которые являются причиной ускоренного старения изоляции и снижения срока службы АД. Следует учесть и тот факт, что при подключении АД к ПЧ через кабель длиной более 50-100 м (например, в электроприводах морских буровых установок, погружных насосов и т.д.) из-за явлений преломления и отражения волн напряжения в кабеле величина перенапряжений в обмотке статора АД увеличивается практически в два раза.

Исследования высокочастотных электромагнитных процессов, проведенные в работах В.Я. Беспалова, К.Н. Зверева, Ю.П. Коськина, А. Moreiro, В.С. Оуеогоке и др. позволили разработать методы защиты обмотки статора АД от перенапряжений, которые в основном сводятся к установке фильтров, увеличивающих длительность фронта импульса и снижающих высшие гармоники напряжения. Однако, из-за высокой стоимости фильтров (до 80% стоимости ПЧ) и необходимости подбора их характеристик в зависимости от параметров АД, ПЧ и кабеля возникает потребность в разработке рекомендаций по снижению перенапряжений в обмотке статора АД путем изменения ее волновых параметров. Для линейных АД такого рода рекомендации были разработаны в СПбГЭТУ под

руководством Ю.П. Коськина. Вместе с тем, в силу различий в конструкции линейных АД и АД традиционного исполнения, эти рекомендации следует дополнить и адаптировать применительно к АД традиционного исполнения. Поэтому исследования высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжений в обмотке статора частотно-регулируемого АД при питании его от ПЧ с ШИМ являются **актуальной** научно-технической задачей.

Цель работы и задачи исследования. Целью настоящей работы является исследование высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжений в частотно-регулируемых АД традиционного исполнения и разработка на этой основе рекомендаций по снижению перенапряжений в обмотке статора АД путем соответствующего выбора ее конструкции, материалов и параметров.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие научно-технические **задачи**:

- 1) Выполнить экспериментальные исследования распределения напряжения по обмотке статора АД традиционного исполнения при подаче на нее импульсов напряжения с крутым фронтом.
- 2) Разработать математическую модель обмотки статора АД, более полно учитывающую особенности амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристик реальной обмотки в области высоких частот.
- 3) Разработать методику расчета параметров схемы замещения обмотки статора на основе использования экспериментальных данных.
- 4) Провести анализ влияния отдельных параметров схемы замещения обмотки на величины перенапряжений в ней.
- 5) Выполнить моделирование высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжений в обмотке статора АД традиционного исполнения при подключении обмотки к ПЧ с ШИМ напряжения непосредственно и через питающий кабель.
- 6) Разработать рекомендации по снижению перенапряжений в обмотке статора АД традиционного исполнения путем соответствующего выбора ее конструкции, материалов и параметров.

Методы исследований. При решении поставленных задач были использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Теоретические методы, основывающиеся на базовых положениях теоретических основ электротехники и теории электрических машин, реализованы с помощью программных пакетов MathCad, Matlab, а также системы имитационного моделирования Simulink Power System Blockset, входящей в пакет Matlab.

Экспериментальные исследования были проведены на специально разработанных на кафедрах электрических машин СПбГПУ и робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ стендах для линейного АД и АД традиционного исполнения. Обработка результатов эксперимента проведена с помощью программ MS Excel и Matlab.

Научная новизна:

- Разработана усовершенствованная схема замещения обмотки статора АД с постоянными параметрами структура которой, позволяет более полно учитывать особенности АЧХ и ФЧХ реальной статорной обмотки двигателя в области высоких частот.
- Исследовано влияние отдельных параметров схемы замещения на величину перенапряжений в обмотке.

Практическая ценность:

- Уточнена методика определения параметров схемы замещения обмотки статора АД на основе использования экспериментальных данных.
- Сформулированы рекомендации по выбору конструкции, материалов и параметров обмотки статора АД традиционного исполнения малой мощности с целью снижения перенапряжений в обмотке статора АД при питании от инвертора с ШИМ напряжения.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов исследований высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжений в обмотке статора АД, а также использованием современных методов численного анализа высокочастотных электромагнитных процессов.

На защиту выносятся следующие положения:

- Разработанная методика определения параметров схемы замещения обмотки статора на основе использования экспериментальных данных.
- Усовершенствованная схема замещения обмотки статора АД с постоянными параметрами, структура которой позволяет учитывать особенности АЧХ и ФЧХ реальной статорной обмотки в области высоких частот.
- Результаты выполненных численных и экспериментальных исследований перенапряжений в обмотке статора, оценки влияния отдельных параметров схемы замещения на величину перенапряжений в обмотке и практические рекомендации по их снижению.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 9 работ. Из них 2 в журналах, рекомендованных ВАК.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты работы докладывались на Всероссийских межвузовских научно-технических конференциях студентов и аспирантов "XXXV" и "XXXVI неделя науки СПбГПУ" (Санкт-Петербург, 2006г., 2007г.); XI и XII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2007г., 2008г.); 1-й Международной научной конференции «Автоматизация, Энергетика, Компьютерные технологии» (Псков, 2007г.); Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2007г.)

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 91 наименования и 8 приложений. Работа содержит 188 страниц, включая 84 рисунка и 60 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи планируемых исследований.

В первой главе на основе обзора литературы дан анализ современного состояния экспериментальных и расчетных исследований высокочастотных электромагнитных процессов в обмотках электрических машин, питаемых от ПЧ с ШИМ. Отмечено, что основными объектами такого рода исследований являлись до настоящего времени машины средней и большой мощности. Вместе с тем, практически отсутствуют результаты экспериментальных исследований перенапряжений в АД малой мощности со всплывшими однослойными концентрическими обмотками, хотя эти машины наиболее часто подключают к ПЧ с ШИМ в системах электроприводов общепромышленного назначения.

Отмечено, что разработка рекомендаций по снижению перенапряжений применительно к АД традиционного исполнения существенно затруднена с одной стороны в силу недостаточности экспериментальных данных о характере протекания высокочастотных электромагнитных процессов в обмотках этих машин, а с другой стороны – вследствие ограниченности используемых в большинстве численных исследований однофазных математических моделей обмотки, не позволяющих учитывать в полной мере взаимные индуктивные и емкостные связи между катушками, а также особенности АЧХ и ФЧХ обмотки в области высоких частот. Если учет взаимных связей между катушками при применении однофазной модели обмотки частично возможен при использовании волновых параметров, определяемых на основе эксперимента, то задача учета

АЧХ и ФЧХ обмотки в области высоких частот остается практически нерешенной вследствие того, что применяемые методы (организация итерационных процессов) неэффективны из-за низкой точности и значительных затрат машинного времени.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям импульсных перенапряжений в обмотке. Исследование выполнено на экспериментальной установке, созданной на кафедре электрических машин СПбГПУ. В качестве объекта исследования выбран типовой АД серии АО2-41-4 со всыпной однослойной концентрической обмоткой статора. Для проведения эксперимента к выводам катушек обмотки статора исследуемого АД подключали измерительные кабели. Машины с таким типом обмотки наиболее часто работают с ПЧ общепромышленного назначения, и исследование перенапряжений в их статорных обмотках имеет высокую практическую ценность.

Представлены результаты экспериментальных исследований распределения напряжения по обмотке при подаче импульсов напряжения как на одну фазу, так и на все три фазы, соединенные в звезду при изолированной и заземленной нейтрали. Установлено, что при подаче на обмотку статора АД импульса напряжения с малой длительностью фронта на катушках обмотки возникают перенапряжения, величина которых зависит от длительности фронта импульса и длины провода катушки. В качестве примера на рис. 1 приведены кривые изменения напряжения на катушках обмотки статора АД АО2-41-4 при подаче на

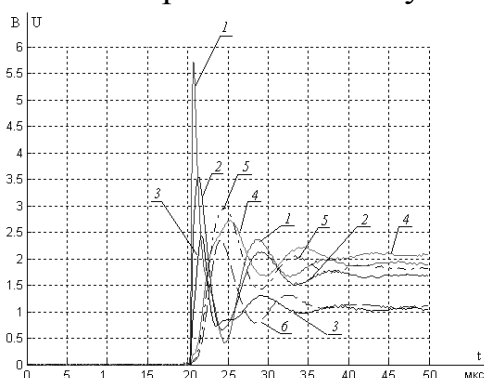


Рис. 1. Кривые изменения напряжений на катушках обмотки. Амплитуда импульса 10 В. Цифрами обозначены номера катушек, считая от начала обмотки.

нее импульса амплитудой 10 В с длительностью фронта 0,3 мкс

Выявлено, что при малой длительности фронта максимальные перенапряжения возникают на первой катушке, что ранее отмечалось в работах Г.Н. Петрова, А.И. Абрамова, В.Я. Беспалова, К.Н. Зверева, Доан Ань Туана, В.С. Оуекоке и др. Наряду с этим показано, что частота периодических составляющих кривых

напряжения на катушках уменьшается по направлению к нейтрали. Увеличение длительности фронта импульса приводит к снижению перенапряжений, причем на первой катушке они уменьшаются более значительно чем на остальных. Так, при увеличении длительности фронта с 0,3 до 6,3 мкс перенапряжения на первой

катушке АД АО2-41-4 уменьшались почти в 3 раза, тогда как на последней только на 20%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что возникновение перенапряжений в АД со вспой обмоткой связано с изменением гармонического состава кривой напряжения при его прохождении по обмотке.

Также было обнаружено, что максимальные по величине перенапряжения возникают при подаче импульсов в обмотку с концентрическими катушками со стороны катушки с меньшей длиной провода.

Выявлено, что в случае подключения одной фазы обмотки с заземленной нейтралью к источнику импульсного напряжения воздействия на изоляцию будут выше, чем при соединении трех фаз в звезду. Незначительное расхождение (около 5 %) установившихся и пиковых значений напряжения на катушках позволяет сделать вывод о том, что вместо трех фаз, соединенных в звезду достаточно ограничиться рассмотрением одной фазы при заземленной нейтрали. Важно отметить, что в данном случае амплитуда импульса входного напряжения должна быть на треть меньше чем при соединении фаз в звезду. Полученные результаты позволяют значительно упростить расчетные модели, используемые для исследования распределения напряжения по обмоткам.

В третьей главе рассмотрены существующие методы расчета перенапряжений в обмотке статора АД при питании от ПЧ с ШИМ.

Показано, что большинство методов расчета перенапряжений основано на использовании однофазных моделей обмотки, построенных на базе однородной и линейной схемы замещения ее участка, структура которой представлена на рис.2.

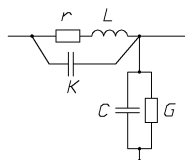


Рис.2 Структурная схема замещения участка обмотки АД единичной длины для анализа импульсных процессов.

L - индуктивность участка обмотки с учетом собственной и взаимной индуктивности проводников, Гн/м; r - активное сопротивление участка обмотки с учетом потерь в стали, Ом/м; K - продольная емкость между смежными элементами участка обмотки (витками, катушками и т.д.), Ф·м; C - емкость проводников участка обмотки относительно корпуса Ф/м; G - активная проводимость, эквивалентная электрическим потерям в корпусной изоляции См/м.

Составленная для указанной схемы замещения система дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в обмотке, имеет вид:

$$\begin{cases} -\frac{\partial i}{\partial x} = GU + C \frac{\partial U}{\partial t} \\ -\frac{\partial U}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} + LK \frac{\partial^3 U}{\partial x \partial t^2} + r \cdot i + rK \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial t} \end{cases} \quad (1)$$

Решение системы (1) для высокочастотных электромагнитных процессов в обмотке статора АД, питаемого от ПЧ с ШИМ, было впервые получено в работах, проведенных в МЭИ под руководством В.Я. Беспалова. Однако, в виду того, что в этих работах импульс ШИМ был представлен в виде линейной комбинации экспонент, полученные результаты недостаточно полно учитывают особенности частотных характеристики обмотки в области высоких частот. В диссертации решения системы (1) с учетом указанных характеристик, получены с помощью аналитических методов (операторного и разделения переменных), а также численного метода переменных состояния. Установлено, что для учета особенностей частотных характеристик обмотки при использовании аналитических методов рационально применять разложение кривой питающего напряжения в ряд Фурье. Определять параметры схемы замещения и рассчитывать распределение напряжения следует по отдельности для каждой гармоники входного напряжения.

Решение системы (1), полученное методом разделения переменных, имеет вид:

$$U(t, x) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{U_m \sin(\omega_m t) x}{l} + \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \varphi_k(t) \sin(v_k x) \right), \quad (2)$$

где $v_k = \frac{\pi k}{l}$, $k = 1, 3, 5, \dots$, U_m – амплитуда гармоники с номером m , ω_m – угловая частота гармоники, рад/с, l – длина провода обмотки, м, $\varphi_k(t)$ – вспомогательная функция для пространственной гармоники порядка k , которая определяет характер изменения амплитуды гармоники напряжения во времени и имеет вид:

$\varphi_k(t) = e^{-\sigma_k t} (A_{1k} \cos(\zeta_k t) + A_{2k} \sin(\zeta_k t)) + A_{3k} \sin(\omega t) + A_{4k} \cos(\omega t)$, $\varphi_k(t) = e^{-\sigma_k t} (A_{1k} e^{\zeta_k t} + e^{-\zeta_k t}) + A_{3k} \sin(\omega t) + A_{4k} \cos(\omega t)$, $\varphi_k(t) = A_{1k} e^{-\sigma_k t} + A_{3k} \sin(\omega t) + A_{4k} \cos(\omega t)$ соответственно при $a_{2k}^2 - 4a_{1k}a_{3k} < 0$, $a_{2k}^2 - 4a_{1k}a_{3k} > 0$ и $a_{2k}^2 - 4a_{1k}a_{3k} = 0$

где $a_{1k} = LKv_k^2 + LC$, $a_{2k} = RKv_k^2 + CR + LG$, $a_{3k} = v_k^2 + RG$, $\sigma_k = \frac{a_{2k}}{2a_{1k}}$,

$\zeta_k = \frac{\sqrt{a_{2k}^2 - 4a_{1k}a_{3k}}}{2a_{1k}}$, A_{1k} , A_{2k} , A_{3k} , A_{4k} – постоянные, определяемые по формулам:

$$A_{3k} = \frac{\frac{2}{\pi k} U_m \cos(\pi k) (a_{1k} CL \omega_m^4 - (a_{1k} GR - a_{2k} (RC + LG) + a_{3k} CL) \omega_m^2 + GR a_{3k})}{(a_{2k} \omega_m)^2 + (a_{3k} - a_{1k} \omega_m^2)^2} \quad (3)$$

$$A_{4k} = \frac{\frac{2}{\pi k} U_m \cos(\pi k) \omega_m (a_{3k}(RC + LG) + \omega_m^2 (a_{1k}(GL + CR) - a_{2k}CL) - a_{2k}GR)}{(a_{2k}\omega_m)^2 + (a_{3k} - a_{1k}\omega_m^2)^2}. \quad (4)$$

При $a_{2k}^2 - 4a_{1k}a_{3k} > 0$ постоянные A_{1k} , A_{2k} определяются по формулам $A_{1k} = -0.5(A_{3k}\omega_m + A_{4k}(\sigma_k + \zeta_k)) \cdot \zeta_k^{-1}$, $A_{2k} = 0.5(A_{3k}\omega_m + A_{4k}(\sigma_k - \zeta_k)) \cdot \zeta_k^{-1}$, при $a_{2k}^2 - 4a_{1k}a_{3k} < 0$ — $A_{1k} = -A_{4k}$ и $A_{2k} = -(A_{3k}\omega_m + A_{4k}\sigma_k) \cdot \zeta_k^{-1}$, а если $a_{2k}^2 - 4a_{1k}a_{3k} = 0$, то $A_{1k} = -A_{4k}$.

Решение системы (1), полученное операторным методом имеет вид:

$$U(p, x) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{U_m \omega_m}{(p^2 + \omega_m^2)} \frac{sh(\gamma(p) \cdot x)}{sh(\gamma(p) \cdot l)}, \quad (5)$$

где $\gamma(p) = \sqrt{(pL + r)(pC + G)(p^2KL + pKr + 1)^{-1}}$ — коэффициент распространения. Для перехода от операторного изображения к его оригиналу необходимо использование теоремы разложения.

Опыт использования аналитических методов для расчета перенапряжений в обмотке статора АД показал, что недостатками этих методов являются сложность их реализации при усложнении структуры схемы замещения, необходимость обособленного решения дифференциального уравнения для расчета тока в обмотке статора, а также возможность их использования только при исследовании электромагнитных процессов в обмотке статора АД, подключенной непосредственно к ПЧ. Перечисленных недостатков лишены численные методы расчета, в частности метод переменных состояния. При расчете напряжения с помощью указанного метода обмотку представляют в виде цепной схемы, число звеньев которой равно числу последовательно соединенных витков или катушек обмотки. В этом случае уравнения состояния, записанные для звена схемы замещения обмотки с номером m и структурой, представленной на рис. 2, при непосредственном подключении ПЧ к АД имеют вид:

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} = \frac{I_m - I_{m+1}}{Cdx} - \frac{G}{C} u_m, \quad \frac{\partial I_{1m}}{\partial t} = \frac{uK_m - I_{1m}rdx}{Ldx}, \quad \frac{\partial uK_m}{\partial t} = \frac{(I_m - I_{1m})dx}{K},$$

где u_m — напряжение на конденсаторе поперечной ветви C , B , I_{1m} — ток в продольной ветви, содержащей индуктивность, A , uK_m — напряжение на конденсаторе продольной ветви K , B , $I_m = (u_{m-1} - u_m - uK_m)(r_0 dx)^{-1}$ — входной ток звена с номером m , A , r_0 — добавочное сопротивление, подключаемое последовательно на входе в звено и используемое для улучшения сходимости и ограничения величины входного тока.

Таким образом, с помощью численных методов удобно рассчитывать распределение напряжения в обмотках АД, являющихся частью сложных электротехнических систем, например при подключении кабелей, других обмоток

и т.д. Кроме того, при использовании этих методов расчет тока значительно упрощается, т.к. уравнение для его определения входит в общий алгоритм расчета напряжения. Вместе с тем, для учета особенностей частотных характеристик обмотки в области высоких частот при использовании численных методов целесообразно применять схемы замещения с постоянными параметрами и структурой, позволяющей учитывать особенности указанных характеристик.

В четвертой главе рассмотрены вопросы построения структуры схемы замещения обмотки статора АД, используемой при моделировании высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжений, а также представлена методика расчета ее параметров.

Предлагаемая методика расчета параметров схемы замещения катушки обмотки статора АД на основе результатов эксперимента является развитием методики, разработанной в СПбГЭТУ под руководством Ю.П. Коськина. В разработанной в диссертации методике фаза обмотки статора представлена в виде цепной схемы с числом звеньев равным числу последовательно соединенных катушек в фазе. Структурная схема замещения каждого из звеньев цепи имеет вид, представленный на рис. 2. Исходными данными для расчета являются частотные зависимости эквивалентных активного R_s и реактивного X_s сопротивлений фазы обмотки АД, определенные при подключении измерителя иммитанса ее к началу и концу, а также эквивалентных активного сопротивления R_p и реактивной проводимости Y_p фазы, полученные при подключении измерителя между корпусом и началом фазы при изолированной нейтрали. Частотные зависимости параметров схемы замещения катушки за исключением продольной емкости K , которая считается постоянной во всем рассматриваемом частотном диапазоне (1 кГц – 1 МГц), задаются в соответствии с формулами:

- для емкости поперечной ветви:

$$C(f) = A + B \cdot (1 + f^2 D)^{-1} \quad (6)$$

- для активного сопротивления продольной ветви:

$$r(f) = A(0.001f)^B, \quad (7)$$

- для активной проводимости поперечной ветви:

$$G(f) = (A + B \lg(f) + E \lg^2(f) + D \lg^3(f))^{-1}, \quad (8)$$

- для индуктивности продольной ветви:

$$L(f) = A(B + Q \cdot (2\pi f \cdot T)^{-2}) + D \lg(f) + E, \quad (9)$$

$$L(f) = A + B \lg(f) + E \lg^2(f) + D \lg^3(f), \quad (10)$$

где A, B, D, E, T, Q – постоянные, определяемые по опытным данным в процессе расчета.

Следует заметить, что формулы (6) и (7) являются известными, а (8)–(10) предложены впервые.

На основе (6) – (10) рассчитываются зависимости эквивалентных сопротивлений R_s , X_s , R_p и проводимости Y_p фазы от частоты, определяется среднеквадратичное отклонение расчетных значений R_s , X_s , R_p и Y_p от экспериментальных во всем рассматриваемом частотном диапазоне. После этого заданные частотные зависимости параметров катушки корректируются с целью минимизации указанного отклонения.

Отметим, что отличительной особенностью разработанной методики от методик МЭИ, СибНИИЭ и СПбГЭТУ, где параметры фазы рассчитываются аналитически, является имитационное моделирование эксперимента в системе Power System Blockset и расчет с ее помощью частотных зависимостей R_s , X_s , R_p и Y_p комплексным методом. Это позволяет автоматизировать указанные расчеты и повысить их точность.

Расчет параметров катушки по данной методике был проведен для АД традиционного исполнения АО2-41-4, а также для плоского линейного АД (ПЛАД), разработанного в СПбГЭТУ под руководством Ю.П. Коськина. Было выявлено, что при использовании формулы (9) для аппроксимации частотной зависимости индуктивности катушки обмотки АД традиционного исполнения, а формулы (10) – для аппроксимации частотной зависимости индуктивности катушки ПЛАД, имеет место более точное совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей R_s , X_s , R_p и Y_p от частоты. Так, с помощью разработанной методики получены следующие эмпирические частотные зависимости параметров схемы замещения катушки АД АО2-41-4:

- активного сопротивления продольной ветви, Ом

$$r(f) = 33(0.001f)^{0.4}; \quad (11)$$

- индуктивности продольной ветви, Гн:

$$L(f) = 3 \cdot 10^{-4} \cdot \left(1.08 + 4.5 \cdot (2\pi f \cdot 0.49 \cdot 10^{-5})^{-2}\right) + 2.5 \cdot 10^{-4} \lg(f) + 0.0015; \quad (12)$$

- продольной емкости, Ф:

$$K(f) = 90 \cdot 10^{-11} = const; \quad (13)$$

- емкости поперечной ветви, Ф:

$$C(f) = 409.2 \cdot 10^{-12} + 30.8 \cdot 10^{-12} \cdot \left(1 + (0.001f)^2\right)^{-1}; \quad (14)$$

- активной проводимости поперечной ветви, См:

$$G(f) = \left(9.04 \cdot 10^6 + 3.52 \cdot 10^7 \lg(f) - 2.01 \cdot 10^7 \lg^2(f) + 2.76 \cdot 10^6 \lg^3(f)\right)^{-1}. \quad (15)$$

При $f > 5300$ Гц $G(f) = 3.9 \cdot 10^{-7} = const.$

Соответствующие расчетные и экспериментальные значения X_s , R_s , Y_p и R_p отличаются на 30 – 40%, что более чем в два раза ниже, чем при их определении с

помощью методов, описанных в литературе.

Выполненное на примере АД АО2-41-4 исследование влияния отдельных параметров схемы замещения обмотки статора на величину перенапряжений в ней позволило установить, что при уменьшении поперечной емкости обмотки в 2 раза величина перенапряжений уменьшается на 22%, а при таком же увеличении продольной емкости и индуктивности перенапряжения снижаются на 17 и 1% соответственно. Уменьшение активного сопротивления продольной ветви схемы замещения приводит к возрастанию перенапряжений на последней катушке обмотки, а изменение величины проводимости поперечной ветви на величину перенапряжений практически не влияет.

Было также исследовано также влияние конструкции обмотки статора на величину перенапряжений. Это позволило, наряду с подтверждением эффективности известных рекомендаций по снижению перенапряжений в обмотках линейных АД и АД традиционного исполнения (применение двухслойных обмоток, увеличение числа пазов статора, усиление корпусной изоляции), рекомендовать ряд дополнительных мер по снижению перенапряжений в обмотке статора АД традиционного исполнения. Так, в частности, предложено:

- использовать однослойные обмотки с равной длиной проводников, что позволило, например, уменьшить перенапряжения на первой катушке АД АО2-41-4 на 11%;
- применять корпусную изоляцию с низкой диэлектрической проницаемостью - уменьшение ее на 20% привело к снижению перенапряжений на первой катушке указанного АД на 7%
- использовать провода с усиленной изоляцией и классом нагревостойкости F или H.

Следует, однако, отметить, что полученные формулы (11) – (15) непосредственно могут быть использованы только в аналитических методах расчета, где для учета особенностей частотных характеристик обмотки статора применяют разложение кривой входного напряжения в ряд Фурье и расчет распределения напряжения проводится отдельно для каждой гармоники. В то же время, как уже отмечалось, при использовании численных методов данный подход не является рациональным из-за значительного возрастания затрат машинного времени, а поэтому становится целесообразным применение схем замещения катушек с постоянными параметрами и структурой, позволяющей учитывать особенности частотных характеристик обмотки. В настоящей работе

предложена такого рода схема замещения катушки, которая может быть использована при расчетах перенапряжений численными методами. Ее структура представлена на рис. 3. Здесь особенности АЧХ и ФЧХ обмотки учтены путем использования в поперечной ветви схемы замещения системы параллельно – последовательно соединенных активных сопротивлений и конденсаторов, а в продольной ветви – системы последовательно-параллельно соединенных активных сопротивлений и индуктивностей.

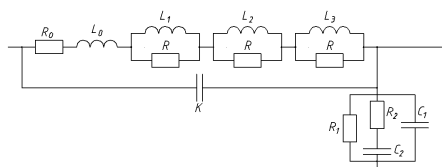


Рис. 3. Схема замещения катушки АД с постоянными параметрами, применяемая для расчета распределения напряжения по обмотке численными методами

Сравнение частотных зависимостей эквивалентных емкости и активной проводимости поперечной ветви, рассчитанных с использованием приведенной на рис. 3 схемы замещения и определенных по (14) и (15), показало, что среднее значение отклонения между ними не превышает 15 %. Вместе с тем, отклонение активно-индуктивных параметров продольной ветви, рассчитанных по (11) и (12) и определенных с использованием рассматриваемой схемы замещения, составляет примерно 30 - 40%. Полученные значения погрешностей в определении параметров схемы замещения катушки являются, однако, допустимыми, так как расчет перенапряжений с этих случаев обеспечивается с точностью, приемлемой для инженерных расчетов.

В **пятой главе** рассмотрены результаты проведенных с помощью системы имитационного моделирования Power System Blockset и численных исследований распределения напряжения по обмотке статора АД АО2-41-4 при импульсных электромагнитных процессах. Так, расчет распределения напряжения по обмотке статора исследуемого АД при соединении фаз обмотки в звезду и треугольник показал, что при соединении в треугольник пиковые значения напряжений, полученные на третьей и четвертой катушках фазы, конец которой подключен к той фазе, концы которой замкнуты транзисторами ПЧ накоротко, в 1,5 раза выше, чем при соединении фаз в звезду. На последней катушке фазы, начало которой подключено к короткозамкнутой фазе, пиковое значение напряжения, полученное при соединении в треугольник в 5 раз выше, чем при соединении в звезду.

При изучении влияния числа параллельных ветвей обмотки на величину перенапряжений было установлено, что увеличение числа параллельных ветвей приводит к возрастанию перенапряжений. Так, для АД АО2-41-4 увеличение числа параллельных ветвей с 1 до 2 ведет к возрастанию пикового значения

напряжения на первой катушке на 7%, на второй и третьей - на 71%, а на четвертой - почти в 2 раза.

Исследование перенапряжений в обмотке статора АД АО2-41-4 при подаче на нее импульсов ШИМ с различной частотой модуляции и длительностью фронта непосредственно и через кабель показало, что величина перенапряжений, возникающих на первой катушке при подаче импульса, приблизительно на 60 % выше, чем величина перенапряжений, возникающих после снятия импульса. Установлено, что при высокой частоте модуляции на величину перенапряжений оказывает влияние соотношение длительностей импульсов ШИМ и пауз между ними. Например, при длительности фронта импульса 0,3 мкс и частоте модуляции 25 кГц напряжения на первой катушке, определенные при непосредственной подаче на обмотку импульсов длительностью 10 и 90 % периода ШИМ отличаются на 15%, а при подаче их через кабель длиной 100 м - на 31 %. При частоте модуляции 1 кГц указанные значения напряжений, рассчитанные при наличии и отсутствии кабеля, практически равны. Поскольку при использовании ШИМ напряжения соотношения длительностей импульса и паузы непрерывно меняются, то воздействия на изоляцию обмотки при высокой частоте модуляции и наличии достаточно длинного кабеля могут периодически возрастать. Для борьбы с этим явлением необходимо уменьшать длину кабеля или же использовать ПЧ с меньшим значением частоты модуляции.

Реализация разработанной математической модели обмотки и сопоставление результатов численных исследований с экспериментальными данными показали ее адекватность при расчете импульсных перенапряжений, возникающих в обмотке статора АД традиционного исполнения при подаче на нее импульсов от ПЧ с ШИМ. Расхождение между экспериментальным и расчетным пиковыми значениями напряжений на первой катушке обмотки статора АД АО2-41-4 составляет 5%, а на второй – 33%. Данные значения погрешностей можно считать допустимыми, поскольку с наибольшей точностью определяются напряжения на первой катушке, которая является наиболее опасным участком обмотки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решены следующие научно-технические задачи исследования высокочастотных электромагнитных процессов и перенапряжений в обмотке статора АД малой мощности, питаемого от инвертора с ШИМ напряжения.

1. Выполнены экспериментальные исследования перенапряжений в обмотке статора АД традиционного исполнения малой мощности. Экспериментально

обоснована возможность при расчетных оценках перенапряжений ограничиться рассмотрением электромагнитных процессов в одной фазе с заземленной нейтралью вместо трех фаз, соединенных в звезду. Установлено, что возникновение перенапряжений в АД малой мощности связано с изменением гармонического состава кривой питающего напряжения, причем максимальные по величине перенапряжения возникают при подаче импульса в обмотку со стороны катушки с меньшей длиной провода.

2. Предложена усовершенствованная схема замещения обмотки статора АД с постоянными параметрами и структурой, позволяющей более точно учитывать особенности частотных характеристик статорной обмотки реального АД в области высоких частот.
3. Разработана методика расчета параметров схемы замещения обмотки статора АД на основе экспериментально определенных АЧХ и ФЧХ обмотки статора реального АД с использованием системы имитационного моделирования Power System Blockset.
4. Проведена оценка влияния отдельных параметров схемы замещения обмотки на величины перенапряжений в ней. Показано, что наиболее заметно перенапряжения снижаются при уменьшении емкости поперечной ветви.
5. Проведено численное исследование влияния соотношения длительностей импульсов ШИМ и пауз между ними на величину перенапряжений в обмотке статора частотно-регулируемого АД традиционного исполнения при подключении обмотки к ПЧ с ШИМ непосредственно и через питающий кабель. Выявлено, что при высокой частоте модуляции увеличение длительности импульса приводит к возрастанию перенапряжений. Указанное возрастание тем сильнее, чем больше длина кабеля. В связи с тем, что при использовании ШИМ напряжения соотношения длительностей импульса и паузы непрерывно меняются, рассмотренные воздействия на изоляцию обмотки также являются периодическими. При уменьшении частоты модуляции и длины кабеля воздействия на изоляцию, вызванные периодическим возрастанием напряжения, ослабляются.
6. Сформулированы рекомендации по снижению перенапряжений в статорных обмотках АД традиционного исполнения малой мощности, ориентированные на:
 - а) изменение волновых параметров обмотки статора путем:
 - применения двухслойных обмоток вместо однослойных. Там где использование подобных обмоток по технико-экономическим

- соображениям нецелесообразно, необходимо использовать однослойные шаблонные обмотки с равной длиной проводников;
- увеличения числа пазов статора до максимально возможного и уменьшение числа эффективных проводников в катушке (в пазу);
 - использования материалов для изготовления корпусной изоляции с меньшим значением диэлектрической проницаемости;
 - увеличения толщины корпусной изоляции. Этот способ следует применять с осторожностью из-за ухудшения теплового состояния обмотки статора;
 - применения проводов с усиленной изоляцией и классом нагревостойкости F или H. Использование этих проводов приводит к незначительному (менее 5%) снижению перенапряжений, однако повышенное значение пробивного напряжения изоляции таких проводов способствует увеличению срока службы частотно-регулируемого АД из-за более высокой устойчивости к воздействию перенапряжений.
- б) использование схем соединения, позволяющих уменьшить напряжения на катушках обмотки посредством:
- подключения АД с однослойной всыпной концентрической обмоткой к ПЧ со стороны катушки с большей длиной провода (это требует соответствующей маркировки выводов АД на производстве);
 - соединения фаз обмотки статора АД в звезду и отказ от использования соединения в треугольник;
 - уменьшения числа параллельных ветвей в обмотке статора АД.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Ватаев А.С. К проблеме расчета импульсных перенапряжений в обмотке статора асинхронного электродвигателя при питании от инвертора с широтно-импульсной модуляцией / А.С. Ватаев // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования / ОЭЭП РАН – ИХС РАН. – СПб., 2006. – Вып.7. – С. 117-126.
2. Ватаев А.С. Исследование импульсных перенапряжений в обмотке статора асинхронного двигателя при питании от инвертора с широтно-импульсной модуляцией / А.С. Ватаев, В.В. Попов // XXXV Неделя науки СПбГПУ: материалы Всерос. межвузовской научно-техн. конф. студентов и аспирантов. / СПбГПУ. – СПб., 2007. – Ч.2. – С. 44-45.
3. **Ватаев А.С. Расчет импульсных перенапряжений в обмотке статора асинхронного электродвигателя при питании от инвертора с широтно-**

импульсной модуляцией /А.С. Ватаев, В.В. Попов, И.И. Талья // Научно-технические ведомости СПбГПУ.– СПб., 2007. – № 2. – С. 203-207.

4. Ватаев А.С. Исследование влияния свойств и конструкции изоляции на характер распределения импульсов напряжения по обмотке статора асинхронного двигателя, питаемого от инвертора с широтно-импульсной модуляцией / А.С. Ватаев // Автоматизация, энергетика, компьютерные технологии: Сборник научных трудов. – Псков, 2007.– Вып. 1. – С. 102-106.
5. Ватаев А.С.. К проблеме экспериментального определения параметров схемы замещения обмотки статора асинхронного электродвигателя при анализе импульсных перенапряжений / А.С. Ватаев, В.В. Попов // Наука и инновации в технических университетах: материалы Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб., 2007. – С. 19-20.
6. Ватаев А.С. К проблеме математического моделирования импульсных перенапряжений в обмотке статора асинхронного двигателя при его питании от инвертора с широтно-импульсной модуляцией напряжения / А.С. Ватаев, В.В. Попов // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: материалы XI Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. / СПбГПУ. – СПб., 2007. – С. 525-526.
7. Ватаев А.С. Определение параметров схемы замещения обмотки статора асинхронного электродвигателя при анализе импульсных процессов на основе экспериментальных данных / А.С. Ватаев, В.В. Попов // XXXVI Неделя науки СПбГПУ: материалы Всерос. межвузовской научно-техн. конф. студентов и аспирантов. / СПбГПУ. – СПб., 2008. – Ч.2. – С. 59-60.
8. Ватаев А.С. Расчет распределения напряжения по обмотке статора асинхронного электродвигателя, питаемого от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения через длинный кабель / А.С. Ватаев // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: материалы XII Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. / СПбГПУ. – СПб., 2008. – С. 165-166.
9. **Ватаев А.С. Напряжения в обмотке статора асинхронного электродвигателя при питании от инвертора с широтно-импульсной модуляцией напряжения через длинный кабель / А.С. Ватаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ.– СПб., 2008. – № 3. – С. 252-256.**