

15.01.
ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Петров Петър Колев

**РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С НЕПОДВИЖНЫМ
ГЕНЕРАТОРОМ ВОЛНОВОЙ
ДЕФОРМАЦИИ И МЕТОДИК ЕГО
ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ПРАКТИЧЕСКОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ**

05. 09. 01 — электрические машины

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Харьков, 1993

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00801507 (L)

ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Петров Петър Колев

**РАЗРАБОТКА ВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ
С НЕПОДВИЖНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ ВОЛНОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ И
МЕТОДИК ЕГО ТЕОРЕТИЧЕСКОГО И ПРАКТИЧЕСКОГО**

ИССЛЕДОВАНИЯ

05.09.01 - электрические машины

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Харьков - 1993

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре электрических машин Харьковского политехнического института.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Наний В.П.


Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Яковлев А.И.
- кандидат технических наук,
доцент Петренко Н.Я.

Ведущая организация - СКБ НПО "Укрэлектромаш"
(г. Харьков)

Защита диссертации состоится "27" января 1994 г.
в 14 час. 30 мин. на заседании специализированного совета
К 068.39.04 в Харьковском политехническом институте
(310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского политехнического института.

Автореферат разослан "24" декабря 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета  Егоров Б.А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. В современных автоматизированных системах становится необходимой точная отработка определенного перемещения рабочего органа. Это требует применения тихоходных управляемых электроприводов. В практике нашло применение сочетание управляемого тихоходного электродвигателя с понижающим редуктором и передаточным механизмом. Основные требования, предъявляемые к такому приводу - быстродействие, высокая точность отработки заданного перемещения, отсутствие самохода. Указанные качества требуют соответствующей компоновки электродвигателя, редуктора, надежной системы управления, системы контроля и обратной связи. Для решения этих проблем становится актуальной задача разработки прецизионных, надежных, тихоходных электроприводов, в которых не будет необходимости применения редукторного механизма и сложной системы управления. Внедрение электродвигателей с катящимся ротором является первым шагом в этой области, но они обладают рядом недостатков: сравнительно сложным механизмом передачи вращения от эксцентрично движущегося ротора; повышенными вибрациями, вследствие вышеуказанной причины; при фрикционном обкатывании возможно появление проскальзывания при больших нагрузках, которое ведет к неточной отработке перемещения. Указанные проблемы нашли решение в разработке волновых электродвигателей (ВЭД), в которых деформируемое под действием электромагнитных сил гибкое зубчатое колесо осуществляет зацепление с жестким зубчатым колесом и, вследствие разницы в числе зубцов, возникает редукция скорости вращения в больших пределах. Разработаны единичные образцы ВЭД, но отсутствует их серийное производство, а также нет достаточно полной теории, описывающей протекающие в них процессы. Общей чертой отдельных конструкций является то, что электромагнитный генератор волновой деформации (ЭМГВД) подвижен и не все конструкции обеспечивают максимальный тормозной момент при отсутствии питания. Чтобы сделать возможным серийное производство ВЭД, становится необходимым решение следующих задач: разработки технологичной для производства конструкции ВЭД с неподвижным ЭМГВД; использование гибких зубчатых колес, обеспечивающих нормальную работоспособность для длительного периода времени; создание теории, которая позволит осуществить расчет, проектирование и оптимизацию созданных образцов. Разработ-

ка ВЭД с неподвижным ЭМГВД и дифференциальной волновой зубчатой передачей позволит достичь указанные качества и свойства, необходимые на практике.

Настоящая работа выполнена на кафедре основ электротехники и электроэнергетики и кафедре электроснабжения и электрооборудования промышленных предприятий Высшего машинно-электротехнического института города Габрово (Болгария) совместно с кафедрой электрических машин Харьковского политехнического института (Украина).

Цель работы. Целью диссертационной работы явилась разработка нового типа ВЭД с неподвижным ЭМГВД на базе стандартных узлов, выпускаемых предприятиями Болгарии и Украины, вывод основных теоретических зависимостей, описывающих процессы, протекающие в ВЭД и разработка инженерных методов предварительного определения основных размеров, для использования в производственных условиях.

Задачи, которые решались для достижения поставленной цели:

а) разработка конструкции ВЭД с неподвижным ЭМГВД посредством использования стандартных статоров асинхронного электродвигателя типа А0-032/2 фирмы "Елпром" - г.Тетевен и АИР, выпускаемого полтавским заводом "Электромотор", а также гибких и жестких зубчатых колес дифференциальной волновой передачи, выпускаемых фирмой "Берое", ПШВР "Вълна" - г. Стара Загора;

б) вывод основных аналитических зависимостей, описывающих электромеханическое преобразование энергии ВЭД с вращающимся магнитным полем и ВЭД при шаговом питании:

- определение энергии и действующих сил, с учетом закона волновой деформации;

- вывод аналитических выражений магнитной проводимости в переменных воздушных зазорах для ВЭД с произвольным числом фаз питания;

- определение выражения вращающего момента на валу электродвигателя;

- исследование влияния числа фаз питания на вращающий момент в ВЭД, который работает в шаговом режиме;

в) анализ возможных схем питания эффективного ЭМГВД;

г) разработка целостной инженерной методики предварительного определения основных размеров ВЭД с использованием стандартных узлов;

д) определение условий нормальной работы ВЭД.

Методика научных исследований включает: общие методы анализа электромагнитных полей с использованием уравнений Максвелла в интегральном виде, метод полной математической индукции, экспериментальные методы регистрации элементарных перемещений с высокой частотой, регистрация и анализ переходных процессов в электрических машинах.

Автор защищает следующие положения:

- конструкцию ВЭД с неподвижным ЭМГВД, разработанную на базе стандартных узлов;
- теоретические выводы, относящиеся к электромеханическому преобразованию энергии ВЭД с вращающимся магнитным полем (энергия магнитного поля, электромагнитные силы и вращающий момент);
- теоретические выводы, относящиеся к электромеханическому преобразованию энергии ВЭД в шаговом режиме (энергия магнитного поля, электромагнитные силы, вращающий момент, влияние числа фаз питания на величину вращающего момента);
- методику определения основных размеров узлов при проектировании ВЭД и использовании стандартного статора и стандартных гибких и жестких зубчатых колес.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- предложена новая конструкция ВЭД с неподвижным ЭМГВД, в которой радиальное движение магнитопроводящих элементов трансформируется во вращательное;
- осуществлен вывод аналитических выражений, необходимых для создания теории ВЭД с неподвижным ЭМГВД как с вращающимся магнитным полем, так и в шаговом режиме питания;
- получены нетрадиционные экспериментальные результаты, являющиеся следствием особенностей сконструированного ВЭД, имеющие важное практическое значение.

Практическая ценность работы:

- изделие изготовлено на базе стандартных узлов;
- предложена конструкция, в которой нет вращающихся деталей, за исключением выходного жесткого зубчатого колеса (получена конструкция без подшипников);
- достигнута отработка угловых перемещений с точностью до $69'$ - $75'$, которые зависят от коррекции применяемых жесткого и гибкого зубчатых колес;
- на практике нет самохода, вследствие отсутствия вращающихся масс и наличия зубчатого зацепления;
- достигнут значительный тормозной момент при отсутствии

питания;

- исследована возможность использования различных схем питания и конструкций статора, которые не приводят к конструктивным изменениям в остальных узлах;

- разработана методика проектирования узлов предложенной конструкции и поверочного расчета;

- разработана простая схема управления БЭД.

Реализация работы. Изготовленный экспериментальный образец после необходимых испытаний подтверждает свои характеристики и качества тихоходового исполнительного электродвигателя с большой кинематической точностью и практическим отсутствием самохода. Указанные качества, вместе с простой схемой управления, делают его применимым в автоматизированных системах.

Изделие после дополнительных технологических уточнений принято к внедрению на АД "Арсенал" - г.Казанльк в автоматическом узле машин для специального производства.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Общевойсковой научной сессии, посвященной 40 летию кафедры электротехники и авиационного оборудования - ВВВУ "Г.Бенковский", г. Д.Митрополия, 27 - 28 октября 1988 г.;

- научной конференции "Высший машинно-электротехнический институт" - г.Габрово, 23 - 25 октября 1991 г., 25 - 27 ноября 1992 г.;

- научно-техническом семинаре кафедры основ электротехники и электроэнергетики - ВМЭИ - г.Габрово.

Публикации. Результаты, полученные в процессе работы, отражены в 8 публикациях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации 177 страниц, из них текста - 125 страниц; рисунков - 43 страницы; литература изложена на 5-ти страницах и содержит 80 наименований, приложений - 2 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований. Отражена необходимость использования тихоходных, точно позиционирующих электродвигателей в системах ав-

томатического управления и в кинематических системах, требующих точного перемещения. На базе решенных проблем и достигнутых результатов в двигателях с катящимся ротором (ДКР) сформулированы основные требования к разработке и конструкции ВЭД. Отражены имена выдающихся ученых, работающих в этой области, а также указаны причины, из-за которых для ВЭД отсутствует достаточно полная теория и такие двигатели находятся на этапе исследования и разработки.

Первая глава посвящена рассмотрению некоторых характерных особенностей работы ВЭД и их конструкций. Сделана классификация известных конструкций ВЭД по определенным признакам, причем подчеркиваются их преимущества и недостатки, как с функциональной точки зрения, так и с технологической точки зрения. Признаки, по которым проводится классификация, следующие: по способу возникновения магнитного поля; по виду обмоток статора; по конструкции ротора; по конструкции магнитной системы.

С целью использования стандартных узлов при разработке новой конструкции ВЭД самым подходящим классом становятся ВЭД с цилиндрическим волновым ротором. Дана их классификация, подчеркнуты преимущества и недостатки. Здесь можно перечислить следующие разновидности: с металлическим тонкостенным ротором; с тем же самым ротором, заполненным магнитопроводящей подвижной средой (ферромагнитным порошком или жидкостью); с гибким ротором и насаженной на него обмоткой; с гибким ротором, сделанным из магнитопроводящих гофрированных шайб.

Как продолжение работы в этой области перед настоящей диссертацией ставятся задачи: разработки работоспособной модели ВЭД, имеющей непосредственный интерес для практического применения в промышленности; изготовления теоретической модели с выводом основных аналитических зависимостей, являющихся базой для дальнейшего совершенствования и оптимизации; разработки методики проектирования и технологии производства основных узлов ВЭД; получения экспериментальных результатов и выводов. Поставленные задачи решаются при следующих общепринятых допущениях: принимается, что магнитная система ненасыщена; не учитываются вихревые и поперечные токи в стали; из-за наличия воздушных зазоров в магнитных системах влияние гистерезиса незначительное и при исследованиях им пренебрегают; не учитываются краевые эффекты.

Во второй главе рассматриваются разработанная конструкция ВЭД и схемы реализации ЭМГВД. На основе сделанного обзора конструктивных решений, делается мотивация выбора разработанной конструк-

пии. Можно указать ее следующие основные моменты: вынос гибкого зубчатого колеса и зубчатого зацепления за активную зону электродвигателя с целью уменьшения рабочего воздушного зазора; использование магнитопроводящих элементов в конструкции ЭМГВД; преимущества и недостатки аксиального и радиального замыкания магнитного потока; меры по улучшению технологичности и максимальному использованию стандартных узлов и элементов.

На основе перечисленных соображений и мирового опыта при конструировании и производстве ДКР разработана следующая конструкция, показанная на рис.1.

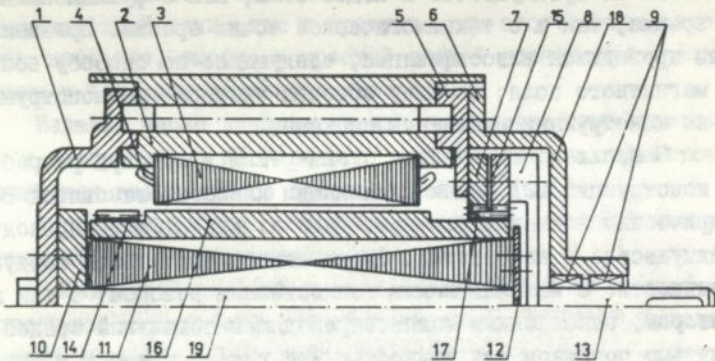


Рис.1. Общий вид разработанного волнового электродвигателя с неподвижным генератором волновой деформации:

- 1,18 - щиты; 2 - корпус; 3 - статор; 4 - трехфазная обмотка; 5,8 - фланцы; 6 - крышка; 7,15 - жесткие зубчатые колеса; 9 - подшипники; 10,12 - втулки; 11 - генератор волновой деформации; 13 - выходной вал; 14,17 - гибкие зубчатые кольца; 16 - магнитопроводящие элементы; 19 - стержень

Статор 3, собранный из листовой электротехнической стали, в пазах которого расположена трехфазная обмотка 4 с числом пар полюсов $2p = 2$. Статор 3 вместе с обмоткой 4 установлен в корпус 2 двигателя. Через фланец 5 неподвижное зубчатое колесо 7 дифференциальной зубчатой передачи прикрепляется к корпусу двигателя. От подвижного зубчатого колеса 15, посредством фланца 8, вращательное движение передается выходному валу 13 с подшипниками 9. ЭМГВД реализуется посредством магнитопровода 11, в пазах которого расположены подвижные магнитопроводящие элементы 16, входящие в полость

гибкого зубчатого колеса 17 дифференциальной волновой передачи. С левой стороны магнитопроводящие элементы ограничиваются гибким кольцом 14, имеющим те же эластичные свойства, как и гибкое зубчатое колесо 17. Магнитопровод 11, собран из листовой электротехнической стали и насажен на стержень 19. Для ограничения перемещения магнитопроводящих элементов в осевом направлении имеются втулки 10 и 12, прикрепленные винтами к 11. Справа двигатель закрывается подшипниковым щитом 18, а слева - щитом 1, к которому прикрепляется неподвижный магнитопровод 11. Оба щита 1, 18 вместе с фланцем 5 закрепляются к корпусу двигателя с помощью шпилек. Число зубцов жесткого зубчатого колеса 7 и гибкого зубчатого колеса 17 одинаковое, а жесткого зубчатого колеса 15 и гибкого 17 - различается на 2. В предложенной конструкции использован стандартный статор асинхронного электродвигателя типа А0-032/2, а жесткие и гибкие зубчатые колеса являются элементами серийно выпускаемых болгарскими ведущими фирмами волновых редукторов. Действие ВЭД заключается в следующем: при отсутствии питания статорной обмотки, ЭМГВД не генерирует волну, гибкое зубчатое колесо 17 находится в свободном состоянии и имеет цилиндрическую форму. При включении обмотки статора, в воздушном зазоре ВЭД возникает вращающееся магнитное поле. Электромагнитные силы, воздействующие на магнитопроводящие элементы ЭМГВД, заставляют их колебаться по такому закону, что форма гибкого зубчатого колеса 17 и гибкого кольца 14 будет иметь вид эллипса. В результате получается двустороннее зубчатое зацепление между гибким зубчатым колесом 17 и жесткими зубчатыми колесами 7 и 15. Из-за одинакового числа зубцов 7 и 17, в этой части не возникает вращающий момент, и разница в зубцах шестерен 15 и 17 приводит к вращению жесткого зубчатого колеса 15 по отношению к деформируемому гибкому зубчатому колесу 17. Таким образом, генерированная волновая деформация преобразуется в зубчатом зацеплении между 15 и 17 в медленное вращение, которое передается выходному валу 13 и имеет скорость: $\omega_2 = \omega_1 \cdot (z_1 - z_2) / z_1$, где: z_1 - число зубцов жесткого зубчатого колеса 15, z_2 - число зубцов гибкого зубчатого венца. Возвращение магнитопроводящих элементов в пазы магнитопровода, в места, где электромагнитные силы малы, осуществляется под воздействием упругих сил гибкого зубчатого колеса 17 и гибкого кольца 14. В разработанной конструкции предусмотрен вывод вращательного движения жесткого зубчатого колеса на выходной вал с помощью фланца. ВЭД может изготавливаться и без фланца, так как на жестком зубчатом колесе имеются отверстия с резьбой, позволяющие осуществ-

влять кинематическую связь другими способами, в зависимости от потребностей потребителя. В рассматриваемой конструкции реализован ВЭД с неподвижным ЭМГВД, причем радиальное движение магнитопроводящих элементов преобразуется в зубчатых колесах 15 и 17 во вращение. Наличие дифференциальной передачи и неподвижного зубчатого колеса 7, сцепленного с общим гибким зубчатым колесом 17, приводит к наличию максимального тормозного момента при выключении питания. Конструкция двигателя защищена авторским свидетельством № 87145 в Болгарии.

Во второй главе также рассмотрены возможные схемы питания ЭМГВД, — подчеркнуты преимущества, недостатки, соображения как с функциональной точки зрения, так и с технологической. На базе разработанных схем питания ДКР с явнопольсным ротором предложена схема питания явнопольсного ВЭД с двухволновой деформацией ЭМГВД. Чтобы добиться такой деформации необходимо устранить вентили во встречновключенных обмотках, что вызывает появление двусторонних диаметрально противоположных сил. Доказательством функциональности такой схемы являются полученные пространственно-временные характеристики распределения МДС в статоре, направление и величина векторов результирующих электромагнитных сил. Недостатком этой конструкции является то, что из-за применения концентрических обмоток, полюсная зона статора используется не лучшим образом. Для использования стандартного статора и устранения указанного недостатка, предложено питание ВЭД трехфазной симметричной системой напряжений. Такая схема была изготовлена, а эксперименты подтвердили ее нормальную работоспособность.

Недостатком этой схемы являются значительные энергетические потери и малый к.п.д., так как питание получает вся обмотка, а деформация гибкого звена необходима в более узкой зоне. Для устранения этого недостатка ВЭД с вращающимся магнитным полем предлагается использовать шаговое питание статора. Наличие постоянного зубчатого зацепления между жестким и гибким зубчатыми колесами требует при такой схеме формирования полюса наличия нескольких зубцов (фаз), причем включение последующих фаз должно сопровождаться выключением последней фазы из данного полюса. Таким способом обеспечивается наличие постоянно работающих фаз, что требует поддержания зацепления между жестким и гибким зубчатыми колесами. Эта схема питания наиболее применима для ВЭД, отрабатывающих очень малые угловые перемещения. В работе рассмотрена схема питания с единичными зонами, смещенными на 180° по расточке статора (однофазная и

трехфазная реализация).

В третьей главе рассматриваются следующие проблемы:

а) электромеханическое преобразование энергии ВЭД с вращающимся магнитным полем;

Этот вопрос рассматривается при общепринятых допущениях, сделанных в первой главе. Для математического описания электромеханического преобразования, используется цилиндрическая система координат, началом которой считается центр O окружности статора и ось Z , которая совпадает с осью статора двигателя. Угол α отсчитывается от оси фазы A , и так как $2p = 2$, геометрические и электрические координаты становятся равными. Основная гармоника результирующей МДС трехфазной обмотки, при питании симметричной трехфазной системой напряжения, имеет следующий вид:

$F_1(\alpha, t) = F_1 \cdot \sin(\omega t - \alpha - \beta)$, где β - угол между продольной осью ротора и амплитудой волны МДС. Таким образом, можно записать выражение магнитной индукции в рабочем воздушном зазоре для произвольной точки с угловой координатой α , используя удельную проводимость воздушного зазора $\lambda(\alpha, t) = \mu_0 / \delta_\alpha$, где δ_α - величина рабочего воздушного зазора в точке с угловой координатой α . Величину δ_α можно определить посредством выражения $\delta_\alpha = \delta_0 - \Delta_\alpha$, где δ_0 - воздушный зазор недеформируемого ротора; Δ_α - текущее значение радиальной деформации, которое при двухволновой деформации должно подчиняться закону $\Delta_\alpha = \Delta_0 \cdot \cos 2\alpha$, где Δ_0 - максимальная радиальная деформация гибкого зубчатого колеса. Тогда для магнитной индукции $B(\alpha, t)$ получаем

$$B(\alpha, t) = \lambda(\alpha, t) \cdot F_1(\alpha, t) = \frac{\mu_0 \cdot F_1 \cdot \sin(\omega t - \alpha - \beta)}{\delta_0 \cdot (1 - \beta^2 \cdot \cos 2\alpha)}; \quad \beta^2 = \frac{\Delta_0}{\delta_0}$$

Полная энергия магнитного поля в воздушном зазоре может быть записана:

$$W_\delta = \iiint \vec{B} \cdot \vec{H} \cdot dV = \frac{1}{\mu_0} \int_{R_2 - \delta_\alpha}^{R_2} \int_0^{2\pi} \int_0^L B^2(\alpha, t) \cdot \rho \cdot d\rho \cdot d\alpha \cdot dz,$$

где: $R_2^{(v)}$ - радиус отверстия статора, L - осевая длина пакета статора.

После математических преобразований получаем выражение энергии в воздушном зазоре:

$$W_\delta = \frac{\pi \cdot \mu_0 \cdot L \cdot F_1^2}{2} \left[\frac{R_2}{\Delta_0} \cdot \cos 2(\omega t - \beta) - \frac{1}{2} \right]. \quad (1)$$

Зацепление жесткого и гибкого зубчатых колес показано на

рис.2.

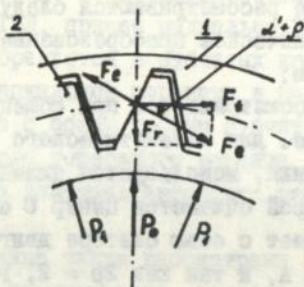


Рис.2. Трансформация радиальнодействующих сил в зубчатом зацеплении и их составляющие:

F_t - тангенциальная сила; F_r - радиальная сила; α' - угол зацепления; ρ - угол трения; 1 - жесткое зубчатое колесо; 2 - гибкое зубчатое колесо

При введении зубцов упругого зубчатого колеса между зубцами жесткого зубчатого колеса появляется сила трения, при этом сила взаимодействия F_e отклоняется по отношению к тангенциальной силе на угол $\alpha' + \rho$. Радиальная сила $F_r = P'_{(\alpha,t)} = P_{(\alpha,t)}/2$ представляет собой 0,5 величины целой радиальнодействующей силы из-за двустороннего поддерживания магнитопроводящих элементов.

$$P_{(\alpha,t)} = \frac{B_{(\alpha,t)}^2 \cdot ds}{2 \cdot \mu_0} = \frac{L \cdot R_2 \cdot \mu_0 \cdot F_t \cdot \sin^2(\omega t - \alpha - \beta) \cdot d\alpha}{2 \cdot \delta_0^2 \cdot (1 - \beta^2 \cos 2\alpha)^2} \quad (2)$$

где: $ds = R_2 \cdot L \cdot d\alpha$

После нагрузки гибкого кольца радиальнодействующими силами, оно получит изменение своего диаметрального размера по осям x и y .

$$\delta_x = \frac{P_i R^3}{E \cdot J} \cdot \left\{ \sin^2 \varphi + 0,6366 [\pi \cdot \sin \varphi - 2(\varphi \cdot \sin \varphi + \cos \varphi)] + 1 - 2 \cdot \sin \varphi \right\} = \frac{P_i R^3}{E \cdot J} \cdot f_x(\varphi);$$

$$\delta_y = \frac{P_i R^3}{E \cdot J} \cdot \left\{ \frac{1}{2} (\pi - \sin 2\varphi - 2\varphi) + 0,6366 [\pi \cdot \sin \varphi - 2(\varphi \cdot \sin \varphi + \cos \varphi)] \right\} = \frac{P_i R^3}{E \cdot J} \cdot f_y(\varphi)$$

В зависимости от числа зубцов (Z) статора, можно определить соответствующие перемещения δ_{xi} , δ_{yi} , которые соответствуют действующей силе P_i

$$\delta_{xi} = \frac{P_i \cdot R^3}{E \cdot J} \cdot [\cos \varphi_i \cdot f_x(\varphi_i) + \sin \varphi_i \cdot f_y(\pi/2 - \varphi_i)];$$

$$\delta_{yi} = \frac{P_i \cdot R^3}{E \cdot J} \cdot [\cos \varphi_i \cdot f_y(\varphi_i) + \sin \varphi_i \cdot f_x(\pi/2 - \varphi_i)]; \quad (3)$$

где: $\psi_i = i \cdot \theta$; $\theta = 2\pi/z - i$ - номер зуба, E - модуль эластичности, J - момент инерции.

Общее изменение диаметрального размера по обеим осям под действием всех сил может быть записано в виде: $\delta_x = \sum_{i=0}^z \delta_{xi}$; $\delta_y = \sum_{i=0}^z \delta_{yi}$

Отсюда условие для полного зацепления зубцов упругого зубчатого колеса и зубцов жестких зубчатых колес, а отсюда и условие для нормальной работы ВЭД, имеет следующий вид $\delta_y/2 \geq \Delta_0$.

В настоящей главе определяется и выражение для вращающего момента ВЭД. В отличие от ВЭД с подвижным ЭМГВД, в котором имеет место синхронный реактивный момент, при неподвижном ЭМГВД момент создается тангенциально действующими силами F_t , которые являются результатом действия радиальных электромеханических сил

$$F_t = P(\alpha, t) / 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha' + \rho)$$

Вращающий момент определяем как момент, созданный парой действующих сил $M(\omega, t) = F_t \cdot 2 \cdot (R_2' - \delta_{\alpha})$, где $R_2' = R_2 - \delta_{\min}$, δ_{\min} - минимальный воздушный зазор. Полный вращающий момент получается после интегрирования:

$$M(\omega, t) = \frac{\mu_0 \cdot L \cdot R_2 \cdot F_1^2}{2 \cdot \delta_0^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha' + \rho)} \left[2 \cdot R_2' \int_0^{\pi} \frac{\sin^2(\omega t - \alpha - \beta)}{(1 - \delta^2 \cos 2\alpha)^2} \cdot d\alpha - 2 \cdot \delta_0 \int_0^{\pi} \frac{\sin^2(\omega t - \alpha - \beta)}{(1 - \delta^2 \cos 2\alpha)} \cdot d\alpha \right]$$

После преобразований получаем:

$$M = - \frac{\mu_0 \cdot L \cdot R_2 \cdot F_1^2 \cdot \pi}{2 \cdot \Delta_0 \cdot \operatorname{tg}(\alpha' + \rho)} \cdot \cos 2(\omega t - \beta). \quad (4)$$

Знак "-" показывает, что в ВЭД с вращающимся ЭМГВД происходит обратное движение вала по отношению к направлению распространяющейся волны деформации. При неподвижном ЭМГВД этот знак не учитывается. Чтобы получить действительный вращающий момент, необходимо учесть потери силы деформации гибкого зубчатого колеса.

(P_g - сила, необходимая для деформации гибкого зубчатого колеса, F_1 - величина действующей электромагнитной силы), $K_k = (P_g - P_1) / P_1$. Действительный вращающий момент $M_d = M \cdot K_k$.

Исследованы влияния МДС (рис.3), активной длины L (рис.4) и радиуса R_2 отверстия статора (рис.5) на величину вращающего момента. Можно сделать следующие выводы, имеющие значение при проектировании и реализации ВЭД: самое большое влияние на вращающий момент оказывают МДС и увеличение активной длины пакета статора; при разработке ВЭД (с различным вращающим моментом) исключительно важное значение имеет оптимальный выбор отношения $2R_2/L$.

Полученные результаты показывают, что на практике можно успешно применять в производстве ВЭД серийно выпускаемые статоры трехфазных двухполюсных электродвигателей, которые производятся ведущими предприятиями Болгарии и Украины.

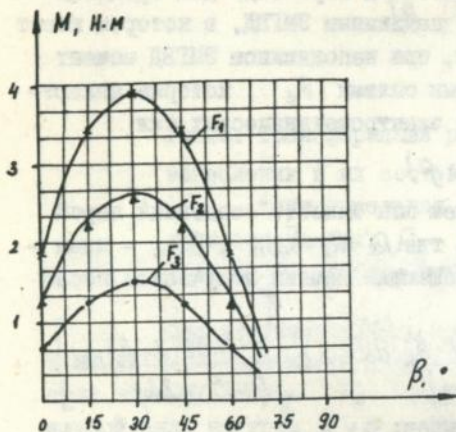


Рис.3. Зависимость амплитуды вращающего момента от величины МДС ($\omega t = 30^\circ$; $F_1 = 492,264$ А; $F_2 = 400$ А; $F_3 = 300$ А)

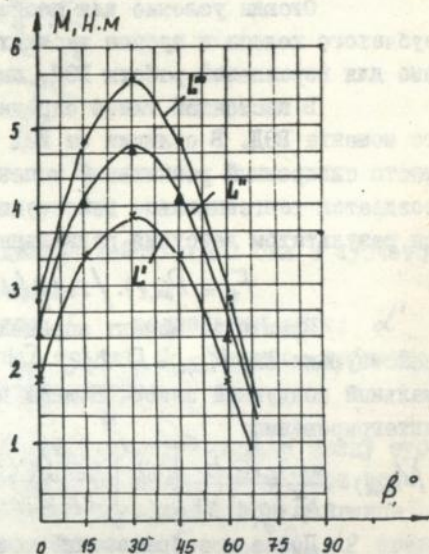


Рис.4. Зависимость амплитуды вращающего момента от длины активной части статора ($L''' = 55$ мм; $L'' = 45$ мм; $L' = 65$ мм; $F_1 = 492,264$ А; $\omega t = 30^\circ$)

На рис.6 дано сравнение статических угловых характеристик ВЭД с неподвижным ЭМГЭД, из которого видно, что он обладает следующими преимуществами по сравнению с ДКР: меньшим временем разгона; практическим отсутствием самохода; большим тормозным моментом при отсутствии питания статора.

В этой главе определены обобщенные аналитические выражения магнитных проводимостей воздушных зазоров с учетом закона волновой деформации, используемые для расчета магнитной цепи ВЭД с произвольным числом зубцов статора и позволяющие сделать расчет магнитной цепи с применением ЭВМ. На рис. 7а) показана магнитная цепь для одного зубца и магнитопроводящего элемента, а на рис.7б)-

поперечный разрез пакета статора и выбор системы координат.

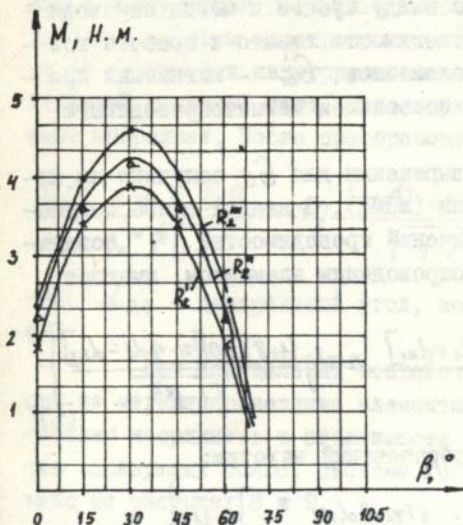


Рис.5. Зависимость амплитуды вращающегося момента от радиуса отверстия статора ($F_1 = 492,246 \text{ A}; \omega t = 30^\circ$; $R_2' = 26,75 \text{ мм}; R_2'' = 29,25 \text{ мм}; R_2''' = 31,75 \text{ мм}$)

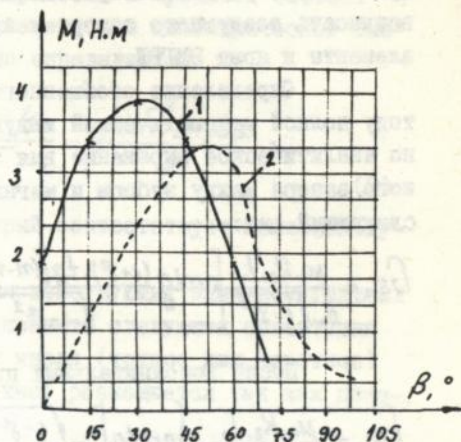


Рис.6. Сравнение статических угловых характеристик: 1 - волновой электродвигатель; 2 - электродвигатель с катящимся ротором

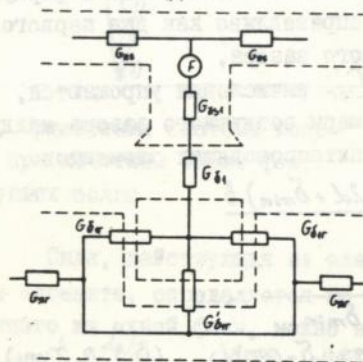


Рис.7а). Схема замещения магнитной цепи разработанного электродвигателя

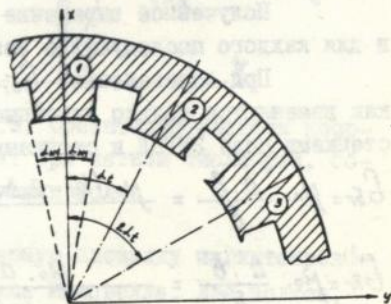


Рис.7б). Поперечный разрез пакета статора и выбор системы координат

На рис. 7а) приняты следующие обозначения: G_{δ} - магнитная проводимость воздушного зазора между зубцом и магнитопроводящим элементом; $G_{\delta r}$ - магнитная проводимость левого и правого воздушного зазора магнитопроводящих элементов; $G'_{\delta r}$ - магнитная проводимость воздушного зазора между основанием магнитопроводящего элемента и ярма ЭМТВД.

Определение обобщенного выражения для G_{δ} получено по методу полной математической индукции (МПИ). В данной главе получено аналитическое выражение для значений проводимостей "n" воздушного зазора между зубцом и магнитопроводящим элементом, имеющее следующий вид:

$$G_{\delta n} = \frac{\mu_0 R_2 L}{\delta_0 \sqrt{1-g^2}} \left[\operatorname{arctg} \frac{(1+g^2) \cdot \operatorname{tg}[(n-1) \cdot d_t + d_{n1}]}{\sqrt{1-g^2}} - \operatorname{arctg} \frac{(1+g^2) \cdot \operatorname{tg}[(n-1) \cdot d_t - d_{n1}]}{\sqrt{1-g^2}} \right] \quad (5)$$

После дополнительных преобразований находим:

$$G_{\delta n} = \frac{\mu_0 R_2 L}{\delta_0 \sqrt{1-g^2}} \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{\sqrt{1-g^2} \cdot \sin 2\alpha_{n1}}{\cos 2\alpha_{n1} - g^2 \cos 2(n-1) \cdot d_t} \right] + K_1 \right\}, \quad (6)$$

где: $K_1 = 0$ при $x \cdot y + 1 = 0$
 $K_1 = \pi$ при $x \cdot y + 1 < 0$ и $\operatorname{tg} [d_t(n-1) + d_{n1}] > 0$
 $K_1 = -\pi$ при $x \cdot y + 1 < 0$ и $\operatorname{tg} [d_t(n-1) + d_{n1}] < 0$

Буквами x и y обозначены значения аргументов функции arctg соответственно уменьшаемого и вычитаемого в формуле (5)

Полученное выражение (6) справедливо как для первого, так и для каждого последующего воздушного зазора.

При определении $G_{\delta r}$ и $G'_{\delta r}$ вычисления упрощаются, так как изменяются только линейные размеры воздушного зазора между стенками паза ЭМТВД и стенками магнитопроводящих элементов.

$$G_{\delta r} = \mu_0 \cdot \frac{a \cdot b}{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot (h_1 - 2 \cdot \Delta_0 \cdot \cos 2\alpha + \delta_{\min}) \cdot b}{\delta} \quad (7)$$

$$G'_{\delta r} = \mu_0 \cdot \frac{a' \cdot b'}{\delta'} = \frac{\mu_0 \cdot a' \cdot b'}{2 \cdot \Delta_0 \cdot \cos 2\alpha - \delta_{\min}}, \quad (8)$$

где: $b' = b$ - длина статорного пакета; $\delta \cdot \text{const}$ (0,1-0,2 мм);
 a' - ширина магнитопроводящих элементов.

б) электромеханическое преобразование энергии волнового шагового электродвигателя;

При определении энергии магнитного поля использован тот

же самый подход, что и при определении энергии воздушного зазора ВЭД с вращающимся магнитным полем. Разница состоит в том, что в волновом шаговом электродвигателе МДС постоянна для данного полюса ($F = const$) и интегрирование совершается в пределах соответствующей полюсной дуги. Используется запись в цилиндрической системе координат. После преобразования определяется:

$$W_{\delta} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot F^2 \cdot L \cdot R_2}{\delta_0 \cdot \sqrt{1-g^2}} \arctg \frac{(1+g^2) \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_{n\delta}}{2}}{\sqrt{1-g^2}} - \frac{\mu_0 \cdot F^2 \cdot L \cdot \alpha_{n\delta}}{2}, \quad (9)$$

где: $\alpha_{n\delta}$ - центральный угол, который соответствует полюсной дуге.

При определении воздействия действующих электромагнитных сил на магнитопроводящие элементы, принята следующая ориентация системы координат: в зависимости от числа (четное или нечетное) фаз образующих полюс, система координат размещается так как показано на рисунках 8 и 9.

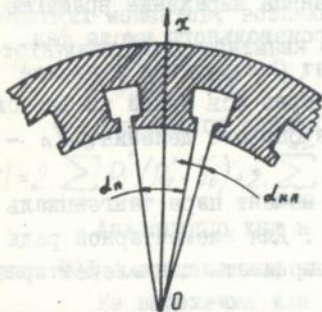


Рис.8. Ориентация системы координат при нечетном числе фаз, образующих полюс

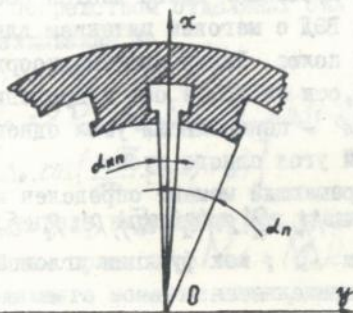


Рис.9. Ориентация системы координат при четном числе фаз, образующих полюс

Сила, действующая на элементарную площадку магнитопроводящего элемента, определяется по формуле Максвелла. Для полюса, состоящего из одной фазы, можно записать:

$$F_{e1} = 2 \cdot \int_0^L \int_0^{\alpha_n/2} \frac{\mu_0 \cdot F^2 \cdot R_2 \cdot d\ell \cdot d\alpha}{2 \cdot \delta_0^2 \cdot (1-g^2 \cos 2\alpha)^2} \quad (10)$$

$$F_{e1} = \frac{\mu_0 \cdot F^2 \cdot R_2 \cdot L}{\delta_0^2 \cdot (1-g^2)} \cdot \left\{ \frac{1}{\sqrt{1-g^2}} \cdot \arctg \left[\frac{1+g^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{1-g^2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha} + \frac{g^2 \cdot \sin 2\alpha}{1-g^2 \cdot \cos 2\alpha} \right] \right\} \Big|_0^{\alpha_n/2} \quad (11)$$

Для полюса, состоящего из трех фаз, выражение для действующих электромагнитных сил имеет вид: F_{e1} - определено по (11), а $F_{e2} = F_{e3}$, так как они расположены симметрично с двух сторон первой фазы

$$F_{e2} = F_{e3} = \int_0^L \int_{\frac{d_{\kappa\lambda}}{2}}^{2d_n + d_{\kappa\lambda}} \frac{1}{2} \cdot \frac{m_0 \cdot F^2 \cdot R_2 \cdot dl \cdot d\alpha}{\delta_0^2 \cdot (1 - \delta^2 \cdot \cos 2\alpha)^2} \quad (12)$$

Аналитическое выражение для $F_{e2} = F_{e3}$ получено из (11), при этом изменены границы интеграла.

Для двух и более фаз, образующих полюс, выражение найдено аналогично:

$$F_{e1} = F_{e2} = \frac{1}{2} \int_0^L \int_{\frac{d_{\kappa\lambda}}{2}}^{\frac{d_{\kappa\lambda}}{2} + d_n} \frac{m_0 \cdot F^2 \cdot R_2 \cdot dl \cdot d\alpha}{\delta_0^2 \cdot (1 - \delta^2 \cdot \cos 2\alpha)^2} \quad (13)$$

Значения F_{e1} и F_{e2} можно определить, изменив границы интеграла в (11).

В настоящей главе дается обобщенное выражение вращающего момента ВЭД с тяговым питанием для произвольного числа фаз, образующих полюс. Центр системы координат O находится в начале продольной оси ЭМГВД, а ось x проходит через ось одной из фаз питания; $\alpha_{\kappa\lambda}$ - центральный угол одного зубцового деления; α_n - центральный угол одного зубца.

Вращающий момент определен как момент пары тангенциальных сил $P'_n \rightarrow M_n = P'_n \cdot 2 \cdot (R_2' - \delta_n)$; $R_2' = R_2 - \delta_{min}$. Для элементарной радиальной силы P_α , как функции угловой координаты для элементарной площадки определяется:

$$P_n(\alpha) = \frac{m_0 \cdot R_2 \cdot F^2 \cdot L \cdot d\alpha}{2 \delta_0^2 \cdot [1 - \delta^2 \cdot \cos(2\alpha - \beta)]^2} ; \quad P'_n(\alpha) = \frac{P_n(\alpha)}{\operatorname{tg}(\alpha' + \rho)} \quad (14)$$

- при одной фазе питания

После математических преобразований для вращающего момента находится:

$$M = \frac{m_0 \cdot F^2 \cdot R_2 \cdot L}{\delta_0 \cdot \operatorname{tg}(\alpha' + \rho)} \cdot \left\{ \frac{R_2' \cdot \delta^2}{2 \cdot (1 - \delta^2)} \cdot \frac{(\sin B - \sin A) + \delta^2 \cdot \sin(A - B)}{(1 - \delta^2 \cdot \cos A) \cdot (1 - \delta^2 \cdot \cos B)} + \left(\frac{R_2'}{(1 - \delta^2) \cdot \sqrt{1 - \delta^2}} - \frac{\delta_0}{\sqrt{1 - \delta^2}} \right) \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{\sqrt{1 - \delta^2} \cdot \sin(B - A)/2}{\cos(A - B)/2 + \delta^2 \cdot \cos(A + B)/2} \right) \right\} ,$$

где: $A = -\alpha_n - \beta$
 $B = \alpha_n + \beta$

Интегрируя (14), можно вывести выражение для определения элементарной силы угловой координаты:

$$P_{m(\alpha)} = \frac{M_0 \cdot F^2 R_2 L}{4C_0^2 (1 - \delta^2)} \left[\delta^2 \frac{(\sin B - \sin A) + \delta^2 \sin(A - B)}{(1 - \delta^2 \cos A) (1 - \delta^2 \cos B)} + \frac{2}{\sqrt{1 - \delta^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - \delta^2} \cdot \sin(B - A)/2}{\cos(A - B)/2 + \delta^2 \cos(A + B)/2} \right] \quad (16)$$

- при числе фаз > 1 (общий случай)

$$A = \alpha_n + 2 \cdot \alpha_{kn} + 4\pi/m \cdot (i - 2) - \beta; \quad B = \alpha_n + 4\pi/m \cdot (i - 1) - \beta$$

$$\alpha_n + \alpha_{kn} = 2\pi/m,$$

где: m - число зубцов статора; i - номер фазы питания.

Общий вращающий момент определяется после суперпозиции вращающихся моментов, возникших посредством отдельных сил для соответствующих фаз, учитывая запаздывание β .

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n$$

Для общего случая: $M_n = 2 \cdot P_n' \cdot (R_2 - \delta_{2n}); \delta_{2n} = \delta_0 \left[1 - \delta^2 \cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot (i - 1) - \beta\right) \right]$

$$M = 2 \cdot \sum_{i=1}^n P_i' \cdot (R_2' - \delta_0) + 2 \cdot \sum_{i=1}^n P_i' \left[\Delta_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{m} \cdot (i - 1) - \beta\right) \right] \quad (17)$$

Аналогично как и при выводе выражения для вращающего момента ВЭД с вращающимся магнитным полем - $M_d = M \cdot K_k$

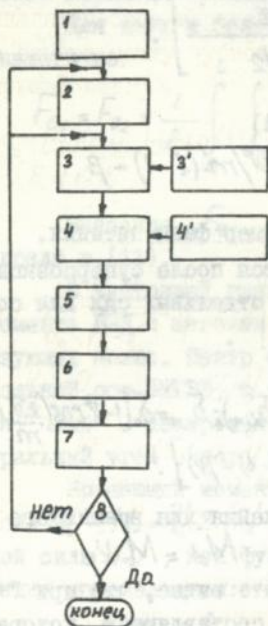
Из выражения для вращающего момента видно, что при " n " фазах питания будем иметь одну постоянную составляющую, которая не зависит от β . Все это вытекает из того, что имеется зубчатое зацепление.

При шаговом питании ВЭД, исключительно важным является определение оптимального числа одновременно питающихся фаз. В работе указаны факторы, на которые оказывает влияние число фаз питания (K). Для больших величин (K) максимальная величина момента увеличивается незначительно по сравнению с максимальной величиной вращающего момента при $K=1$. Из сделанных исследований видно, что целесообразно волновой шаговый электродвигатель изготавливать с двумя или тремя одновременно работающими фазами. Для угла шага исследуемого ВЭД находится $\alpha = 360/m \cdot i$; $\alpha = 0,1829^\circ$ при передаточном отношении $i = 82$. Из-за особенностей конструкции и электромеханического преобразования энергии значения угловых ша -

гов могут получиться малыми. В этом случае нет необходимости увеличивать число фаз и усложнять систему управления.

в) методика предварительного определения основных размеров узлов и элементов ВЭД.

Она характерна для ВЭД с неподвижным ЭМГВД и конструкции, рассмотренной во второй главе. Блок-схема алгоритма:



1 - входные данные (напряжение питания U_H , необходимый вращающий момент, скорость выходного вала)

2 - вычисление параметров гибкого и жесткого зубчатого колеса (этот пункт применяется, когда необходимо проектировать ВЭД, не используя стандартные узлы)

3, 4 - выбор стандартных статора и волновой передачи

3, 4 - волновые передачи и статоры асинхронных двигателей, выпускаемых болгарскими и украинскими ведущими предприятиями

5 - определение основных размеров ЭМГВД

6 - поверочный расчет магнитной цепи

7 - определение электромагнитных сил, вращающего момента, деформаций, показателей работоспособности ВЭД

8 - проверка параметров, обеспечивающих нормальную работоспособность.

Предложенный алгоритм замкнутый и позволяет провести оптимизационные процедуры по заданной целевой функции.

Четвертая глава описывает экспериментальные исследования разработанной модели ВЭД, которые рассмотрены во второй главе.

Цель сделанных исследований - установить: выполнение основных кинематических зависимостей и законов, необходимых для нормальной работы ВЭД; характерные особенности работы на холостом ходу и под нагрузкой; выводы, необходимые для практики и дальнейших исследований. Исследования деформаций ЭМГВД, выполнены с использованием

бесконтактных индуктивных датчиков, при этом результаты отображались на светолучевом осциллографе. При использовании стандартного статора трехфазного асинхронного двигателя выполняется необходимый закон деформации ЭМГВД. Подтверждаются и аналитические выражения, которые выведены в третьей главе. При работе на холостом ходу и под нагрузкой наблюдаются важные положительные результаты, которые основываются на особенностях конструкции (неподвижный ЭМГВД). Это следующие результаты:

- график функции $P_0' = f(U)$ - при работе на холостом ходу, состоит из двух прямолинейных участков, соответствующих состояниям - ВЭД, запитанного от сети при неподвижном валу и ВЭД, запитанного от сети и вращающемся валу. В первом случае после продолжения прямолинейных участков можно определить соответствующее питающее напряжение, при котором магнитопроводящие элементы начинают совершать очень малое радиальное перемещение, а во втором случае разделить потери на потери в стали и механические;

- при работе под нагрузкой, графики $P = f(M)$, $I = f(M)$ представляют собой прямые линии, проходящие параллельно к оси абсцисс до значения момента, при котором $M < M_{дн}$ (допустимый момент на грузки), а после этого - P и I уменьшаются до величин, характерных для холостого хода. Это объясняется тем фактором, что ЭМГВД неподвижен, но продолжает деформироваться под действием электромагнитных сил, и следовательно, при увеличении массы подвешенного к якорю груза ток I не изменяется до момента отрыва якоря. Наличие дифференциальной волновой передачи дает возможность получить тормозной момент $M_{т} \approx M_{дн}$ при выключении питания двигателя, что не характерно ни для одного из типов электродвигателей;

- получены осциллограммы переходного тока при различных питающих напряжениях, из которых видно, что время затухания переходного процесса $\tau = 0,02$ с и отношение максимального значения пускового тока к установившемуся току приблизительно равно 2. Эти результаты доказывают, что разработанный ВЭД обладает легким режимом пуска и высоким быстродействием.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

а) решены следующие теоретические проблемы:

- сделан подробный обзор и классификация существующих единичных конструкций ВЭД, их преимущества и недостатки;
- пользуясь классическим подходом, методами возможных

перемещений, методами полной математической индукции получены аналитические выражения энергии, действующих сил и моментов, как для ВЭД с вращающимся магнитным полем, так и для шагового электродвигателя;

- получены выражения для магнитных проводимостей, участвующих в эквивалентной схеме замещения для произвольного ВЭД;

- выведены аналитические выражения связи действующих электромагнитных сил и вызванных ими радиальными деформациями, а, следовательно, получено условие нормальной работы ВЭД;

- исследованы влияние числа фаз питания на вращающий момент и возможные схемы питания, которые приводят к генерированию необходимой по форме волны деформации;

- предложена методика предварительного определения основных размеров отдельных узлов и деталей при изготовлении единичных образцов ВЭД, при этом используются стандартные статор и зубчатые колеса волновой передачи.

б) выводы, основанные на полученных результатах экспериментов разработанного ВЭД:

- точное позиционирование рабочего органа при отсутствии самохода, зависящее только от числа и модуля зубцов используемых зубчатых колес передачи (точность для разработанного ВЭД равна $0^{\circ} 68'$);

- при применении дифференциальной волновой передачи (состоящей из двух жестких зубчатых колес, насаженных на гибкое колесо, при котором одно из них неподвижно) наличие зубчатого зацепления гарантирует большой тормозной момент M_p , приблизительно равный по величине предельному вращающему моменту, даже при отсутствии питания двигателя;

- мощность и ток не зависят от нагрузки, а при достижении максимального момента и перегрузки ВЭД P и I уменьшаются до значений холостого хода, что предохраняет электродвигатель от аварий;

- неподвижный ЭМГВД не требует применения подшипников и вращающихся частей за исключением жесткого зубчатого колеса. (То есть инерционный момент практически отсутствует);

- синхронная частота вращения и возможность редукции скорости с передаточными отношениями свыше $i > 76$;

- возможность использования стандартных, выпускаемых и освоенных узлов при его изготовлении;

- значения к.п.д. и $\cos \varphi$ для разработанного ВЭД соизмери-

мы с этими показателями для всех существующих конструкций тихоходных электродвигателей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Йорданов П.В., Ганчев Е.Х., Петров П.К. - "Електроме - ханично преобразуване на енергията при вълнов електродвигател" - юбилейна научна сесия 40 години катедра "Електротехника и авиаци - онно оборудване" - г.Д.Митрополия, 1989 год.

2. Петров П.К. - "Аналитично определяне на изразите за магнитните проводимости на въздушните междини при вълнов електро - двигател" - научна конференция ВМЕИ - г.Габрово, 23-25 октомври 1991 г.

3. Петров П.К., Иванов Кр.М. - "Определяне разсейваната енергия във въздушната междина на вълнов електродвигател" - научна конференция ВМЕИ - г.Габрово 23-25 октомври 1991 год.

4. Петров П.К., Йорданов П.В. - "Определяне въртящия мо - мент при вълнов електродвигател с въртящо магнитно поле" - научна конференция ВМЕИ г.Габрово 25-27 ноември 1992 год.

5. Петров П.К., Йорданов П.В. - "Определяне въртящия мо - мент при вълнов стъпков електродвигател с отчитане броя на захра - нените фази" - научна конференция ВМЕИ г.Габрово 25 -27 ноември 1992 год.

6. Йорданов П.В., Петров П.К. - "Аналитично определяне на енергията и електромагнитните сили при стъпков вълнов електродви - гател" - научна конференция ВМЕИ 25-27 ноември 1992 год.

7. Владимиров П.В., Петров П.К. - "Изследване влиянието на броя на запазените фази върху въртящия момент на стъпков вълнов електродвигател" - научна конференция ВМЕИ г.Габрово 25-27 ноември 1992 год.

8. Йорданов П.В., Петров П.К., Иванов Кр.М. - "Възможни схеми на запазване за реализиране на електромагнитен генератор на вълнова деформация" - научна конференция ВМЕИ г.Габрово - 25-27 ноември 1992 год.



159603

AB 29.040