

На правах рукописи

Стрижков Анатолий Михайлович

**Реактивный двигатель
и методы регулирования его момента и скорости**

05.09.03 — электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск — 2007

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Низкоскоростной электропривод занимает важное место в современной электротехнике. По данным различных источников уровень использования низкоскоростных приводов с частотой вращения 10–300 об/мин в станочном оборудовании превышает 85%; в области вспомогательного электропривода в энергетике — 70%; в робототехнике составляет около 100% и т. д. Большая потребность в низкоскоростных приводах ощущается в автомобильной и аэрокосмической технике.

Традиционно получение низких частот вращения осуществлялось за счет применения понижающего редуктора и исполнительного двигателя с требуемыми энергетическими характеристиками. Главные достоинства такого подхода — универсальность, отработанные методики проектирования и наличие комплектующих, которые выпускаются крупными сериями. Все это находит отражение в низких ценах на готовые изделия.

Однако применение понижающей механической передачи почти всегда приводит к снижению качественных характеристик электропривода, прежде всего — к снижению ресурса работы. Кинематическая погрешность прямозубых и червячных передач может достигать 30%. Привод с редуктором имеет низкую динамику (не более 700–900 рад/сек²), что обусловлено наличием люфтов и упругих элементов в кинематической цепи "двигатель — редуктор — объект регулирования". Таким образом, исключение из привода элементов, ухудшающих динамику, приводит к повышению качества регулирования.

Чтобы получить низкоскоростной электропривод с требуемыми энергетическими и массогабаритными характеристиками, необходимо, прежде всего, иметь двигатель с частотой вращения в нерегулируемом режиме работы от нескольких десятков до нескольких сотен оборотов в минуту (при питании от промышленной сети). Это позволит уменьшить передаточное отношение, а в ряде случаев полностью отказаться от редуктора.

Кроме того, исполнительный двигатель в низкоскоростной приводе должен иметь величину удельного момента (отношения момента к массе), по крайней мере, в 5–6 раз большую, нежели у электрических машин традиционного исполнения (асинхронных, синхронных и постоянного тока). Данное требование вытекает из сравнения величин удельного момента мотор-редукторов (10–50 Н·м/кг) и, к примеру, асинхронных двигателей (0,3–0,6 Н·м/кг).

Исполнительный двигатель должен иметь коэффициент мощности и КПД при работе от промышленной сети, сопоставимый с аналогичными показателями электрических машин традиционного исполнения.

Наиболее полно вышеуказанным требованиям соответствуют индукторные, или, как их еще называют, синхронные двигатели с электромагнитной редукцией.

По принятой классификации синхронные индукторные двигатели можно условно разделить на три типа, отличающиеся по способу возбуждения, — аксиальные, радиальные и реактивного типа.

Среди вышперечисленных, реактивный двигатель (РД) имеет самую простую конструкцию, двойную частоту вращения при том же числе зубцов ротора и высокие энергетические показатели.

Отмеченные свойства позволяют широко использовать РД в различных системах электропривода.

Объектом исследования является электропривод с индукторным двигателем реактивного типа.

Предметом исследования являются математические модели и способы управления моментом и угловой скоростью ротора индукторного двигателя реактивного типа в электроприводе, а также высшие временные гармоники момента двигателя.

Цель работы

Создание математической модели и разработка основанных на ней способов и схем управления моментом и скоростью для нового типа индукторного реактивного двигателя с зубцовым шагом обмоток, разработка практических рекомендаций для инженерного проектирования.

Задачи

1. Получить выражения собственных и взаимных индуктивностей для возможных конструктивных решений РД.
2. Разработать математическую модель РД в осях $[d, q, 0]$.
3. Разработать математическую модель многофазного РД при работе от однофазного и двухфазного источников питания.
4. Разработать математическую модель РД с учетом высших временных гармоник тока.
5. Разработать схемные решения для управления РД в различных режимах его работы.

Методы исследования

Метод симметричных составляющих, метод расчета собственных и взаимных индуктивностей, основанный на использовании модифицированных функций Радемахера, а также обобщенные преобразования, дающие двухфазные вещественные составляющие.

В процессе исследования экспериментальных образцов реактивного двигателя использовался метод прямого измерения физических величин: токов, напряжений, вращающих моментов и т. д.

Основные новые научные результаты, выносимые на защиту

1. Для различных модификаций m – фазных индукторных машин реактивного типа впервые получены выражения собственных и взаимных индуктивных параметров с помощью функций Радемахера.
2. Для различных модификаций РД в общем виде получены уравнения электрического равновесия, момента и мощности через симметричные составляющие и в синхронно вращающихся осях, что позволило более точно оценить влияние высших гармоник тока на работу машины.

3. Для трехфазного РД, работающего от синусоидального источника, получены уравнения электрического равновесия и момента в осях d , q , θ . Это позволило сформулировать оптимальные законы управления двигателем.

4. Для режимов максимального быстродействия и оптимального потребления электроэнергии получены зависимости, по которым удалось установить связь между углом нагрузки и отношением токов по осям d , q , θ .

Значение для теории результатов работы заключается в том, что теория электропривода, включая теорию электрических машин, получила развитие в отношении электродвигателей нового типа — индукторных реактивных, для которых были получены основные уравнения математической модели, послуживших базой для дальнейшего развития способов управления моментом и частотой вращения.

Значение для практики полученных результатов заключается в том, что предложены схемные и конструктивные решения многофазного РД, обеспечивающие его работу от двухфазного (или однофазного с конденсатором) источника питания. Показаны преимущества шагового режима работы РД в регулируемом электроприводе. Рассмотрена схемная реализация блока управления двигателем в шаговом режиме. Для трехфазного РД установлены оптимальные соотношения между основной и высшими временными гармониками тока. Полученные соотношения позволили получить максимальный момент с одновременным снижением потерь в обмотках двигателя за счет «бестоковой» паузы. Предложена функциональная схема с частотно-токовым управлением, реализующая оптимальные соотношения гармоник тока.

Использование результатов

Проведены расчеты, изготовлены и прошли испытания реактивные двигатели:

- РД-3-600 (питание от сети 220 В, номинальная мощность — 180 Вт, номинальная частота вращения — 600 об/мин, момент на валу — 4 Н·м), предназначенный для работы в приводах бытовой техники;

- ДЭР-10-43-86 (питание от 3-фазной сети, номинальная частота вращения — 86 об/мин, момент на валу — 10 Н·м), предназначенный для работы в регулируемом приводе запорной арматуры вентиля ДУ-20.

- ДЭР-7-43-86 (питание от 3-фазной сети, номинальная частота вращения — 86 об/мин, момент на валу — 7 Н·м) — экспериментальный образец.

Апробация

Результаты работы докладывались, были обсуждены и одобрены на следующих конференциях:

1. Международная конференция «Unconventional electromechanical and electric systems» (г. Щетцин, Польша, 2004).

2. Международная конференция «Unconventional electromechanical and electric systems» (г. Санкт – Петербург, Россия, 2003).

3. Республиканская конференция с международным участием «Современные проблемы энергетики, электромеханики и электротехнологий» (г. Екатеринбург, 2005).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе: 1 патент РФ, 7 авторских свидетельств на изобретения СССР, 4 научные статьи, одна из которых опубликована в издании, рекомендованном перечнем ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем - 125 страниц машинописного текста. Работа иллюстрирована 27 рисунками и 6 таблицами. Список использованной литературы содержит 46 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой проблемы, сформулирована цель работы, выделена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

На конкретных примерах доказано, что простота конструкции, отсутствие сложной технологической оснастки и низкая стоимость РД являются безусловными факторами, которые в перспективе позволят ему занять определенные ниши в области низкоскоростных приводов.

В первом разделе рассмотрены конструкции и принцип действия индукторных двигателей реактивного типа, катушки которых выполнены с зубцовым шагом, а схема обмотки выполнена в соответствии с базовым алгоритмом построения дискретно распределенных обмоток (ДРО). На рис. 1 показана конструкция 3-х фазного реактивного двигателя.

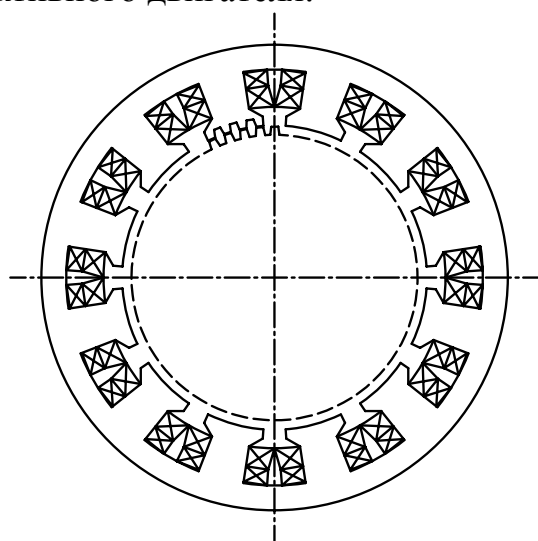


Рис.1. Конструкция 3-х фазного РД

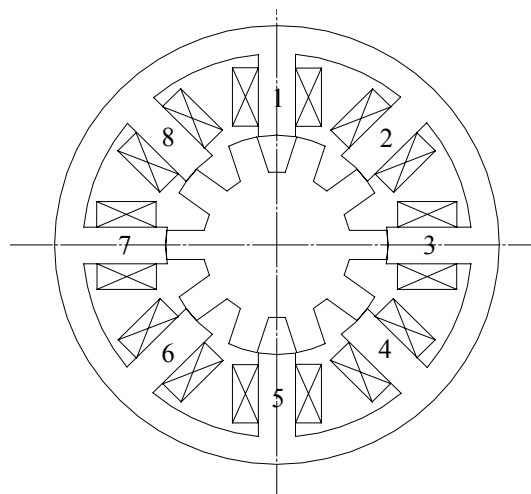


Рис. 2 Конструкция 4-х фазного РД, работающего от 2-х фазного источника питания

Базовый алгоритм построения обмотки РД при различных значениях числа фаз m , числа катушек в фазной зоне s и числа фазных зон p определен таблицей 1 и нижеследующими условиями:

1. Если число фаз или число катушек в фазной зоне четное число, то p также четное число. Если m и s нечетные числа, то p может быть любым целым положи-

тельным числом. (Во избежание сил одностороннего магнитного тяжения значение $p = 1$, как правило, не используется).

2. За «начало» n -ой фазной зоны ($n = 1, 2, \dots, p$) принимается «начало» катушки с минимальным порядковым номером, входящей в данную фазную зону. Если по отношению к клеммам питающего напряжения фазная зона подключается «началом», то такое соединение обозначается как «плюс», если фазная зона подключена «концом», то такое соединение обозначается как «минус».

3. Знак или порядок включения k -ой фазной зоны ($k = 1, 2, \dots, p$), принадлежащей n -ой фазе ($n = 1, 2, 3, \dots, m$) определяется из табл. 1. (Здесь $m=3, 4, 5, \dots$; $s=2, 3, \dots$).

Таблица 1 — Общие правила соединения обмоток РД

$m \setminus s$	Нечетное	четное
Нечетное	+	$(-1)^{n+k}$
Четное	$(-1)^{n+1}$	$(-1)^{n+k}$

4. Под действие базового алгоритма не подпадает случай, соответствующий $m=2$.

Чтобы сохранить единый подход при анализе РД с четным и нечетным числом фаз, имеющими различные конструктивные и схемные решения, в работе использованы основные понятия альтернативной многофазной системы, характеристический угол которой $\delta = \frac{m-1}{m} \times \pi$ меняется от 90 до 180 электрических градусов.

На рис. 4, приведена схема обмоток трехфазного РД, изображенного на рис. 1. На рис. 3 показаны пространственные зависимости МДС, магнитной проводимости и момента от угла вдоль воздушного зазора (при максимальном токе в одной фазе и половине от максимального в двух других). Поскольку момент реактивного двигателя можно представить как:

$$M = \frac{1}{2} \times \int_0^{2\pi} F^2(\alpha) \frac{dG(\theta, \alpha)}{d\theta} d\alpha,$$

где: α - угол вдоль воздушного зазора, F - магнитодвижущая сила (МДС), G - магнитная проводимость воздушного зазора, θ - угол поворота ротора, то максимум момента будет формироваться в областях с максимальным изменением проводимости G . Пространственную МДС (рис. 3) можно разложить в ряд Фурье:

$$F(\alpha, t) = F_1 \cos\left[\omega_1 t - \frac{z_p + p}{2} \alpha\right] + F_2 \cos\left[\omega_1 t + \frac{z_p - p}{2} \alpha\right]. \quad (1)$$

Каждая из этих гармоник с амплитудой F_1 и F_2 взаимодействует с переменной проводимостью воздушного зазора, и представляют собой гармоники магнитного поля с числом пар полюсов $(z_p + p)/2$ и $(z_p - p)/2$.

Как видно из уравнения (1), обмотка РД, соответствующая базовому алгоритму, в первом приближении представляет собой совмещенную обмотку, формирующую прямо и обратно вращающиеся магнитные поля.

Анализ конструкций и схемных решений РД с помощью метода преобразования многофазных систем, позволили предложить конструкцию многофазного РД, работающего от двухфазного (однофазного с конденсатором) источника питания (рис.2). Отличительная особенность этой электрической машины состоит в том, что на каждом ее большом зубце размещаются две (либо одна) катушки, подключаемые к двум фазам источника. По существу, здесь двухфазная обмотка формирует точно такую же МДС, что и многофазная. Это позволяет: а) устранить пульсации момента и скорости, что характерно для двухфазного выполнения РД; б) существенно уменьшить влияние насыщения стали на выходные параметры машины – момент, КПД и мощность.

Чтобы повысить точность математического описания пространственно – временных зависимостей МДС, которые для индукторных машин с дискретно распределенными обмотками представляют собой прямоугольные функции (рис.3), а также получить возможность для расчета собственных и взаимных индуктивностей, было предложено использовать метод модифицированных функций Радемахера. Такой подход, в последующем, позволил учесть широкий спектр пространственных гармоник.

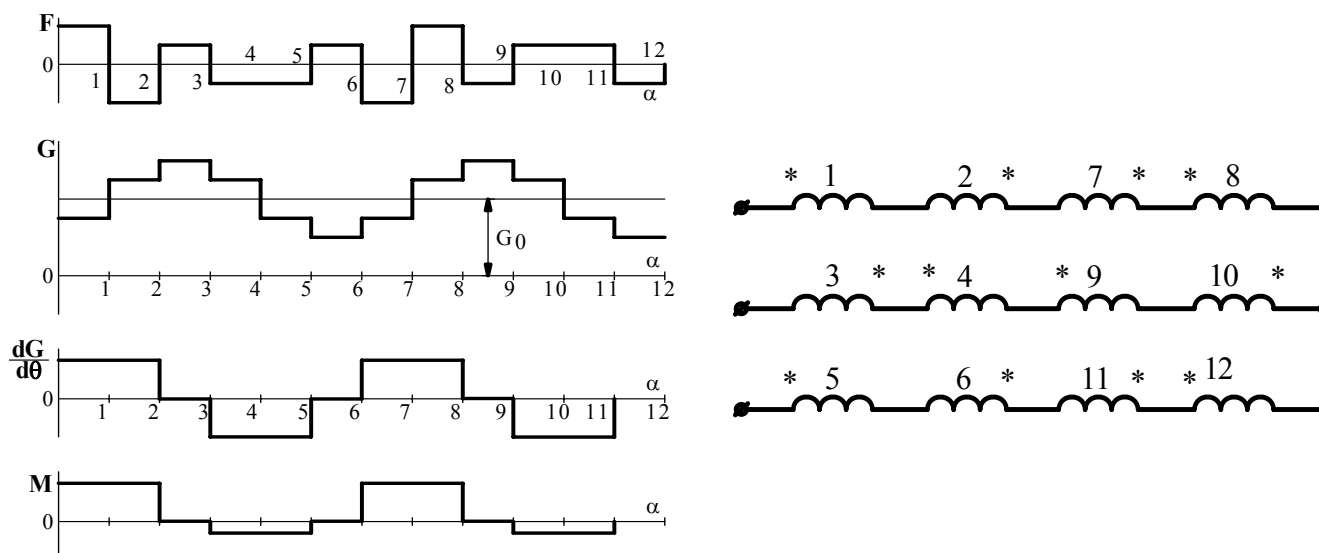


Рис.3. Пространственные зависимости МДС, магнитной проводимости и момента РД

Во второй главе получены уравнения собственных и взаимных индуктивностей различных модификаций РД, дискретно распределенные обмотки (ДРО) которых выполнены в соответствии с базовым алгоритмом.

При исследовании РД приняты следующие допущения:

Насыщение стали магнитопровода отсутствует, $\mu_{ст} = \infty$.

1. Воздушный зазор считается равномерным, влияние зубчатости статора и ротора учитывается коэффициентами Картера, а изменение удельной магнитной проводимости зазора учитывается выражением, в котором учтена только основная пространственная составляющая:

$$\lambda(\theta, \alpha) = \lambda_0 + \lambda_1 \cos(z_2 \theta - p\alpha),$$

где Z_2 - число зубцов ротора; p - число фазных зон каждой фазы. λ_0 - постоянная составляющая, λ_1 - амплитуда первой гармонике.

2. Отношение величины воздушного зазора к радиусу, проведенному до наружной поверхности ротора, равно нулю. (Расчет магнитных полей проводится в декартовой системе координат).

3. Потоки рассеяния и краевые эффекты в торцевых частях магнитопровода не учитываются.

При этих допущениях, используя модифицированные функции Радемахера и энергетический метод, найдены выражения для собственных и взаимных индуктивностей фаз. Например, если число катушек в фазной зоне s , или число фаз m четные, то:

$$L_{kk}(\theta) = \frac{\pi D_a L_a \mu_0 \beta k_p}{m \delta k_\delta} W^2 \cos[Z_2 \theta + \frac{2\pi}{m}(k-1)], \quad L_{kj} = 0; \quad (2)$$

где: $\beta = \frac{G_1}{G_0}$ — коэффициент пульсации; $k_p = \frac{\sin(\frac{\pi}{m})}{s \times \sin(\frac{\pi}{ms})}$ — коэффициент рас-

пределения; W - число витков; D_a, L_a - главные размеры; k_δ - коэффициент Картера, учитывающий неравномерность зазора; δ_1 - воздушный зазор; $k = 1, 2, \dots$

С помощью метода симметричных составляющих найдены матрицы напряжений, токов, активных сопротивлений и индуктивных параметров:

$$\vec{U}_s = \vec{S}^{-1} \times \vec{U}; \quad \vec{I}_s = \vec{S}^{-1} \times \vec{I}; \quad \vec{R}_s = \vec{S}^{-1} \times \vec{R} \times \vec{S}; \quad \vec{L}_s = \vec{S}^{-1} \times \vec{L} \times \vec{S},$$

Например, матрица \vec{L}_0 собственных индуктивностей, для вышеприведенных условий, записанная через симметричные составляющие, будет диагональной:

$$\vec{L}_0 = \text{diag} \{ L_0, L_0, \dots, L_0 \}_{m \times m}, \quad (3)$$

а матрица взаимных индуктивностей \vec{L}_1 размерности $(m \times m)$ - плохо заполненной: все ее элементы отличные от нуля будут располагаться на четырех диагоналях.

$$\vec{L}_1 = \frac{1}{2} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 0 & b^{-1} & 0 & \dots & 0 & 0 & b & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & b^{-1} & \dots & 0 & 0 & 0 & b \\ \hline b & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & b & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & b^{-1} \\ \hline b^{-1} & 0 & 0 & 0 & \dots & b & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & b^{-1} & 0 & 0 & \dots & 0 & b & 0 & 0 \\ \hline \end{array}$$

где $b = \beta L_0 k_p \exp(j z_2 \theta)$, $b^{-1} = \beta L_0 k_p \exp(-j z_2 \theta)$.

Анализ структуры матрицы позволил сделать ряд важных выводов:

1. В процессах энергопреобразования РД задействованы все временные гармоники тока, в том числе и те, что формируют нулевую последовательность.

2. Увеличение числа фаз ослабляет влияние высших временных гармоник, что существенно уменьшит «паразитные» моменты, шумы и вибрации при работе двигателя от промышленной сети.

3. Существенное (как показали дальнейшие исследования - до 37%) увеличение момента может быть достигнуто, если наряду с основной гармоникой, формировать третью и пятую временные гармоники. При этом третья гармоника должна иметь такую же начальную фазу, что и первая, а пятая - формироваться со сдвигом 180 электрических градусов.

С использованием метода симметричных составляющих получены обобщенные уравнения электрического равновесия РД с четным и нечетным числом фаз, учитывающие влияние высших временных гармоник тока (напряжения) на работу машины.

Отдельно для трехфазного РД получены уравнения электрического равновесия, записанные через симметричные составляющие, в которых учитываются 1, 3 и 5 временные гармоники:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_{m+}^{(0)} &= [r + (p + j3\omega)L_0] \bar{I}_{m+}^{(0)} + 0,5\beta L_0 (p + j5\omega - jz_2\omega_p) \bar{I}_{m+}^{(2)} \times \exp(-2\theta_H) \\
 &\rightarrow +0,5\beta L_0 (p + j\omega + jz_2\omega_p) \bar{I}_{m+}^{(1)} \times \exp(2\theta_H); \\
 \bar{U}_{m-}^{(0)} &= [r + (p - j3\omega)L_0] \bar{I}_{m-}^{(0)} + 0,5\beta L_0 (p - j\omega - jz_2\omega_p) \bar{I}_{m-}^{(2)} \times \exp(-2\theta_H) \\
 &\rightarrow +0,5\beta L_0 (p - j5\omega + jz_2\omega_p) \bar{I}_{m-}^{(1)} \times \exp(2\theta_H); \\
 \bar{U}_{m+}^{(1)} &= [r + (p + j\omega)L_0] \bar{I}_{m+}^{(1)} + 0,5\beta L_0 (p + j3\omega - jz_2\omega_p) \bar{I}_{m+}^{(0)} \times \exp(-2\theta_H) \\
 &\rightarrow +0,5\beta L_0 (p - j\omega + jz_2\omega_p) \bar{I}_{m-}^{(2)} \times \exp(2\theta_H); \\
 \bar{U}_{m-}^{(1)} &= [r + (p - j5\omega)L_0] \bar{I}_{m-}^{(1)} + 0,5\beta L_0 (p - j3\omega - jz_2\omega_p) \bar{I}_{m-}^{(0)} \times \exp(-2\theta_H); \\
 \bar{U}_{m+}^{(2)} &= [r + (p + j5\omega)L_0] \bar{I}_{m+}^{(2)} + 0,5\beta L_0 (p + j3\omega + jz_2\omega_p) \bar{I}_{m+}^{(0)}; \\
 \bar{U}_{m-}^{(2)} &= [r + (p - j\omega)L_0] \bar{I}_{m-}^{(2)} + 0,5\beta L_0 (p - j3\omega + jz_2\omega_p) \bar{I}_{m-}^{(0)} \times \exp(2\theta_H) \\
 &\rightarrow +0,5\beta L_0 (p + j\omega - jz_2\omega_p) \bar{I}_{m+}^{(1)} \times \exp(-2\theta_H), \quad (5)
 \end{aligned}$$

Соответственно, уравнение момента трехфазного РД, полученное с учетом высших временных гармоник имеет вид:

$$M = [0,5 I_m^{(1)} I_m^{(1)} + 2 I_m^{(0)} I_m^{(1)} - I_m^{(0)} I_m^{(2)}] z_2 L_0 \beta \sin 2\theta_H \quad (6)$$

На рис. 5 сплошной линией показан результат суммирования токов основной, третьей и пятой временных гармоник, что обеспечивает 30 % увеличение момента.

Рядом на рис. 6 на примере простейшей реактивной машины с шестью зубцами дано объяснение данному физическому явлению.

Действительно, пусть каждую фазу образуют две соседние катушки ($s=2$), включенные согласно, а ротор машины представляет собой цилиндр, расположенный с эксцентриситетом относительно статора. Если ток в фазе А положительный и максимальный, то токи в фазах В и С будут равны половине амплитуды и имеют противоположный знак.

Соответственно, ротор будет стремиться занять такое положение, чтобы минимальный воздушный зазор между вращающейся и неподвижной частью был в пределах зубцов с катушками, принадлежащими фазе А. В этот момент времени фазы В и С создают тормозной момент, направленный встречно моменту, создаваемому фазой А. Если же совместное влияние высших гармоник приводит к уменьшению значений токов в фазах В и С (см. кривую, приведенную на рис. 5), то момент реактивной машины повысится.

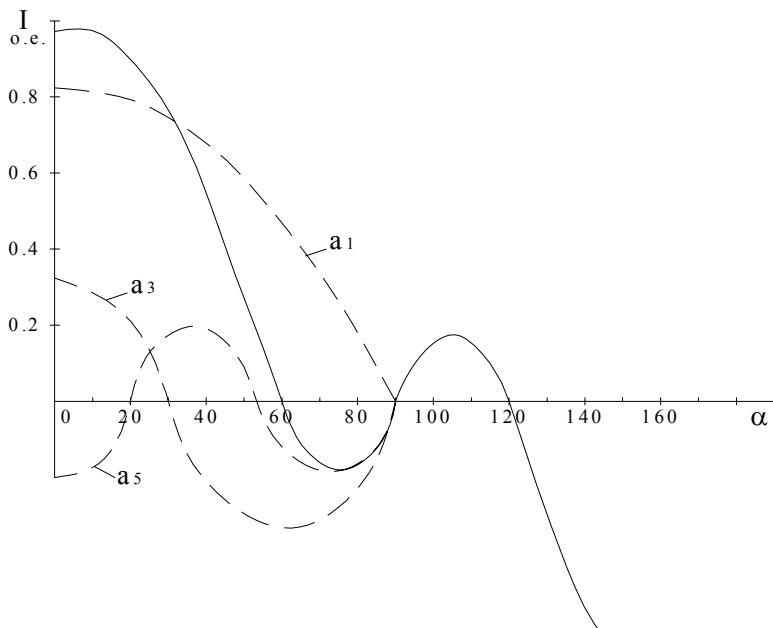


Рис.5. Результат суммирования временных гармоник тока

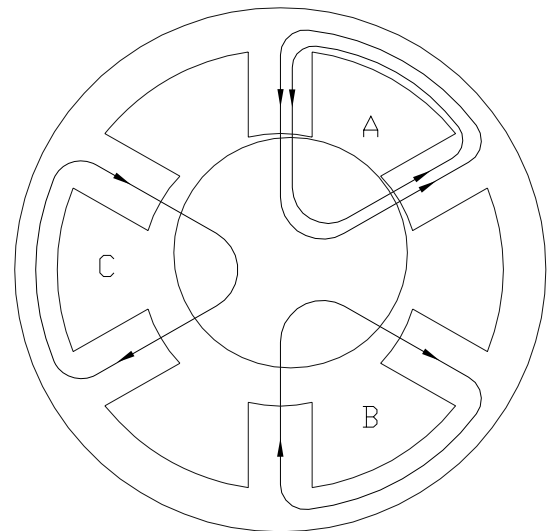


Рис.6. Принцип формирования «тормозных» моментов в РД

Следует отметить что, когда при анализе РД принимается во внимание только основная гармоника тока (напряжения) то, независимо от конструктивного исполнения, его уравнения принимают общепринятый вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{m+}^{(1)} &= r \bar{I}_{m+}^{(1)} + (p + j\omega) L_0 \bar{I}_{m+}^{(1)} + (p + jz_2 \omega_p - j\omega) 0,5 L_1 \bar{I}_{m-}^{(m-1)} \exp(j2\theta_H) \\ \bar{U}_{m-}^{(m-1)} &= r \bar{I}_{m-}^{(m-1)} + (p - j\omega) L_0 \bar{I}_{m-}^{(m-1)} + (p - jz_2 \omega_p + j\omega) 0,5 L_1 \bar{I}_{m+}^{(1)} \times \rightarrow \\ &\rightarrow \times \exp(-j2\theta_H). \end{aligned} \quad (7)$$

В установившемся режиме работы $p = 0$, а $\overline{U_{m+}^{(1)}} = \overline{U_{m-}^{(2m-1)}}$, следовательно выражения для токов главной прямой и обратной последовательностей имеют вид:

$$\begin{aligned}\overline{I_+^{(1)}} &= \frac{r + j\omega L_1 \times \exp(-j2\theta_H) - j\omega L_0}{r^2 + (\omega L_0)^2 - (\omega L_1)^2} \times \overline{U_+^{(1)}}; \\ \overline{I_-^{(2m-1)}} &= \frac{r - j\omega L_1 \times \exp(j2\theta_H) + j\omega L_0}{r^2 + (\omega L_0)^2 - (\omega L_1)^2} \times \overline{U_+^{(1)}},\end{aligned}\quad (8)$$

а уравнение момента:

$$M = \frac{mz_2 \beta k_p L_0 U^2}{4[r^2 + (\omega L_0)^2 - (\omega L_1)^2]} \times \sin 2\theta_H. \quad (9)$$

В отдельном подразделе второй главы рассмотрен многофазный РД, работающий от двухфазного источника питания. Несмотря на то, что общий вид его собственных и взаимных индуктивностей отличается от (2):

$$L_A = \frac{\mu_0 \pi D_a L_a w^2}{2\delta k_\delta} (1 + 0,5\beta \cos z_2 \theta) \quad (10)$$

$$L_B = \frac{\mu_0 \pi D_a L_a w^2}{2\delta k_\delta} (1 - 0,5\beta \cos z_2 \theta) \quad (11)$$

$$L_{AB} = \frac{\mu_0 \pi D_a L_a w^2}{4\delta k_\delta} \beta \sin z_2 \theta \quad (12)$$

матрицы собственных и взаимных индуктивностей, записанные через симметричные составляющие идентичны (3), (4), а, следовательно, и уравнения электрического равновесия и момента аналогичны (7) – (9).

Отличительная особенность этой двухфазной машины в сравнении с трехфазной – это меньший шум, вибрация, а также существенно меньшая зависимость момента от насыщения магнитной системы. Данный вывод был подтвержден экспериментальными исследованиями опытного образца, что приведено в 4 главе работы.

В третьей главе рассмотрена электромеханическая модель трехфазного РД, для которого выполнены обобщенные преобразования, дающие двухфазные вещественные составляющие. Чтобы получить уравнения электрического равновесия, полезной мощности и момента в осях d, q, θ , было введено понятие об эквивалентном роторе, вращающемся с синхронной скоростью $z_2 \omega_p - \omega_1$.

После вычислений, уравнения записаны в следующем виде:

$$u_d = i_d r - \omega_1 L_0 i_q + 0,5\beta L_0 k_p (z_2 \omega_p - \omega_1) (i_d \sin 2\theta_H + i_q \cos 2\theta_H),$$

$$u_q = i_q r + \omega_1 L_0 i_d + 0,5 \beta L_0 k_p (z_2 \omega_p - \omega_1) (i_d \cos 2\theta_n - i_q \sin 2\theta_n),$$

$$M = 0,5 z_2 \beta L_0 k_p (i_d^2 \sin 2\theta_n - i_q^2 \sin 2\theta_n + 2i_d i_q \cos 2\theta_n). \quad (13)$$

Вводя обозначения $I = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$, $\xi = i_q / i_d$, последнее выражение можно представить как:

$$M = 0,5 z_2 \beta L_0 k_p I^2 \sin[2\theta_n + \arctg \frac{2\xi}{1-\xi^2}]. \quad (14)$$

На рис. 7 представлена структурная схема электропривода с реактивным двигателем. Функционально схема состоит из микроконтроллера, регулятора (стабилизатора) тока двигателя, электронного коммутатора фаз двигателя и датчика углового положения ротора.

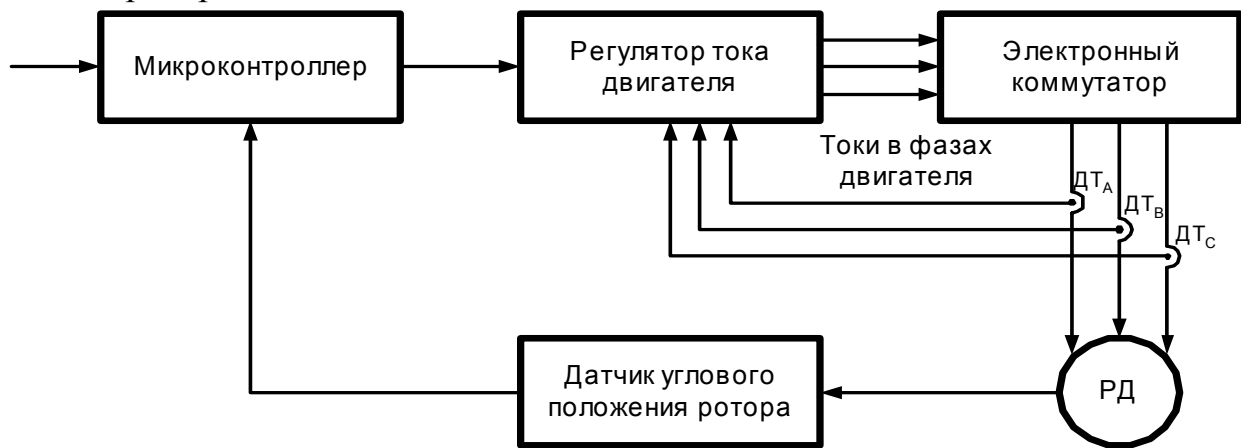


Рис. 7 Структурная схема электропривода с реактивным двигателем

В зависимости от задач, выполняемых приводом – стабилизация скорости вращения, стабилизация момента на валу либо отработка угловых перемещений микроконтроллер, используя информацию об угловом положении ротора, формирует циклограмму 3-х фазного напряжения и тока в фазах двигателя.

Особенности электромеханического преобразования энергии в реактивном двигателе с дискретно распределенной обмоткой заключаются в несинусоидальности токов и магнитных потоков и нелинейной зависимости между ними при питании двигателя от источника синусоидального напряжения.

При анализе (14) сделан следующий вывод: с точки зрения простоты управления, лучшей динамики, а также получения линейной зависимости $M = f(i)$ целесообразен режим, когда по оси d формируется максимальный ток, а управление моментом осуществляется по оси q . При $i_q = 0$ момент отсутствует; с увеличением тока по оси q растет по линейному закону.

Это свойство (линейная зависимость момента от тока по оси q) в полной мере может быть использовано при работе РД в шаговом режиме с фиксированным максимальным током по оси d в устойчивом состоянии ротора.

Схема источника питания трехфазного РД для шагового режима показана на рис. 8.

Форма токов для режима 6-и тактной коммутации показана на рис.9.

Рассмотрены процессы, протекающие в двигателе со следующими параметрами: $m = 3, p = 2, s = 2. z_1=60, z_2=62, z_p=12$. (Конструкция изображена на рис.1, схема на рис. 4). Для шагового режима характерны 2-а состояния двигателя - статический режим с фиксацией углового положения ротора и динамический - перехода из одного устойчивого состояния в другое.

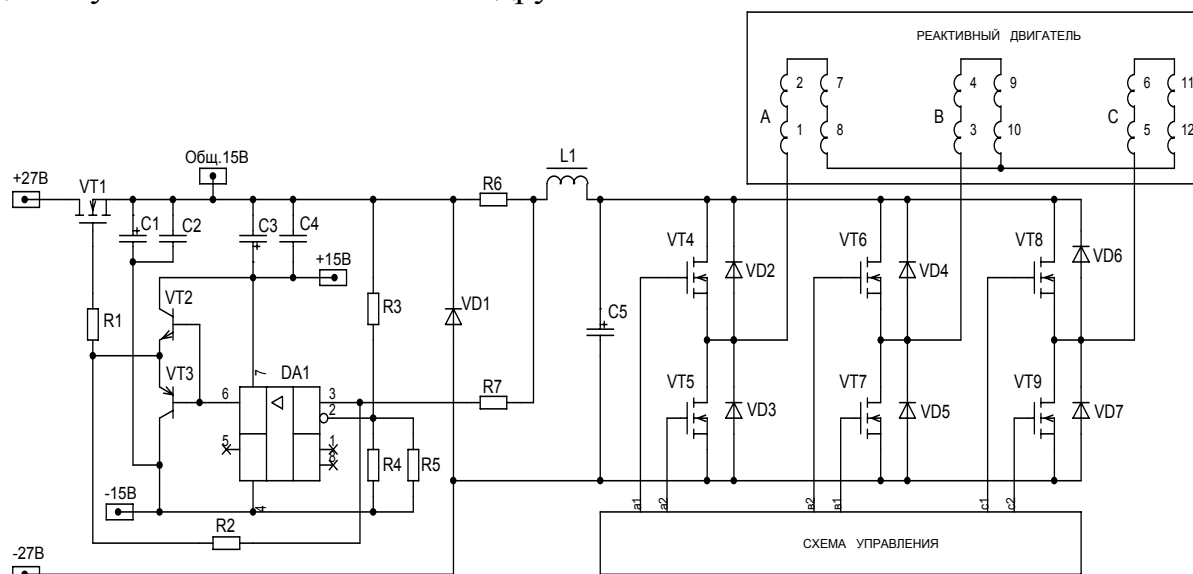


Рис. 8. Схема источника питания для шагового режима 3-х фазного РД

При $p = 2$ на роторе двигателя имеются 2-е пары полюсов. (Речь идет об эквивалентном роторе и эквивалентном полюсе). Поскольку для синхронно вращающихся с эквивалентным ротором осей d, q, o ось d , по определению, совпадает с осью одного из полюсов, а ось q является биссектрисой угла между осями соседних полюсов, т. е. для данной конструкции двигателя ось q находится под углом 90 угл. градусов к оси d .

Векторная диаграмма токов якоря РД с привязкой к осям d, q, o в шаговом режиме показана на рис. 10.

В состоянии статического равновесия ток по оси d максимальный, а по оси q равен нулю. В момент коммутации ток в фазах двигателя скачкообразно изменяет свое значение, например, если в такте 2 (рис.9) ток в фазе А имел максимальное значение, в фазах В и С – половинное, соответственно, условные полюса ротора находились в фазных зонах А, то при переходе в такт 3 ток принимает максимальное значение в фазных зонах С. В результате вектор тока i_d скачкообразно перемещается на угол 60 угл. градусов в фазные зоны С. Его проекция в условных единицах на ось d составит $i_d \cos 60 = 0.5$, а на ось q , - $i_d \sin 60 = 0.87$.

При наличии тока по оси q создается вращающий момент, который будет стремиться совместить ось d ротора с вектором тока i_d таким образом, чтобы условные полюса ротора находились в фазных зонах C в состоянии устойчивого равновесия.

Под действием вращения вектора магнитного поля статора на 60 эл. градусов произойдет угловое перемещение зон с максимальной магнитной проводимостью между элементарными зубцами статора и ротора (условных полюсов) также на 60 угл. градусов. При этом ротор двигателя повернется на угол

$$\theta = \frac{(z_2 - z_1)(\alpha_c - \alpha_a)}{360} m = 1 \text{ угл. градус.}$$

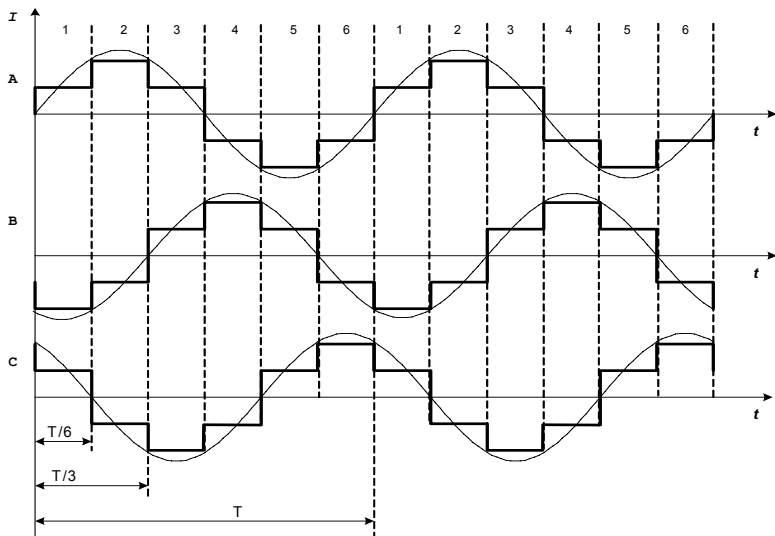


Рис. 9. Форма токов фазах РД для шагового режима

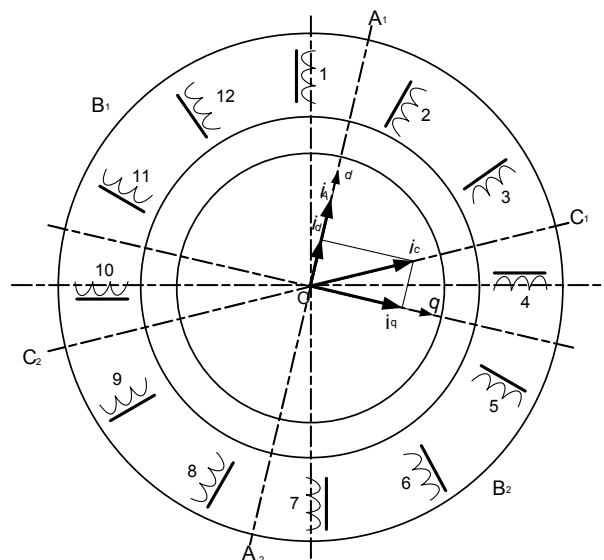


Рис.10. Векторная диаграмма токов РД с привязкой к осям d, q, θ

Как видно, РД может составить серьезную конкуренцию традиционным шаговым двигателям с постоянными магнитами поскольку традиционный шаговый двигатель является разновидностью синхронного двигателя, а сделать синхронный двигатель с шагом, например, 1 угл. градус за счет увеличения количества полюсов (магнитов) на роторе – нереально,

Следует отметить, что шаговый режим предпочтителен в системах с широким диапазоном регулирования скорости и с ограничениями по массе управляющей электроники, поскольку для шагового режима не требуется датчик обратной связи по угловому положению ротора и датчик скорости. Требуемые точности обеспечиваются точностью задающего генератора.

Одним из возможных способов регулирования частоты вращения и момента электрического двигателя является частотно – токовое управление (ЧТУ). На рис. 10 представлена структурная схема управления РД, позволяющая обеспечить высокую динамику отработки сигналов задания за счет формирования основной и высших временных гармоник тока и поддержания на постоянном уровне тока по продольной оси.

Привод работает следующим образом. С датчика положения ротора (ДПР) снимается аналоговый сигнал о текущем угловом положении ротора, который в блоке $\gamma(t)$ преобразуется в цифровую форму. Далее сигнал поступает:

а) на вход блока $\frac{d}{dt}$, где происходит дифференцирование угла положения ротора по времени и в результате получается скорость вращения вала, представленная в цифровой форме;

б) на вход блока преобразования координат $ПК(abc - dq)$, где информация об угле положения ротора и информация о мгновенных значениях фазных токов, поступающая с датчиков тока (ДТ), преобразуется в сигналы задания токов по продольной $i_{дрод}$ и поперечной осям $i_{дроq}$, а также в сигнал задания тока нулевой последовательности $i_{др00}$;

в) на вход блока обратного преобразования координат $\overline{ПК}(dq - abc)$, где осуществляется перевод сигналов задания токов по осям d, q в фазные токи, содержащие основную и пятую гармоники;

г) на вход генератора сигналов задания третьей временной гармоники;

д) на вход генератора сигналов задания пятой временной гармоники.

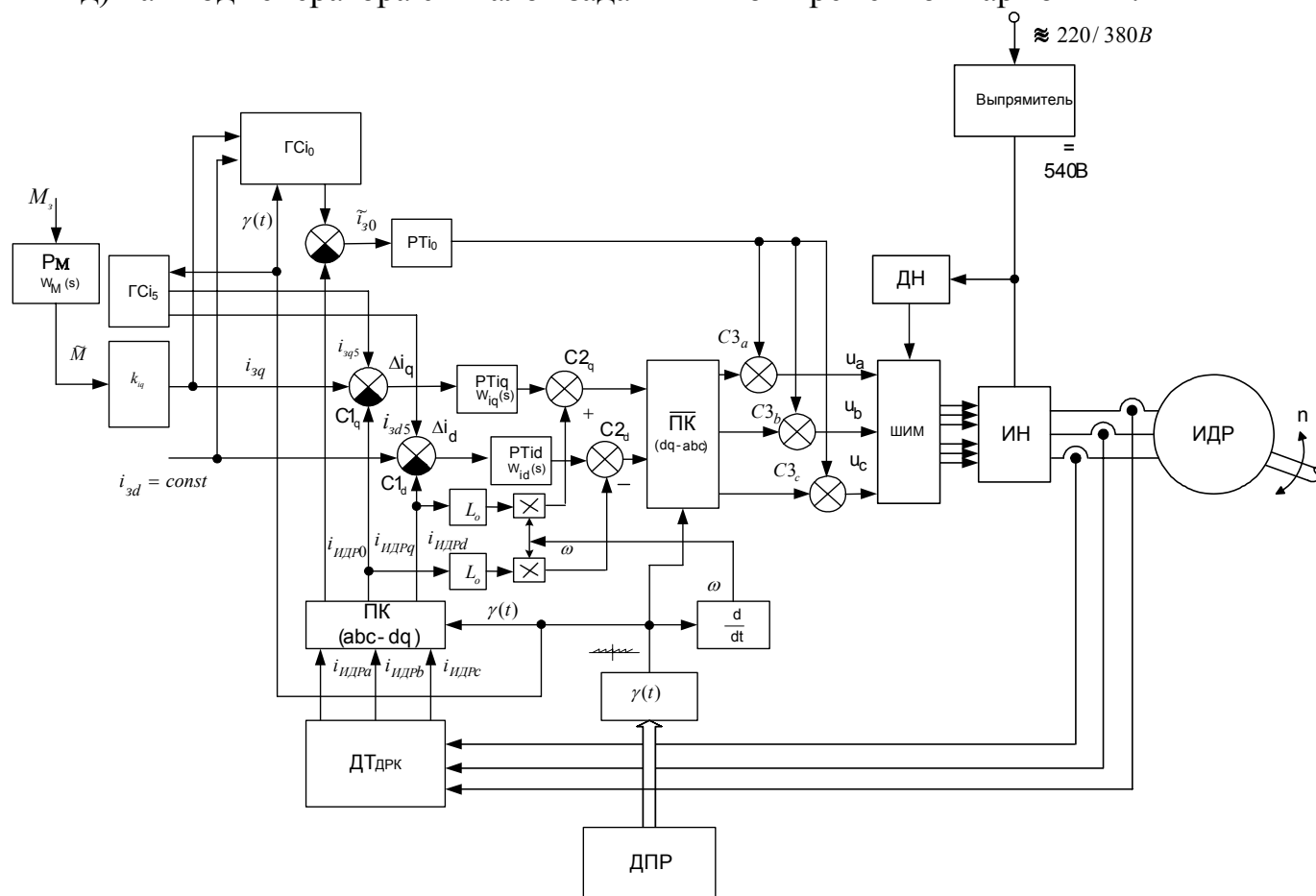


Рис. 10. Структурная схема электропривода с частотно токовым управлением

Датчик положения настраивается таким образом, чтобы при отсутствии сигнала на задание момента в обмотках двигателя формировались токи только по продольной оси и нулевой последовательности.

Выше отмечалось, что в случае формирования наряду с первой высших временных гармоник тока, момент РД растет. Экспериментально установлено опти-

мальное соотношение третьей и пятой временных гармоник с основной гармоникой тока. Это соотношение составляет, соответственно, 32 % и 19 %.

Отметим, что высшие гармоники в ортогональных осях формируются в блоках $ГCi_0$ и $ГCi_5$ независимо от сигнала задания момента $W_M(s)$ и определяются исключительно амплитудой и фазой результирующего тока основной гармоники.

Все функциональные узлы, изображенные на рис. 10, кроме силовой электроники (ИН, ШИМ, ДН), аналоговых датчиков - датчиков углового положения ротора (ДПР) и датчиков тока (ДТ) реализованы на микроконтроллере. Все преобразователи, сумматоры, формирователи и т.д. представляют собой модули программного обеспечения, установленные в ОЗУ и ПЗУ микроконтроллера.

В четвертой главе показаны результаты экспериментальной проверки основных положений работы.

1 Проведено сравнение результатов расчетов по выведенным уравнениям собственных и взаимных индуктивностей РД различного конструктивного исполнения и экспериментально измеренных величин.

2 Опытным путем определены величины момента, полезной мощности и электрических потерь для РД, работающего от промышленной сети 50 Гц. Показана сходимость расчетных и экспериментальных данных.

3 Экспериментально подтвержден факт увеличения момента РД при наличии в фазном токе высших временных гармоник (третьей и пятой).

4 Проведено исследования РД при его работе в системе частотно – токового управления и подтверждена правильность выбранной электромеханической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Рассмотрены различные конструкции индукторного двигателя реактивного типа, катушки которого выполнены с зубцовым шагом. С применением метода преобразования многофазных систем, предложена конструкция двухфазного (однофазного с конденсатором) РД.

2 Получены уравнения собственных и взаимных индуктивностей РД различных модификаций.

3 Получены обобщенные уравнения электрического равновесия РД с четным и нечетным числом фаз, учитывающие влияние высших временных гармоник тока (напряжения) на работу машины.

4 Для трехфазного РД получены уравнения электрического равновесия и момента, учитывающие влияние третьей и пятой временной гармоники тока.

5 Получены упрощенные уравнения напряжений и момента РД, учитывающие основную гармонику тока и напряжения.

6 Получены уравнения электрического равновесия и момента многофазного РД, работающего от двухфазного источника питания.

7 Получены уравнения электрического равновесия, полезной мощности и момента реактивного двигателя в осях d , q , θ , жестко связанных с эквивалентным ротором.

8 Установлены оптимальные соотношения между токами по продольной и поперечной осям при различных способах управления скорости и момента РД.

9 Поведены исследования шагового режима работы. Показана перспективность работы инвертора со 120 градусной коммутацией токов РД.

10 Разработана функциональная схема управления РД, позволяющая обеспечить высокую динамику отработки сигналов задания.

11 Экспериментально подтверждены основные положения выполненных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикация в издании по перечню ВАК:

1 Дробушевский, В. М. Позиционный электропривод системы поворота антенн / В. М. Дробушевский, С. Ф. Другов, В. И. Пантелеев, **А. М. Стрижков** // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 1988. — №3. — С. 21—23.

Прочие публикации:

2 Патент РФ № 5639. Синхронный индукторный двигатель / Д. Л. Калужский, **А. М. Стрижков**, Ю. Л. Марков. — Б.И. № 25, 10.09.06.

3 Калужский, Д. Л. Уравнения электрического равновесия и момента индукторного двигателя реактивного типа / Д. Л. Калужский, **А. М. Стрижков** // Сб. докладов Международной конференции UEES. — СПб., 2003. — Т. 2, с. 165—172.

4 Kaloujski, D. L. Reluctance motor with tooth pitch stator winding / D. L. Kaloujski, **A. M. Strizhov** // Сб. докладов Международной конференции UEES. СПб., 2004. — Т. 1, с. 84—91.

5 Калужский, Д. Л. Уравнения электрического равновесия и момента индукторного двигателя / Д. Л. Калужский, **А. М. Стрижков** // Сб. докладов Международной конференции УПИ – УГТУ. Екатеринбург, Т. 3, 2005.

6 А. с. СССР № 1690160 Способ управления вентильным электродвигателем / **А. М. Стрижков** и др. — Оpubл. в Б. И. 1991 № 41.

7 А. с. СССР. №1262659 Стабилизированный преобразователь постоянного напряжения / **А. М. Стрижков**. — Оpubл. в Б. И. 1986 № 37.

8 А. с. СССР. №1644315 Устройство для управления силовым транзисторным ключом / **А. М. Стрижков**. — Оpubл. в Б. И. 1990 № 45.

9 А. с. СССР №1610572 Мостовой транзисторный инвертор / **А. М. Стрижков**. — Оpubл. в Б. И. 1990 № 44.

10 А. с. СССР №1265692. Следящая система / **А. М. Стрижков**. — Оpubл. в Б. И. 1986 № 39, с. 176.

11 А. с. СССР №1305628 Следящая система / **А. М. Стрижков**, Е. И. Крутских. — Оpubл. в Б. И. 1987 №15.

12 А. с. СССР №1366990 Следящая система / **А. М. Стрижков**. — Оpubл. в Б. И. 1988 №2

Стрижков Анатолий Михайлович

Реактивный двигатель

и методы регулирования его момента и скорости

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Подписано в печать 20.09.2007. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Политехнический институт Сибирского федерального университета