

05.09.12 (043)

3 - 615

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

На правах рукописи

ЗИЛЬБЕРМАН Семен Зосимович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСКОНТАКТНЫХ
МОМЕНТНЫХ МИКРОДИГИТАЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Специальность 05.09.01 - "Электрические машины"

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Свердловск
1978



Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
В.А.Лифанов.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.И.Скороспешкин (г.Куйбышев);
кандидат технических наук, доцент
И.М.Беседин (г.Москва).

Ведущая организация указана в решении Специализированного совета.

Задача состоится "4" декабря 1978 г. на заседании Специализированного совета К 063.14.04 по присуждению ученых степеней кандидата технических наук Уральского политехнического института им. С.М.Кирова. Главный учебный корпус, ауд. 3-503, 8/4 час. 45 мин.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского политехнического института им. С.М.Кирова.

Отрыв в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направить по адресу: 620002, г.Свердловск, К-2, УПИ им. С.М.Кирова, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан "—" 1978 года.

Ученый секретарь
специализированного совета

Бартоумей

П.И.БАРТОЛОМЕЙ



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Технический прогресс и необходимость постоянного повышения уровня автоматизации технологических процессов, совершенствования систем управления и регулирования определяют постоянный рост требований к точностным, энергетическим и другим показателям электромеханических исполнительных элементов автоматики. Среди этих элементов заметное место занимают моментные двигатели (МД), являющиеся основой системы управления позиционным положением различного рода объектов.

В системах с неограниченным углом поворота наиболее широко применяются МД переменного тока, причем в подавляющем большинстве случаев - асинхронные двигатели и значительно реже - индукторные и синхронные. Однако, как справедливо отмечается в ряде исследований, при всех известных достоинствах МД переменного тока не могут обеспечить необходимого в безредукторном моментном приводе удельного врачающего момента при ограничениях габаритах двигателя. Это обстоятельство является причиной того, что в последнее время все большее распространение получают моментные двигатели постоянного тока (МДПТ).

Существенным недостатком МДПТ классического исполнения является наличие коллекторно-щеточного контакта, что снижает надежность работы двигателя и значительно усложняет его конструкцию. Этого недостатка лишены бесконтактные моментные двигатели постоянного тока (БМДПТ) с непрерывной или дискретной коммутацией, получающие все более широкое применение в специальных системах моментного электропривода. При этом предпочтение отдается БМДПТ с непрерывной коммутацией, реализуемой, как правило, с помощью синусно-косинусного врачающегося трансформатора. Вопросам теории таких двигателей посвящено значительное количество работ, в том числе работы Л.И.Столова и его учеников, В.П.Милонгрова, В.Н.Бродовского и ряда других авторов, при весьма ограниченном числе известных нам публикаций, посвященных исследованию и разработке БМДПТ с дискретной коммутацией обмоток якоря. В то же время, как показывают исследования, такие двигатели в ряде случаев оказываются более предпочтительными. Поэтому исследование такого класса двигателей в направлении уточнения их теории и обоснования возможности применения в системах момент-

ного привода, а также создания современных инженерных методов расчета этих машин является актуальной задачей.

Цель работы. Целью работы является теоретическое исследование, обоснование наиболее рациональной конструкции и разработка методики оптимального проектирования БМДПТ. Указанная цель достигается в результате решения следующих основных вопросов:

- сравнительного анализа БМДПТ с непрерывной и дискретной коммутацией;
- разработки специальной конструкции индуктора, приспособленного к использованию современных магнитно-твёрдых сплавов;
- анализа пульсаций электромагнитного момента и разработки путей их уменьшения;
- разработки уточненной методики расчета рабочего потока постоянных магнитов;
- разработки инженерной методики и алгоритма оптимального проектирования БМДПТ.

Научная новизна. Проведен сравнительный анализ БМДПТ с непрерывной и дискретной коммутацией. На основе сопоставительного анализа традиционных конструкций индукторов обоснована возможность получения оптимального с точки зрения использования габаритов конструктивного решения. Реализован вариационный метод при решении задачи расчета рабочего потока призматического постоянного магнита для линейной среды. Исследованы пульсации электромагнитного момента БМДПТ с дискретной коммутацией. Получены аналитические соотношения, связывающие электромагнитные и конструктивные параметры двигателя, необходимые для разработки методики оптимального проектирования БМДПТ.

Практическая ценность. Обоснована перспективность использования в моментном приводе БМДПТ с дискретной коммутацией. Разработаны мероприятия, направленные на уменьшение пульсаций электромагнитного момента. Предложена тангенциально-торцевая конструкция индуктора, обеспечивающая высокое использование габаритов. Разработан алгоритм расчета геометрии индуктора, алгоритм расчета магнитных потоков тангенциально-торцевого индуктора с постоянными магнитами, алгоритм расчета двигателя в целом, а также алгоритм блока-оптимизатора, необходимого для реализации задачи оптимального проектирования двигателя.

Реализация результатов работы. Результаты работы использованы при создании ряда типоразмеров БМДПТ с дискретной коммутацией.

Апробация работы. Результаты работы были доложены на следующих конференциях:

1. На научно-технической конференции Ленинградского института авиационного приборостроения, 1975 г.
2. На Второй Всесоюзной научно-технической конференции "Бесконтактные машины постоянного тока и их применение в промышленности и народном хозяйстве", Москва, 1975 г.
3. На научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола, 1975 г., 1976 г., 1977 г., 1978 г.

Публикация. По результатам исследования опубликовано семь печатных работ, в том числе одно авторское свидетельство.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе работы выполнен сравнительный анализ БМДПТ с непрерывной и дискретной коммутацией, предложен ряд решений по разработке конструкции двигателя.

Сравнение схем построения моментного привода на основе бесконтактных моментных двигателей постоянного тока показывает, что схема привода с непрерывной коммутацией является более сложной.

Существенным преимуществом моментного привода на основе двигателей с дискретной коммутацией является наличие двух раздельных каналов управления. Как известно, в системах управления позиционным положением на одном валу с МД, как правило, устанавливаются информационные элементы, реализующие преобразование угол-код. При этом появляется возможность отказа от установки датчика положения ротора (ДПР), который при использовании БМДПТ с дискретной коммутацией лишь дублирует это преобразование.

При использовании двигателей с непрерывной коммутацией ДПР одновременно преобразует информацию угол поворота ротора-код и информацию входного управляющего сигнала. Вследствие этого специальный ДПР, реализующий указанные преобразования, в этом случае является обязательным элементом. К преимуществу БМДПТ с непрерывной коммутацией следует отнести плавное (в идеальном случае) вращение реазультирующего вектора н.с. статора и, как следствие, отсутствие пульсаций электромагнитного момента. Однако при построении реальных систем не удается с необходимой точностью реализовать требуемый закон изменения тока в секциях

двигателя, что является причиной появления пульсаций момента в процессе его поворота. Согласно имеющимся в литературе данным на практике не удается получить пульсации момента менее 7%.

Основной причиной сравнительно редкого использования двигателей с дискретной коммутацией в моментном приводе являются пульсации момента, обусловленные скачкообразным характером перемещения н.с. статора, а также коммутационными процессами в обмотке при переключении секций. Между тем исследования показывают, что при правильном выборе тактности или способа коммутации пульсации, обусловленные указанными факторами, оказываются весьма малыми. Если при этом принять во внимание, что моментный привод на основе двигателей с дискретной коммутацией реализуется проще, то они в ряде случаев могут оказаться предпочтительными.

Так же, как и в случае коллекторных моментных двигателей, режим, условия работы, габаритные ограничения, а также специфика предъявляемых требований накладывают свои особенности на конструктивное исполнение МД. Анализ этих особенностей и рекомендаций по выбору активных материалов и разработке элементов конструкции достаточно полно представлены в литературе. Вместе с тем применение новых магнитно-твердых сплавов на основе интерметаллических соединений кобальта с редкоземельными сплавами (ГОСТ 25559-76) с высокими значениями максимальной магнитной энергии и низкими значениями остаточной индукции накладывает ряд особенностей на конструкцию индуктора рассматриваемых двигателей.

Сравнение традиционных конструкций индукторов показывает, что они имеют существенные недостатки, затрудняющие их применение в моментных двигателях. В этом отношении более предпочтительной оказывается тангенциально-торцевая конструкция индуктора (рис.1), принятая в качестве базовой.

Основные достоинства такой магнитной системы следующие:

1. Возможность в одних и тех же габаритах изменять в больших пределах концентрацию магнитного потока в вазоре путем изменения числа магнитов, приходящихся на один полюс.

2. В рассматриваемой конструкции индуктора все магниты образуют одну непрерывную ломанную поверхность и отделяют ферромагнитные клинья полюсов от станины. Вследствие этого потоки рассеяния имеют место в основном лишь торцевых поверхностей ферромагнитных клиньев полюсов. При необходимости эти потоки рассея-

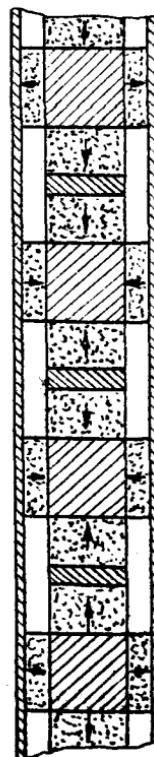
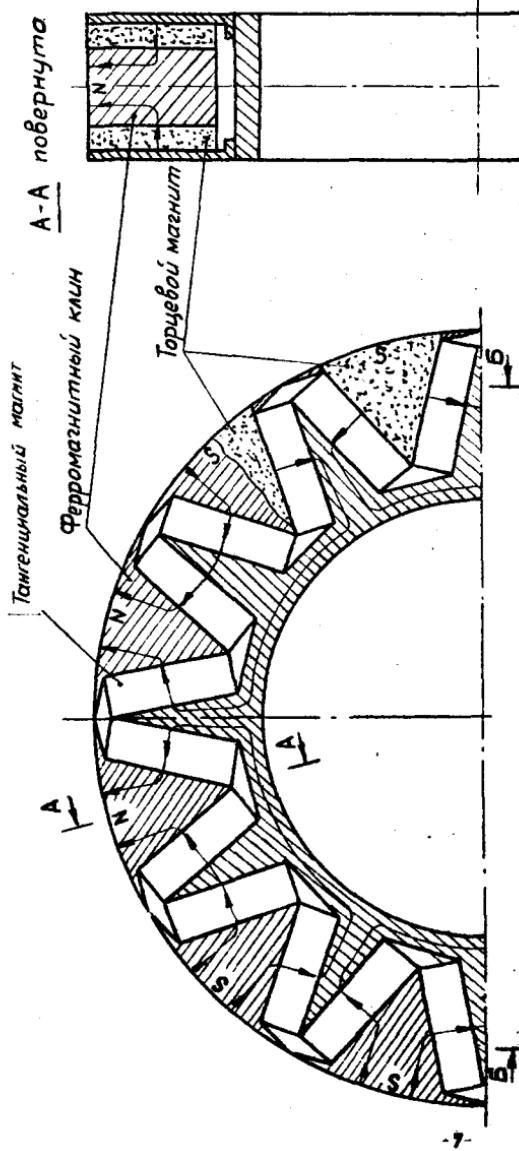


Рис. 1

нил могут быть устранины с помощью дополнительных торцевых магнитов, устанавливаемых между магнитными экранами и торцевыми поверхностями клиньев.

3. По минимальному сечению ярма индуктора проходит не весь магнитный поток. В связи с этим высота ярма индуктора получается меньшей, чем, например, при радиальном расположении постоянных магнитов.

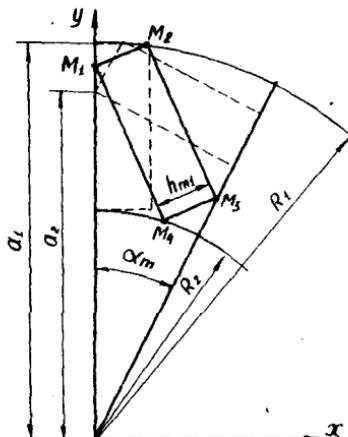


Рис.2

Задачей расчета геометрии рассматриваемой магнитной системы является размещение магнита заданной высоты h_m внутри сектора (рис.2) с центральным углом α_m , наружным радиусом R_1 и внутренним радиусом R_2 . Другими словами, при заданных h_m , α_m , R_1 , R_2 необходимо определить координаты характерных точек M_i (x_i, y_i); $i=1,2,3,4$.

В работе получена система уравнений, связывающая искомые переменные, однако найти решение этой системы в аналитической форме не представляется возможным.

Предложенный в работе алгоритм приближенного решения системы предполагает предварительное задание величины y_1 . Нижняя a_1 и верхняя a_2 границы изменения координаты y_1 определяются из предельных положений магнита внутри выделенного сектора. При этом предварительное значение y_1 выбирается в центре промежутка $[a_1, a_2]$. При известном y_1 последовательным решением уравнений системы определяются координаты точек M_2 , M_3 и M_4 . Выход из алгоритма организуется при выполнении условия

$$\frac{|R_2 - \sqrt{x_4^2 + y_4^2}|}{R_2} \leq \epsilon,$$

где ϵ - малый параметр, характеризующий точность решения задачи. В противном случае выполняется итерационный цикл, в процессе которого уточняется значение параметра y_4 и повторяются вычисления координат характерных точек.

Вторая глава работы посвящена разработка уточненной методики расчета рабочего потока призматических постоянных магнитов.

Как известно, потоки рассеяния в магнитных системах с постоянными магнитами можно подразделить на внешние по отношению к магниту, проходящие по всему магниту и потоки рассеяния между боковыми поверхностями смежных магнитов и (или) между боковыми поверхностями магнитов и различного рода экранами. Первые будем называть потоками рассеяния магнитной системы, вторые потоками рассеяния магнита.

Учет потоков рассеяния магнитной системы при расчете рабочих потоков постоянных магнитов не вызывает каких-либо затруднений. Потоки рассеяния магнитов приводят к непостоянству индукции как по длине магнита, так и в различных точках одного сечения, что в значительной мере усложняет решение поставленной задачи.

Наибольшее распространение в расчетной практике нашли методы, в основе которых лежит использование цепных схем замещения. Методологические основы построения и использования таких схем достаточно полно рассмотрены в научной и технической литературе. Как известно, построение и использование цепных схем замещения магнитных систем с постоянными магнитами основаны на допущении об одномерности поля внутри магнита, то есть о коллинеарности векторов индукции B и напряженности H . Такое допущение игнорирует тот факт, что поток рассеяния магнита создается лишь периферийным его участком, примыкающим к соответствующей боковой поверхности и предполагает равномерное распределение искомого потока по всему объему магнита.

В работе показано, что указанное допущение является причиной ограниченной применимости цепных схем замещения для рассматриваемого класса задач. При этом искажающее влияние допущения о коллинеарности векторов B и H в наибольшей мере сказывается для

коротких (имеется ввиду размер вдоль оси намагниченности) магнитов, работающих в условиях близких к короткому замыканию их боковых поверхностей.

Принятая в качестве базовой конструкция индуктора ориентирована на использование современных высокозэффективных магнитно-твердых сплавов. При этом ширина и длина магнита может в несколько раз превышать его высоту. Кроме того, характерным для такой конструкции индуктора является работа магнита в режимах близких к короткому замыканию его боковых поверхностей. Указанные обстоятельства являлись предпосылкой к разработке методики расчета рабочего потока, опирающейся на более строгую систему допущений.

Исходные расчетные соотношения в диссертационной работе получены в предположении, что топография магнитного поля в теле магнита известна и магнитная силовая линия внутри магнита описывается некоторыми зависимостями:

$$x = f_1(x_0, y_0, z); \quad (1)$$

$$y = f_2(x_0, y_0, z), \quad (2)$$

где x_0 и y_0 – координаты точки пересечения магнитной силовой линии с плоскостью нейтрального сечения,

Предполагается, что начало координат находится в центре нейтрального сечения, ось Z направлена вдоль оси намагниченности, а оси X и Y параллельно ребрам, ограничивающим нейтральное сечение. При этом для сплавов с линейной кривой размагничивания получены следующие уравнения (рис.3):

$$\Lambda_{ms} = \frac{1}{h_m} \iint_{D_s} \frac{h dx_0 dy_0}{\frac{1}{\mu_r} \int_{f'_1 x_0 + f'_2 y_0}^{h_m} \frac{f_1'^2 + f_2'^2}{f'_1 x_0 + f'_2 y_0} dz + d_2 \rho_h dx_0 dy_0}; \quad (3)$$

$$\Lambda_m = \iint_{D_m^*} \frac{dx_0 dy_0}{\frac{1}{\mu_r} \int_{f'_1 x_0 + f'_2 y_0}^{h_m} \frac{f_1'^2 + f_2'^2}{f'_1 x_0 + f'_2 y_0} dz + d_2 \rho_h dx_0 dy_0}, \quad (4)$$

где Λ_{ms} – проводимость магнитному потоку рассеяния магнита; Λ_m – проводимость магнитному потоку полюса; h_m – высота магнита; D_s – область формирования потока рассеяния; D_m^* –

область формирования потока полюса; h - значение координаты z в точке выхода магнитной силовой линии из тела магнита; μ_r - реверсивная проницаемость материала магнита; $d_2 \rho_s$ - сопротивление участка элементарной трубки лежащей между боковой поверхностью магнита и экраном; $d_2 \rho_h$ - сопротивление внешнего относительно магнита участка элементарной трубки потока магнит-полюсный наконечник.

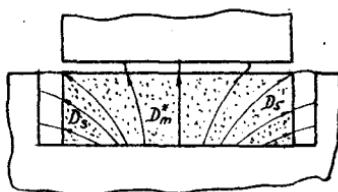


Рис. 3

Уравнение (3), (4) могут служить основой для получения численных результатов только при известной топографии магнитного поля. Принципиально возможным следует признать определение топографии поля непосредственным решением уравнений Максвелла. Однако, как известно, такой путь встречает значительные затруднения.

Более предпочтительным является так называемый экстремальный или, что то же, вариационный подход к решению задачи магнитостатики. Сущность этого подхода заключается в том, что решение уравнений Максвелла получают минимизацией некоторого функционала, называемого интегралом действия.

В работе показано, что условие минимума интеграла действия для рассматриваемого класса задач совпадает с условием

$$\Lambda = \max_{f_1(x_0, y_0, z)} (\Lambda_{ms} + \Lambda_m). \quad (5)$$

Здесь составляющие Λ_{ms} и Λ_m определяются уравнениями (3) и (4).

Таким образом, условие минимума интеграла действия для задач магнитостатики, вытекающее из уравнений Максвелла, в рассматриваемом случае эквивалентно условию максимума полной маг-

витной проводимости, равной сумме проводимости потоку полюса и проводимости рассеяния магнита. Формальная эквивалентность дифференциальных уравнений Максвелла и вариационной задачи (5) имеет важное методологическое значение. Целесообразность вариационного подхода определяется тем, что при удачном выборе класса пробных функций определение экстремальных значений соответствующего функционала позволяет получить хорошее приближение там, где непосредственное решение исходных дифференциальных уравнений вообще не представляется возможным.

В качестве пробных функций в работе предлагается рассматривать семейство парабол

$$f_1(x_0, y_0, z) = f_1(x_0, z) = x_0 + \varphi_1(x_0) \cdot z^2; \quad (6)$$

$$f_2(x_0, y_0, z) = f_2(y_0, z) = y_0 + \varphi_2(y_0) \cdot z^2. \quad (7)$$

При этом

$$\Lambda = \max_{\begin{array}{l} \varphi_1(x_0) \\ \varphi_2(y_0) \end{array}} \left\{ \int \int \frac{h dx_0 dy_0}{\frac{1}{\mu_r} J(\varphi_1, \varphi_2, h) + d_2 \rho_s dx_0 dy_0} + \right. \\ \left. + \int \int \frac{dx_0 dy_0}{\frac{1}{\mu_r} J(\varphi_1, \varphi_2, t) + d \rho_h dx_0 dy_0} \right\}, \quad (8)$$

где $J(\varphi_1, \varphi_2, h)$ – функциональные зависимости, получаемые после подстановки (6) и (7) в подынтегральное выражение знаменателя (3) либо (4) и соответствующего интегрирования. Здесь все переменные представлены в относительных единицах, причем в качестве базового значения проводимости принята величина $\mu_0 h m$, в качестве базового значения линейных размеров – hm , и в качестве базового значения проницаемости величина μ_0 .

Решение вариационной задачи (8) в работе реализовано методом динамического программирования. При этом обосновывается целесообразность следующего допущения: можно считать, что магнитный поток рассеяния магнита, выходящий через определенную боковую поверхность и область его формирования зависит только от параметров зазора между этой поверхностью и соответствующими

ферромагнитными участками магнитной системы и инвариантен по отношению к соответствующим параметрам зазоров у остальных боковых поверхностей. Последнее допущение обеспечивает одномерность исходной задачи.

Для реализации поставленной задачи уравнение (8) в работе представлено в виде конечной суммы. Получены соответствующие этому случаю рекурентные уравнения и рассмотрен алгоритм их решения.

Принципиально возможно включение полученного алгоритма в общий алгоритм расчета двигателя в качестве его участка, либо в качестве отдельной подпрограммы. Следует однако отметить, что время, необходимое для однократной реализации такой вычислительной процедуры даже на такой быстродействующей ЭВМ, как ЕС-1030, составляет несколько минут. Если при этом принять во внимание итеративный характер процесса расчета двигателя, а также необходимость расчета определенного множества его вариантов при постановке задачи оптимального проектирования, то становится очевидным, что прямое использование такого алгоритма в задачах синтеза неприемлемо. Это обстоятельство являлось предпосылкой перестройки исходной модели. Конечной целью такого перестроения является получение модели в виде алгебраических уравнений непосредственно связывающих выходную характеристику с исходными параметрами. Поставленная задача была реализована с применением идей и методов теории планирования эксперимента.

В результате проведения полного факторного эксперимента типа 2^4 был получен полином для определения глубины проникновения потока рассеяния в тело магнита для случая $t = \text{const}$

$$\Delta Y_0^* = 0,1204 + 0,0168 b_{m2} + 0,237 b_J - \\ - \mu_r t (0,156 - 0,173 b_J - 0,086 b_{m2} b_J)$$

и для $\delta = \text{const}$

$$\Delta Y_0^* = 0,1204 + 0,0168 b_{m2} + 0,237 b_J - \\ - \mu_r t (0,0317 + 0,0244 b_{m2} + 0,0343 b_J),$$

где b_{m2} и b_{m1} – соответственно короткая и длинная сторона магнита; t – расстояние между боковой поверхностью и экраном при равномерном зазоре между ними; δ – угол между той же поверх-

ности и экраном при угловом зазоре. Здесь

$$b_3 = M_r b_{m1} b_{m2} \rho_n.$$

На втором этапе аппроксимации проводился полный факторный эксперимент 2^3 . При этом в качестве третьего фактора рассматривалась величина b_3 . В результате было получено аппроксимирующее уравнение для длинной стороны магнита

$$\lambda_M = 1 + \Delta Y_0^* [0,869 - 0,1023 b_{m2} - (0,0869 - 0,0113 b_{m2})(b_{m1} - b_{m2})]$$

и для короткой стороны

$$\lambda_M = 1 + \Delta Y_0^* (0,869 - 0,1023 b_{m2}).$$

Здесь

$$\lambda_M = M_m / S_m^*,$$

где S_m^* – площадь соответствующего участка области формирования потока полюса.

Экспериментальные исследования показали, что предложенная методика расчета рабочего потока магнита во всех реальных режимах, включая режимы короткого замыкания его боковой поверхности, обеспечивают достаточную для инженерных расчетов точность.

Третья глава работы посвящена анализу пульсаций электромагнитного момента (ЭМ) БМДПТ с дискретной коммутацией. Как выше отмечалось, эти пульсации рассматриваются как основное препятствие для использования подобных двигателей в качестве исполнительных элементов моментного привода.

В работе исследованы пульсации ЭМ в функции угла поворота ротора для двигателя, имеющего гладкий якорь с трехсекционной обмоткой.

Выход общего уравнения электромагнитного момента БМДПТ осуществлен с учетом способа коммутации и в предположении, что обмотка, состоящая из дискретно распределенных на поверхности якоря проводников с токами, заменена поверхностными токовыми слоями. При этом действительное распределение тока аппроксимируется поверхностной плотностью тока i_n или, что то же, линейной нагрузкой А на рассматриваемом участке окружности якоря и вводится понятие пространственных волн названных величин. При указанных допущениях в работе получено уравнение ЭМ соот-

ветствующее трапециoidalному характеру распределения поля в зазоре:

$$M = \frac{M_m}{\varphi} \left[\sin \frac{\pi \beta}{2} \cdot \sin \psi \cdot \cos \psi + \sum_{\nu=1}^{\infty} C_{\nu} \left(\frac{\sin \frac{k_1 \pi \beta}{2} \cdot \sin k_1 \psi}{k_1^3} \cdot \cos \psi k_1 - \frac{\sin \frac{k_2 \pi \beta}{2} \cdot \sin k_2 \psi}{k_2^3} \cdot \cos k_2 \psi \right) \right], \quad (9)$$

где

$$M_m = \frac{4\sqrt{3} l_a D^2 B_{dm} A}{\pi}; \quad C_{\nu} = 1 \text{ при } \lambda = 120^\circ;$$

$$M_m = \frac{6 l_a D^2 B_{dm} A}{\pi}; \quad C_{\nu} = (-1)^{\nu} \text{ при } \lambda = 180^\circ;$$

l_a - длина якоря; D - диаметр якоря; A - амплитуда волны линейной нагрузки для одного токового слоя; B_{dm} - амплитуда пространственной волны индукции; ψ - пространственный угол, характеризующий зону ослабленного магнитного поля; β - относительный шаг обмотки; ψ - пространственный угол между магнитной осью ротора и вертикальной осью симметрии волны линейной нагрузки; λ - угол коммутации. Среднее значение электромагнитное момента на межкоммутационном интервале определено в виде

$$M_{cp} = \frac{3M_m}{\pi \varphi} \left[\sin \frac{\pi \beta}{2} \cdot \sin \psi + \sum_{\nu=1}^{\infty} C_{\nu} \left(\frac{\sin \frac{k_1 \pi \beta}{2} \sin k_1 \psi}{k_1^4} + \frac{\sin \frac{k_2 \pi \beta}{2} \sin k_2 \psi}{k_2^4} \right) \right]$$

Здесь $C_{\nu} = (-1)^{\nu}$ при $\lambda = 120^\circ$;

$C_{\nu} = 1$ при $\lambda = 180^\circ$.

Численный анализ уравнения (9) показал, что для полностью распределенных лучевых обмоток пульсации ЭМ минимальны при 120-градусной коммутации и диаметральном шаге, а также при 180-градусной коммутации с относительным шагом $\beta = 2/3$. Кроме того, величина пульсаций ЭМ существенным образом зависит от угла ψ и уменьшается с уменьшением этого параметра.

Для моментных двигателей основным критерием эффективности преобразования потребляемой мощности в электромагнитный момент является коэффициент использования

$$K_u = \frac{M}{\gamma P},$$

где P – потребляемая мощность. В работе получено уравнение для коэффициента использования в виде:

$$K_u = k_k (m_\beta - m_\varphi) l_a D B_{Vm} \sqrt{\frac{Q_m}{k_t l_{cp}}} , \quad (10)$$

где $k_k = \begin{cases} 0,31 \cdot 10^4 & \text{при } \lambda = 120^\circ; \\ 0,269 \cdot 10^4 & \text{при } \lambda = 180^\circ; \end{cases}$

m_β – составляющая среднего момента, зависящая от шага обмотки; m_φ – составляющая, характеризующая уменьшение момента с увеличением зоны ослабленного поля.

Для оценки эффективности укорочения обмотки по коэффициенту использования в работе исследовалось отношение коэффициента использования при произвольном шаге к коэффициенту использования при диаметральном шаге:

$$U = \frac{K_u(\beta \neq 1)}{K_u(\beta = 1)} .$$

В результате анализа этого отношения была получена зависимость оптимальных значений β от конструктивных параметров обмотки и показано, что условие минимума пульсаций ЭМ не совпадает с условием получения экстремальных значений коэффициента использования. Тем не менее в работе обоснована целесообразность применения обмоток с диаметральным шагом для 120-градусной коммутации и обмоток с относительным шагом $\beta = 2/3$, для 180-градусной коммутации, обеспечивающих минимум пульсаций ЭМ.

В работе рассмотрены также пульсации ЭМ БМДПТ с дискретно распределенными обмотками, когда между участками поверхности якоря, в пределах которых проводники можно считать равномерно распределенными (эти участки называют условными пазами) имеются промежутки. Уравнение пульсаций ЭМ в рассматриваемом случае определяется в виде

$$\Delta m = \frac{(\varphi - \alpha_n)^2}{2\psi \left(\frac{4\pi}{3} - 2\alpha_n - \varphi \right) + \varphi^2 - \alpha_n^2} ,$$

где $2\alpha_n$ – угловое расстояние между смежными условными пазами. Анализ последнего уравнения показал, что пульсации ЭМ максимальны для $\alpha_n = 0$, то есть для полностью распределенных обмоток и полностью устраниются при $\alpha_n = \varphi$. С энергетической точки зрения можно рекомендовать выполнение обмоток с минимально возможным значением параметра α_n , обеспечивающим требуемый уровень

пульсаций ЭМ. Для заданного уровня Δm параметр α_n определяется уравнением

$$\alpha_n = \frac{1 - \alpha - 2\Delta m(1 - \alpha) - 2\sqrt{\Delta m(1 - \alpha)} [\Delta m(5/3 - 1,5\alpha) - 1/3 + \alpha/2]}{2(1 + \Delta m)},$$

где α - коэффициент полюсного перекрытия.

Распределение тока для замкнутой трехфазной обмотки при 120-градусной (180-градусной) коммутации полностью эквивалентно распределению тока при 180-градусной (120-градусной) коммутации для лучевой трехфазной обмотки. Поэтому результаты исследований для лучевых обмоток непосредственно распространяются на замкнутые обмотки с учетом указанной эквивалентности.

В четвертой главе работы рассматриваются основы расчета БМДЛТ. При этом выделяются следующие вопросы:

1. Схема замещения магнитной цепи БМДЛТ с тангенциальными-торцевым индуктором и расчет рабочих потоков.
2. Анализ уравнений связи геометрических и электромагнитных параметров.
3. Организация алгоритма расчета БМДЛТ.
4. Организация блока-оптимизатора на основе алгоритма Кифера и обеспечение его совместной работы с алгоритмом расчета двигателя.

При определении рабочих потоков магнитов непосредственно в магнитной системе БМДЛТ приходится учитывать, что в создании потока принимают участие как основные тангенциальные, так и вспомогательные (торцевые) магниты. Поэтому внешний относительно каждого из магнитов участок магнитной цепи содержит активный элемент, являющийся источником н.с. Как показано в работе, указанное обстоятельство является причиной нелинейного характера системы уравнений, описывающих рассматриваемую задачу. На основе анализа этой системы предложен алгоритм решения искомой задачи, который служит основой для разработки соответствующих подпрограмм.

Анализ уравнений связи показал, что число переменных, подлежащих определению в процессе расчета двигателя, превышает число уравнений. Это обстоятельство является причиной того, что при известных исходных данных, в качестве которых в работе рассматривались габариты двигателя, система исходных уравнений может иметь бесконечное множество корней. При этом возникает необходимость выбора конкретного двигателя из определенного мно-

жества различных его вариантов, что позволило сформулировать задачу оптимального проектирования двигателя в виде задачи нелинейного программирования.

Анализ различных критерииев оптимальности показал, что для БМДЛТ наиболее целесообразно оптимизируемым параметром считать коэффициент использования (10), а в качестве независимых переменных оптимизации целесообразным оказывается выбрать число пар полюсов, число клиньев на полюс N_k , высоту тангенциального h_{m1} и торцевого h_{m2} магнитов и суммарный немагнитный зазор δ . Как и в общей задаче нелинейного программирования в рассматриваемом случае действует система функций ограничения, определяющая область допустимых значений независимых переменных.

Блок-оптимизатор реализован на основе совмещения покоординатного метода оптимизации с алгоритмом Кифера; этот алгоритм предполагает последовательный выбор интервалов неопределенности и проведение внутри каждого нового интервала однократного вычисления функции цели. При этом внутри начального интервала неопределенности L_0 проводятся два эксперимента, расположенных симметрично относительно его концов на расстоянии.

$$P_t = L_0 \left[\frac{F_{t-\ell}}{F_t} + \frac{(-1)^t \varepsilon}{F_t} \right],$$

где ε - конечный интервал неопределенности;

(F_t) - последовательность чисел Фибоначчи;

t - номер числа.

Циклическое сокращение интервала неопределенности позволяет после проведения t экспериментов завершить поиск по координате, что значительно сокращает общее время поиска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты выполненной работы сводятся к следующему:

1. На основании сравнительного анализа БМДЛТ различных типов показана перспективность использования в моментном приводе бесконтактных двигателей постоянного тока с дискретной коммутацией. При этом существенно облегчается согласование элементов системы и в ряде случаев отпадает необходимость в установке датчика положения ротора.

2. Анализ пульсаций электромагнитного момента БМДПТ, вытекающих из самого принципа его работы, показал, что они во всех случаях не превосходят требуемых пределов. В работе указаны пути уменьшения этих пульсаций на основе схемных и конструктивных решений. При этом получены обоснованные рекомендации по выбору способа коммутации, относительно шага обмотки, закона распределения поля в воздушном зазоре и степени сосредоточенности обмотки.

3. На основе анализа существующий конструкций магнитных систем установлено, что в пределах традиционных конструктивных схем индукторов с постоянными магнитами не удается в полной мере использовать высокие свойства современных магнитно-твердых сплавов. В работе предложена тангенциально-торцевая конструкция индуктора, обеспечивающая более высокое использование габаритов, которая принята в качестве базовой для бесконтактных моментных двигателей постоянного тока. Новизна такого технического решения подтверждается авторским свидетельством на изобретение.

4. Особенности исполнения базовой конструкции индуктора БМДПТ, в котором магниты работают в режимах, близких к короткому замыканию их боковых поверхностей, а также особенности магнитно-твердых материалов, полученных на основе соединений кобальта с редкоземельными металлами, предопределили необходимость разработки уточненной методики расчета магнитных проводимостей магнитов. Предложенная в работе экстремальная модель задачи определения магнитных проводимостей может служить основой для синтеза алгоритма решения задачи расчета магнитных потоков в магнитных системах, содержащих призматические постоянные магниты. На базе этой исходной модели методами планирования эксперимента получена полиноминальная модель, погрешность которой относительно исходной составляет величину не более 3%.

5. Анализ исходных уравнений связи геометрических и электромагнитных параметров показал, что при организации алгоритма оптимального проектирования БМДПТ в заданных габаритах в качестве независимых переменных можно выбрать число полюсов, число клиньев на полюс, высоту торцевого магнита, высоту тангенциального магнита и суммарный воздушный зазор, а в качестве критерия оптимизации коэффициент использования заданных габаритов.

6. На основе совмещения метода покоординатной оптимизации с алгоритмом Кифера реализован блок-оптимизатор, реализующий це-

ленаправленный перебор независимых переменных при решении экстремальных задач. Результаты анализа показали целесообразность применения изложенного метода оптимизации как на этапе анализа, так и на этапе синтеза двигателей.

7. Выполненные в работе расчеты ряда БМДПТ с тангенциально-торцевой конструкцией индуктора подтвердили высокую эффективность последней и показали правомерность методики расчета этих двигателей и разработанного на его основе алгоритма их оптимального проектирования.

Основным практическим результатом работы следует считать реализацию в промышленных образцах содержащихся в ней основных рекомендаций. Выполненные на основе этих рекомендаций моментные двигатели показывали соответствие их специальному техническим требованиям.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Либанов В.Л., Мармелев Г.Н., Зильберман С.З. Минимаксная стратегия в задачах оптимизации электрических машин. - В сб.: Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей, № 158. Челябинск, ЧПИ, 1975.
2. Мармелев Г.Н., Либанов В.А., Зильберман С.З. Основные расчетные уравнения бесконтактного моментного двигателя постоянного тока с тангенциально-торцевой конструкцией индуктора. - В сб.: Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей, № 176. Челябинск, ЧПИ, 1976.
3. Зильберман С.З. Организация блока оптимизатора по алгоритму Кифера в задачах оптимального проектирования электрических машин. Там же.
4. Либанов В.А., Мармелев Г.Н., Зильберман С.З. Оптимальное проектирование БМДПТ с якорем на диэлектрической основе. - В сб.: Бесконтактные машины постоянного тока и их применение в промышленности и народном хозяйстве. Доклады Второй Всесоюзной научно-технической конференции, М., МАИ, 1977.
5. Зильберман С.З. Расчет потока рассеяния с торцевой поверхности кольцевого магнита в арматуре с применением моделей экс-

тремальных задач. В сб: Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей № 196. Челябинск, ЧПИ, 1977.

6. Лифанов В.А., Мармелев Г.Н., Зильберман С.З. Индуктор электрических машин. Авт.свид. № 560292. - "Открытия изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки", 1977, № 20.

7. Лифанов В.А., Мармелев Г.Н., Зильберман С.З. Расчет тангенциально-торцевого индуктора с постоянными магнитами. -"Электротехника", № 1, 1978.