

5.09.01
562

Контрольный
экземпляр

Уральский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт им.С.М.Кирова

На правах рукописи

ТОМАШЕВ Виктор Петрович

УДК 621.313.292

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ВЕНТИЛЬНОГО
РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Специальность 05.09.01 - Электрические машины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Свердловск
1989

Читальный зал
«Профессорский»

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов
Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомо-
ла.

- Научный руководитель - кандидат технических наук,
профессор ЛИФАНОВ В.А.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор СКОРОСПЕШКИН А.И.,
кандидат технических наук
доцент РОДИОНОВ И.Е.
- Ведущее предприятие - завод "Миассэлектроаппарат" (г.Миасс)

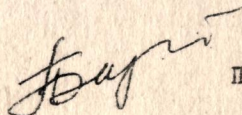
Защита состоится 7 июня 1989 г. в 13.00 час. в ауд. № 3 406
на заседании специализированного совета К 063.14.04 Уральского
ордена Трудового Красного Знамени политехнического института имени
С.М. Кирова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы и замечания в двух экземплярах, заверенные печатью учреж-
дения, просим присылать по адресу: 620002, г. Свердловск, К-2, УПИ
им. С.М.Кирова, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1989 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук



П.И. БАРТОЛОМЕИ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ



Актуальность работы.

Экономное и рациональное использование материальных и трудовых ресурсов в области электромашиностроения связано с дальнейшим повышением эффективности разработок электрических машин, улучшением их качества, повышением технологичности изготовления и срока службы электромашин, снижением их себестоимости. Одним из перспективных направлений решения подобных задач является применение вентильных реактивных двигателей постоянного тока (ВРД).

Конструктивно ВРД аналогичен шаговому реактивному двигателю. Явнополюсный ротор не имеет обмотки, а на статоре уложена в общем случае m -фазная обмотка, подключенная через полупроводниковый коммутатор (ПК) к сети постоянного тока. Каждая фаза состоит из двух диаметрально расположенных и согласно включенных катушек.

Полупроводниковый коммутатор представляет собой преобразователь постоянного напряжения в систему импульсов питания секций обмотки электрической машины (ЭМ). Второй основной функцией коммутатора является организация энергетического обмена между ЭМ и источником питания.

Невысокий КПД являлся причиной малой популярности ВРД. Однако при определенных соотношениях геометрических размеров магнитной цепи, правильном выборе схемы коммутатора и интервала коммутации, а также за счет увеличения индукции в воздушном зазоре ВРД по своим технико-экономическим показателям может приближаться к вентильным двигателям с возбуждением от постоянных магнитов. По сравнению с последними ВРД позволяет упростить конструкцию и технологию изготовления ротора, исключить применение дефицитных магнитотвердых материалов и уменьшить стоимость двигателя.

ВРД конкурентоспособен по отношению к коллекторным машинам постоянного тока. Дело в том, что ВРД, обладая аналогичными с двигателем последовательного возбуждения рабочими характеристиками, не имеет щеточно-коллекторного узла, роль которого выполняет ПК. При этом наблюдающаяся тенденция к совершенствованию полупроводниковых элементов ведет к снижению стоимости и массогабаритных показателей коммутатора ВРД. Наоборот дальнейшее совершенствование щеточно-коллекторного аппарата приводит к увеличению стоимости машин постоянного тока, ресурс работы которых остается все же ниже, чем у вентильных двигателей.

Возможное расширение области применения ВРД является побуди-

тельной причиной более серьезного теоретического и экспериментального исследований этих двигателей и создание на этой основе методики их проектирования. Различие методов анализа рабочего процесса связано в основном с особенностями схем коммутаторов ВРД, с принимаемой системой упрощающих допущений и методикой вывода уравнений, позволяющих вычислить мгновенные и средние значения тока и момента двигателя. К общему недостатку существующих аналитических моделей можно отнести отсутствие учета влияния насыщения на значение электромагнитных параметров ВРД. Математические модели, построенные на основе численного анализа ВРД, как правило, громоздки и мало пригодны для решения задач синтеза магнитной цепи.

Цель и задачи работы. В связи с изложенным общей научной задачей диссертации следует считать разработку теории ВРД, позволяющую прогнозировать поведение двигателя при различных режимах его работы, решать задачи проектирования с учетом схемы коммутатора и насыщения магнитопровода.

Эту общую задачу можно разделить на ряд частных задач.

1. Разработка математической модели рабочего процесса с учетом схемы коммутатора и насыщения магнитопровода.
2. Разработка на основе математической модели эффективных алгоритмов для расчета рабочих характеристик двигателя.
3. Создание на основе разработанных алгоритмов инженерной методики расчета ВРД.

Методы исследования. В работе используется комплексный подход к анализу ВРД, сочетающий методы теоретического и экспериментального исследований, включая математическое моделирование двигателя. Математическая модель ВРД построена с использованием схем замещения цепей двигателя и коммутатора с учетом нелинейности магнитопровода. На основе аналитического решения дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в этих цепях, построены расчетные модели двигателя на ЭВМ. Построение моделей осуществлялось с применением теории линейных цепей, методов решения дифференциальных уравнений и теории электромеханического преобразования энергии в электрических машинах.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработана математическая модель вентильного реактивного двигателя с учетом конкретной схемы коммутатора и насыщения магнитопровода.
2. На основе математической модели предложен алгоритм расчета рабочего процесса ВРД.

3. Разработана методика неавтоматизированного расчета ВРД с учетом насыщения магнитопровода.

Практическая ценность работы. заключается в следующем.

Разработанная теория рабочего процесса и методика расчета рабочих характеристик ВРД могут быть использованы на стадии проектно-конструкторских разработок, для поверочных расчетов, а также для неавтоматизированного расчета электромагнитных параметров двигателя. Работа выполнялась согласно плану научно-исследовательских работ кафедры электрических машин и аппаратов Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на семи научно-технических конференциях ЧПИ (1982 - 1988 г.г.);

на I-й Всесоюзной научно-технической конференции по электромехатронике, Ленинград, 1987 г.; на специализированном семинаре по электрическим машинам электротехнического факультета УПИ в 1988 г.

Публикации. По основным результатам исследований опубликовано пять научных статей.

Автор защищает.

1. Основные уравнения и алгоритм расчета рабочих характеристик ВРД с учетом схемы коммутатора и насыщения магнитопровода.

2. Рекомендации по определению и улучшению энергетических показателей ВРД с учетом особенностей электромеханического преобразования энергии.

3. Выводы о границах применения ВРД по предельному значению электромагнитного момента и частоте вращения с учетом напряжения питания и изменения проводимости магнитной цепи.

4. Основные уравнения и алгоритм расчета рабочих характеристик ВРД в относительных единицах.

5. Инженерную методику проектирования ВРД.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех основных разделов и заключения, содержит 102 страницы машинописного текста, 29 рисунков на 24 страницах, списка использованных источников из 58 наименований на 7 страницах и приложений на 44 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дан краткий анализ литературы по ВРД, сформулирована основная цель и задачи диссертации, показана научная новизна и практическая ценность, приведена структура работы.

В первом разделе рассмотрены разновидности конструкции и особенности рабочего процесса ВРД, выбраны базовые конструкции магнитной цепи и схемы коммутаторов, обеспечивающие рекуперацию в сеть энергии, запасенной в магнитной поле отключаемой фазы. Здесь же дано обоснование выбора метода кусочно-линейной аппроксимации при описании процессов, протекающих в двигателе, принята система упрощающих допущений и получены основные выражения для тока и электромагнитного момента ВРД.

В схеме на рис. 1,а ускорение процесса затухания тока достигается введением трансформаторной обмотки на статоре. При этом основная и трансформаторная обмотка намотаны вместе на каждом полюсе для обеспечения максимального потокоцепления. Применение такой схемы ограничивается перенапряжениями на ключе (транзисторе), которые могут быть в 2 раза выше напряжения питания (при равном числе витков основной и трансформаторной обмоток.

Указанное несовершенство схемы гашения можно преодолеть введением в каждую фазу двух силовых ключей, как показано на рис. 1,б. Такой способ в 2 раза увеличивает число силовых ключей, но позволяет использовать всю пазо-зубцовую зону двигателя для размещения основной обмотки.

В общем случае ВРД представляет собой нелинейную магнитную систему, процессы в которой описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. На практике нашли применение численные, аналитические и графоаналитические методы решения этих уравнений. Метод кусочно-линейной аппроксимации является наиболее простым аналитическим методом, позволяющим получить достаточно точное и удобное для автоматизации проектирования решение дифференциальных уравнений ВРД. Этот метод подразумевает замену нелинейных зависимостей магнитного потока и проводимости магнитной цепи от угла поворота ротора φ ,

$\Lambda(\theta_p)$ ломанными прямыми. Это приводит к нескольким однотипным нелинейным дифференциальным уравнениям с постоянными на рассматриваемом участке коэффициентами. Получаемые решения припасовываются одно к другому надлежащим выбором постоянных интегрирования.

При выводе основных расчетных уравнений тока в обмотке статора

и электромагнитного момента вентильного реактивного двигателя приняты следующие упрощающие допущения:

полупроводниковые ключи коммутатора идеальны;

источник питания является источником ЭДС;

параметры всех секций обмотки якоря одинаковы;

угловая скорость вращения ротора в течение одного оборота постоянна;

магнитная характеристика ВРД линейная на участке аппроксимации;

взаимная индуктивность между фазами отсутствует.

При этих допущениях фазу ВРД, питаемую по схемам, изображенным на рис. 1, можно представить в виде схемы замещения (рис. 2) и записать для нее уравнение напряжения

$$\frac{d\psi_{\alpha}}{dt} = U - i_{\alpha} R, \quad (1)$$

где $d\psi_{\alpha}/dt$ - производная изменения по времени полного потоко-сцепления фазы; U - напряжение питания; i_{α} - мгновенное значение тока; R - активное сопротивление фазы.

Индекс α указывает, что процесс протекает в фазе, подключенной к источнику питания.

После отключения от источника фазы ВРД в трансформаторной обмотке (рис. 1, а) или непосредственно в фазе (рис. 1, б) протекает ток, обусловленный ЭДС самоиндукции. При передаче энергии, запасенной в магнитном поле отключаемой фазы, в силовую цепь коммутато-

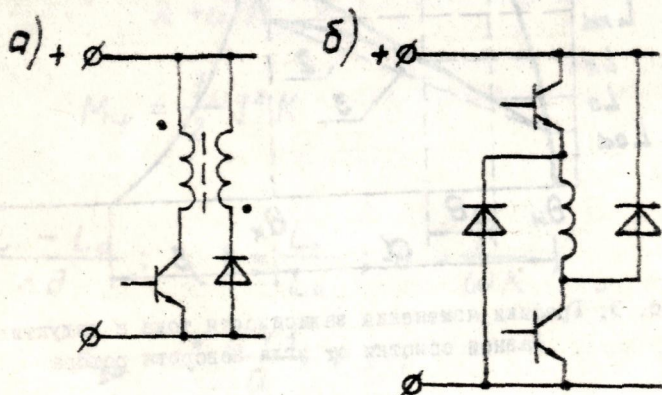


Рис. 1. Базовые схемы силовой части коммутаторов ВРД

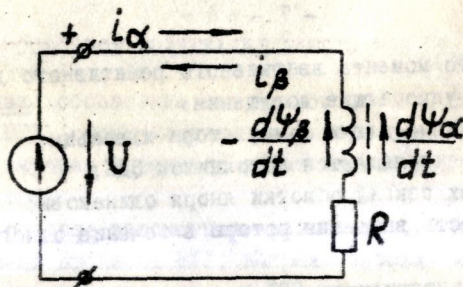


Рис. 2. Схема замещения фазы ВРД

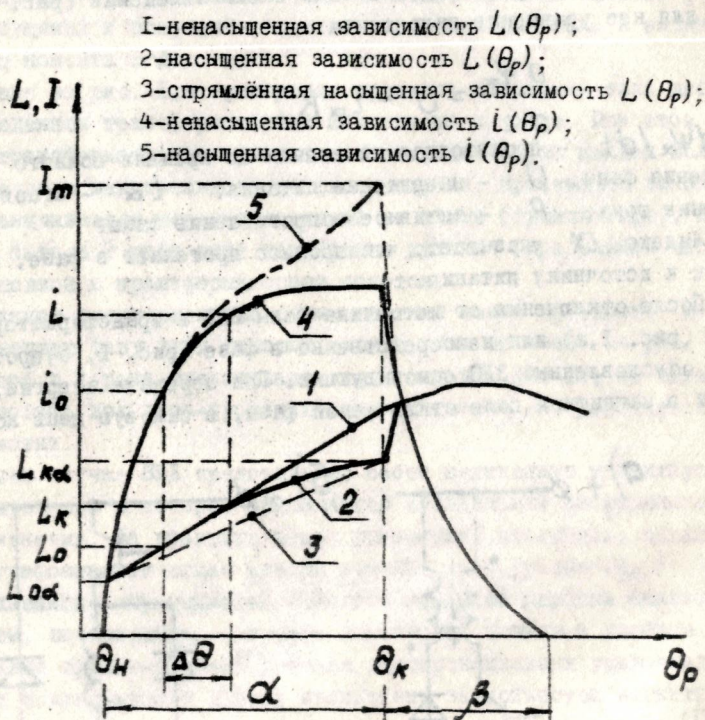


Рис. 3. Графики изменения зависимости тока и индуктивности фазной обмотки от угла поворота ротора

ра схема замещения в общем случае имеет вид, изображенный на рис.2. Уравнение напряжения фазы в этом случае имеет вид

$$\frac{d\psi_{\beta}}{dt} = -(U + i_{\beta} R), \quad (2)$$

где индекс β указывает, что процесс протекает после отключения фазной обмотки от источника питания, т.е. на интервале затухания тока, а символ R в зависимости от схемы питания ВРД изображает активное сопротивление фазы или трансформаторной обмотки.

В результате решения уравнений (1) и (2) относительно тока можно определить мгновенное, (i), среднее (I_{cp}) и действующее (I) значения тока, а также среднее значение электромагнитного момента (M_{cp}) на j -ом участке кусочно-линейной аппроксимации кривой изменения индуктивности фазной обмотки на межкоммутационном интервале (МКИ) или после МКИ (рис. 3):

$$i = \pm \frac{U}{R + \omega K} (1 - \xi^{a+1}) + i_0 \xi^{a+1}; \quad (3)$$

$$I_{cp} = \frac{U}{R + \omega K} \left(\frac{K_{\xi}}{2} \pm 1 \right); \quad (4)$$

$$I = \frac{U}{R + \omega K} K_{\xi}; \quad (5)$$

$$M_{cp} = \frac{1}{2} I^2 K, \quad (6)$$

где

$$K = \frac{L_k - L_0}{\Delta \theta}; \quad \xi = \frac{L_0}{L_k}; \quad a = \frac{R}{\omega K}; \quad (7)$$

$$K_{\xi 0} = i_0^* \frac{a+1}{a} \neq 1; \quad (8)$$

$$K_{\xi 1} = 2 \partial \epsilon_0 K_{\xi 0} (1 - \xi^a); \quad (9)$$

$$K_{\xi 2} = K_{\xi 0}^2 \frac{\partial \epsilon_0}{(2a+1)(\partial \epsilon_k - \partial \epsilon_0)} (1 - \xi^{2a+1}); \quad (10)$$

$$K_{\xi} = \sqrt{1 \pm K_{\xi 1} + K_{\xi 2}}; \quad (11)$$

$$\partial \epsilon_0 = \frac{\omega L_0}{\Delta \theta R}; \quad \partial \epsilon_k = \frac{\omega L_k}{\Delta \theta R}; \quad i_0^* = i_0 \frac{R}{U}. \quad (12)$$

Здесь ω - угловая скорость вращения ротора; L_0, L_k - начальное и конечное значения индуктивности фазной обмотки на j -ом участке аппроксимации (см. рис. 3); $\Delta \theta$ - угловой промежуток аппроксимации; i_0 - мгновенное значение тока в начале участка аппроксимации.

Верхний знак в выражениях (3), (4), (8), (11) относится к процессам на МКИ, нижний знак - к процессам после МКИ.

Значения полного тока, потребляемого двигателем, и электромагнитного момента определяются усредненным на МКИ суммированием значений тока и момента по всем участкам аппроксимации.

Для определения электромагнитных параметров насыщенного ВРД наиболее предпочтительна линейная аппроксимация кривой изменения индуктивности на всем МКИ (рис. 3). Тогда при заданном значении магнитного потока в конце МКИ Φ_m по характеристике намагничивания определяются значения МДС и фазного тока I_m .

Значение индуктивности фазной обмотки в конце МКИ

$$L_{k\alpha} = \frac{W \Phi_m}{I_m}, \quad (13)$$

где W - число витков основной обмотки.

Угловую скорость вращения, которой соответствуют насыщенные значения индуктивности и тока в конце МКИ можно определить из выражения (3) при $i_0 = 0$

$$\omega = \frac{1}{K_{\alpha}} \left[\frac{U(1 - \xi^{2a+1})}{I_m} - R \right], \quad (14)$$

где $K_\alpha = (L_{к\alpha} - L_{о\alpha})/\alpha$; α - угловое значение МКИ.
 Так как $\alpha = f(\omega)$, то угловая скорость вращения определяется итеративным путем. На первом шаге итерации

$$\omega' = \frac{1}{K_\alpha} \left[\frac{U(1-\xi)}{I_m} - R \right]. \quad (15)$$

Относительная погрешность вычисления угловой скорости вращения после каждого шага итерации определяется по формуле

$$\Delta_\omega = \frac{\omega - \omega'}{\omega} = \frac{\xi(1-\xi^{\alpha'})}{1-\xi^{\alpha'+1} - I_m^*}, \quad (16)$$

где $\alpha' = \frac{R}{\omega' K_\alpha}$; $I_m^* = I_m \frac{R}{U}$.

При известном насыщенном значении индуктивности и соответствующей этому значению скорости вращения по формулам (4) ... (18) вычисляются среднее и действующее значения тока и электромагнитного момента ВРД.

Во втором разделе рассмотрены особенности электромеханического преобразования энергии в ВРД, его энергетическая диаграмма и электромагнитный КПД, показаны пути повышения последнего, вывод формул предельного электромагнитного момента ВРД и выражения скоростной и механической характеристик, показаны возможности управления рабочими характеристиками двигателя.

Полная мощность, поступающая в фазу ВРД из источника ЭДС без учета магнитных потерь, может быть определено следующим образом:

$$P_\alpha = P_{эл\alpha} + P_{эм\alpha} + P_\psi, \quad (17)$$

где $P_{эл\alpha}$ - среднее значение электрических потерь в фазе;
 $P_{эм\alpha}$ - среднее значение электромагнитной мощности; P_ψ - среднее значение мощности, расходуемой на изменение энергии магнитного поля.

При линейной аппроксимации кривой изменения индуктивности в пределах МКИ

$$P_{\alpha} = UI_{ср\alpha}; \quad P_{эл\alpha} = RI_{\alpha}^2; \quad P_{эм\alpha} = \frac{\omega}{2} I_{\alpha}^2 K_{\alpha}; \quad (18)$$

$$P_{\omega} = \frac{\omega}{2} I_{\alpha}^2 K_{\alpha} + \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} \omega I_{\alpha} L_{\alpha} \frac{di_{\alpha}}{d\theta_p} d\theta_p \quad (19)$$

В течение МКИ энергия, необходимая для образования магнитного поля, поступает из источника в двигатель. После отключения фазы в течение интервала затухания тока β запасенная в магнитном поле энергия частично возвращается в источник питания. Другая часть этой энергии расходуется на дополнительные электрические потери в фазе $P_{эл\beta}$ и при наличии изменения индуктивности преобразуется в дополнительную электромагнитную мощность $P_{эм\beta}$.

Мощность, связанная с изменением энергии магнитного поля представляет собой полную мощность на интервале затухания тока

$$P_{\omega} = UI'_{ср\beta} + (I'_{\beta})^2 R + \frac{\omega}{2} (I'_{\beta})^2 K_{\beta}, \quad (20)$$

где $I'_{ср\beta}$, I'_{β} - среднее и действующее значения тока на интервале затухания β , приведенные к МКИ; K_{β} - коэффициент изменения индуктивности на интервале затухания тока после МКИ.

Мерой интенсивности обмена энергией между фазой двигателя и сетью является реактивная мощность

$$Q = UI'_{ср\beta}. \quad (21)$$

Следовательно, среднее значение мощности, потребляемой из источника за интервал между включениями фазы без учета магнитных потерь

$$P_i = P_{эм\alpha} + P_{эм\beta} + P_{эл\alpha} + P_{эл\beta}. \quad (22)$$

В диссертационной работе показано, что электромагнитный КПД двигателя можно представить в виде функции безразмерных коэффициентов

$$\eta_{эм} = \frac{(1 + K_{эм}) \eta_{\alpha}}{1 + K_{\omega} \eta_{\alpha}}. \quad (23)$$

Здесь $K_{эм} = \frac{P_{эмв}}{P_{эм\alpha}}$; $\eta_{\alpha} = \frac{P_{эм\alpha}}{P_{\alpha}}$; $K_w = \frac{Q}{P_{эм\alpha}}$.

Если процесс затухания тока после МКИ организован так, что $(P_{эм\alpha} + P_{эм\alpha}) \gg (P_{эмв} + P_{эмв})$, то электромагнитный КПД двигателя приближенно вычисляется по формуле

$$\eta_{эм} = \frac{1}{2Q + 1} \quad (24)$$

Полученные соотношения позволяют определить параметры ВРД, обеспечивающие экстремальное значение электромагнитного КПД, которое соответствует минимальному значению отношения $R/\omega K_{\alpha}$. В работе показано, что увеличение электромагнитного КПД связано со снижением параметра $\partial\epsilon_0$, которое может быть достигнуто увеличением длительности МКИ и уменьшением индуктивности фазы в начале МКИ.

Увеличение длительности МКИ, как следует из уравнения (19), благоприятно сказывается на уменьшении мощности, расходуемой на изменение энергии магнитного поля (P_w). Снижение этой мощности в соответствии с уравнением (20) приводит к уменьшению потерь на интервале затухания тока.

Наиболее предпочтительным способом увеличения КПД является уменьшение индуктивности фазы в начале МКИ.

При проектировании ВРД часто ставится задача обеспечения требуемого электромагнитного момента при наперед заданных значениях угловой скорости вращения и напряжения питания. Однако существует предельное значение момента, который может развить двигатель при заданном режиме работы

$$M_{пр} = \frac{U^2}{8\omega^2 K_A} \quad (25)$$

где K_A - коэффициент изменения проводимости на МКИ, равный отношению изменения магнитной проводимости к угловому значению МКИ.

При допущении о линейном изменении проводимости и постоянном значении тока на МКИ получены выражения, указывающие на аналогию скоростной и механической характеристик ВРД соответствующим характеристикам двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТ):

$$n = \frac{U}{C_e K_{\varphi} I_{ср\alpha}} - \frac{R}{C_e K_{\varphi}} ; \quad (26)$$

$$n = \frac{U \sqrt{C_m}}{C_e \sqrt{2 K_{\varphi} M_{ср\alpha}}} - \frac{R}{C_e K_{\varphi}} . \quad (27)$$

Здесь $C_m = \frac{W}{\alpha}$; $C_e = 2\pi C_m$; $K_{\varphi} = (L_{\alpha\alpha} - L_{\alpha\alpha})/W$.

Подобно ДПП управление частотой вращения ВРД осуществляется посредством ограничения напряжения питания. Кроме того, существуют еще два важных параметра доступных для управления. Это угол включения фазной обмотки и угол ее отключения. Управление двигателем в этом случае достигается искусственным изменением длительности включенного состояния фазы и изменением параметров, определяющих переходный процесс и значение потребляемого тока. Это позволяет в широких пределах изменять рабочие характеристики ВРД. Управление углами включения и отключения фазы осуществляется со стороны слаботоковых цепей и поэтому является более гибким и дешевым, чем управление напряжением или током двигателя.

В третьем разделе получено уравнение связи геометрических и электромагнитных параметров, дан анализ пульсаций магнитного поля в базовых конструкциях ВРД, предложены методика расчета рабочих характеристик в относительных единицах и инженерная методика электромагнитного расчета двигателя, дано описание программы расчета ВРД на ЭВМ.

При расчете ВРД часто возникает задача предварительного определения диаметра ротора статора, необходимого для обеспечения заданного электромагнитного момента на валу двигателя в номинальном режиме работы. При принятой системе упрощающих допущений указанный диаметр вычисляется по формуле

$$D_a = \frac{N_s (\mu_0 \alpha M_{ср\alpha} + K_m \frac{\ell_s}{\varphi} C K_m^2 B_s^2 \delta^2)}{\pi K_m^2 B_s^2 K_m^2 \delta \ell_s (\frac{\alpha_s}{K_m} - \frac{K_r}{\varphi})} . \quad (28)$$

Здесь N_s - число полюсов статора; μ_0 - магнитная постоянная; $K_m = 0,86 \dots 1,0$ - отношение действующего значения тока к максимальному; l_s - аксиальная длина воздушного зазора; $\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha$ - угол между спрямленной цилиндрической поверхностью полюса статора и боковой поверхностью полюса ротора в начале МКИ; K_m - коэффициент насыщения магнитной цепи в конце МКИ; B_g - индукция в воздушном зазоре; δ - радиальный воздушный зазор между цилиндрическими поверхностями полюсов статора и ротора; α_g - расчетный коэффициент полюсной дуги; $K_r = 2,4 \cdot 10^{-3}$; $C = 4,7$ - постоянные коэффициенты.

Значения всех этих величин могут быть априорно заданы на начальном этапе проектирования ВРД.

На основе проведенного анализа пульсаций магнитного потока в различных сечениях магнитной цепи ВРД сделаны следующие выводы:

- частота коммутации зависит от числа полюсов статора и ротора;

- гармонический состав пульсаций потока в некоторых частях магнитной цепи зависит от полярности включения смежных фаз и от числа полюсов ротора;

- с целью снижения магнитных потерь полярность включения обмоток многофазных ВРД ($m > 3$) должна быть такой, чтобы смежные полюса фаз, коммутируемых в течение одного цикла, являлись одноименными.

В основе инженерной методики расчета ВРД лежит ряд упрощающих допущений, оговоренных при выводе математической модели, которые позволяют получить аналитическую связь между геометрическими размерами магнитной цепи, обмоточными данными и электромеханическими характеристиками двигателя.

На первом этапе проектирования по рекомендациям, данным в диссертационной работе выбирается число полюсов статора и ротора, а также соотношение между полюсными дугами статора и ротора. Затем по формуле (28) приближенно вычисляется внутренний диаметр рашотки статора и определяется МДС фазной обмотки, необходимая для создания требуемого электромагнитного момента. Значения МДС и магнитной проводимости обуславливают выбор среднего сечения магнитной цепи. Далее производится расчет характеристики намагничивания. Если насыщение отдельных элементов магнитной цепи или машины в целом не удовлетворяет выдвинутым требованиям, то изменяется геометрия ВРД

0399168

и повторяется расчет характеристики намагничивания. После окончательного выбора геометрии уточняется значение МДС фазной обмотки при номинальном режиме работы и рассчитываются обмоточные данные двигателя. Электромагнитный расчет ВРД завершается построением рабочих характеристик без учета магнитных потерь. Магнитные потери при необходимости можно приближенно рассчитать по любой из известных методик и учесть при построении рабочих характеристик.

По инженерной методике составлена программа расчета магнитной цепи и рабочих характеристик ВРД на ЭВМ. Программа составлена в диалоговом режиме на языке ФОРТРАН-IV в операционной системе РАФОС и реализована на ЭВМ типа ДВК-2.

Четвертый раздел посвящен экспериментальным исследованиям ВРД, которые проводились с целью проверки соответствия расчетных данных действительным параметрам и характеристикам двигателя, а также с целью подтверждения правомерности принятой системы упрощающих допущений. Объектом исследований являлся трехфазный вентильный реактивный двигатель ЭДБР-14 с трансформаторной обмоткой, спроектированный в соответствии с рекомендациями изложенными в диссертации.

Исследования включали в себя:

- снятие рабочих характеристик ВРД;
- снятие характеристик намагничивания при различных углах положения ротора;
- определение зависимости индуктивности и взаимной индуктивности фазных обмоток от угла положения ротора при различных значениях фазной МДС;
- определение проводимости потока рассеяния фазной обмотки.

На рис. 4 показаны рабочие характеристики 3х фазного ВРД снятые экспериментально (сплошная линия) и рассчитанные по предложенной методике (штриховая линия). Данные двигателя: число полюсов статора - 6, число полюсов ротора - 2, МКИ - 60 град. Номинальный режим работы: $n = 14000$ об/мин; $P_2 = 600$ Вт; $M_{ср} = 0,41$ Н м; $U = 28$ В.

На рис. 5 представлены графические зависимости индуктивности фазной обмотки при различных уровнях насыщения и график зависимости взаимоиндуктивности смежных фаз от угла поворота ротора.

На основании сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных сделаны следующие выводы:

- математическая модель с достаточной для практических целей точностью отражает реальные процессы, протекающие в двигателе;

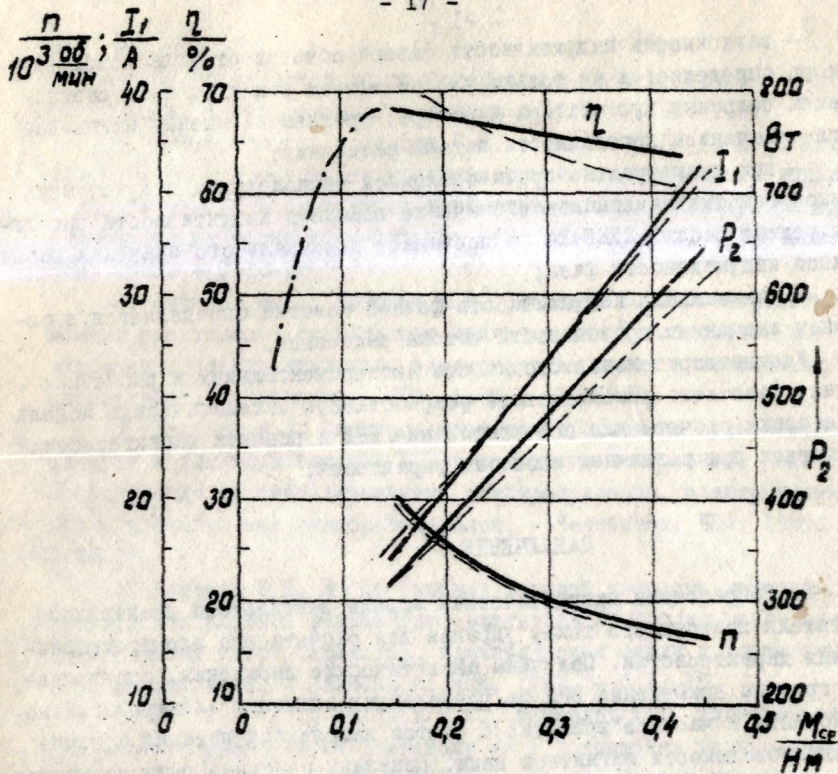


Рис. 4. Рабочие характеристики трехфазного ВРД

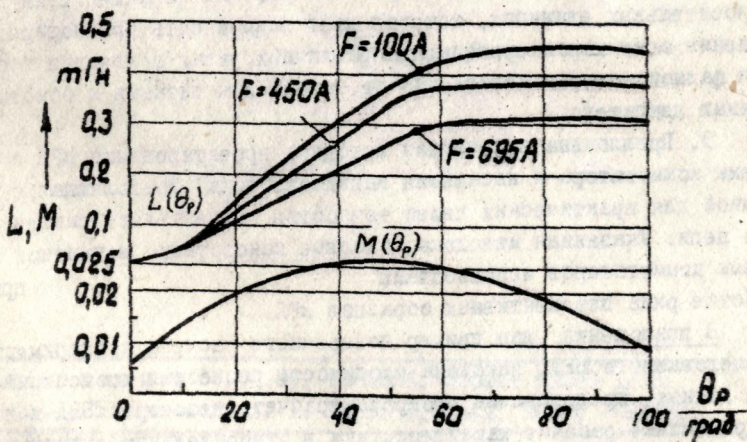


Рис. 5. Графики индуктивности и взаимной индуктивности от угла поворота ротора

- зависимость индуктивности фазной обмотки от угла положения ротора определяется не только числом витков обмотки, но и соотношением полюсных дуг статора и ротора; уровнем насыщения магнитной цепи, значением проводимости потока рассеяния;

- при диаметрально противоположном расположении полукатушек фазной обмотки максимальное значение взаимной индуктивности при любом режиме работы ЭДБР-14 не превышает максимального значения собственной индуктивности фазы;

- минимальная индуктивность фазной обмотки определяется в основном значением проводимости потока рассеяния.

Удовлетворительная сходимость экспериментальных и расчетных данных позволяют рекомендовать разработанную математическую модель и методику расчета для проектирования ВРД и расчета характеристик двигателя при различных способах управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель вентильного реактивного двигателя постоянного тока, удобная для расчета его электромеханических характеристик. Получены аналитические выражения, определяющие границы применения ВРД по предельному значению электромагнитного момента и частоте вращения с учетом напряжения питания и изменения проводимости магнитной цепи. Показаны основные пути повышения электромагнитного КПД.

2. Разработана методика расчета рабочих характеристик ВРД в относительных единицах, которая дает возможность прогнозировать изменение этих характеристик при различных углах включения и отключения фазной обмотки независимо от напряжения питания и обмоточных данных двигателя.

3. Предложена инженерная методика проектирования ВРД с учетом схемы коммутатора и насыщения магнитопровода, позволяющая с достаточной для практических целей точностью осуществлять синтез магнитной цепи. Указанная методика, базовые конструкции магнитной цепи и схемы коммутаторов использованы при разработке ряда перспективных образцов ВРД.

В приложении дан пример поверочного расчета экспериментально исследованного ВРД, показана сходимость расчетных и экспериментальных данных, представлена программа расчета геометрии ВРД и построены расчетные рабочие характеристики в относительных единицах при различных углах коммутации фазной обмотки.

Основное содержание диссертационной работы отражено в печатных трудах, опубликованных в период с 1983 по 1987 г.г.

1. Лифанов В.А., Мармелев Г.Н., Томашев В.П. Разновидности конструкций и особенности рабочего процесса реактивного вентиляного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляных преобразователей. - Челябинск: ЧПИ, 1983. - С.10-16.

2. Лифанов В.А., Тиманов А.В., Томашев В.П. Электромагнитный момент реактивного вентиляного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляных преобразователей. - Челябинск: ЧПИ, 1983. - С.16-21.

3. Томашев В.П. Электромеханические процессы преобразования энергии и электромагнитный КПД реактивного вентиляного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляных преобразователей. - Челябинск: ЧПИ, 1985. - С.18-23.

4. Томашев В.П. Выбор базовой угловой скорости вращения при расчете вентиляного реактивного двигателя // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентиляных преобразователей. - Челябинск: ЧПИ, 1987. - С.22-25.

5. Томашев В.П., Лифанов В.А., Мармелев Г.Н. Элементы теории вентиляного реактивного двигателя // I Всесоюзная научно-техническая конференция по электромехатронике. Тезисы докладов. - Ленинград: ЛЭТИ, 1987. - С.32-33.

Томашев

Подписано к печати 03.05.89. ФВ00056. Формат 60X90 1/16.

Печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 169/490.

УОП ЧПИ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.