

На правах рукописи

**КАТАЕВ Анатолий Федорович**

**ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ  
С ИНТЕГРИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы,  
включая их управление и регулирование

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Саратов 2000

Работа выполнена в Саратовском государственном техническом университете

Научный руководитель. доктор технических наук профессор  
Угаров Г.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук профессор  
Ерошенко Г.П.

кандидат технических наук доцент  
Фомичев В.Ф.

Ведущая организация: ОАО «КБ Электроприбор», г. Саратов

Защита состоится 5 декабря 2000 г. в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета К 063 58.08 в Саратовском государственном техническом университете по адресу: 410054, г.Саратов, ул. Политехническая, 77.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Саратовского государственного технического университета.

Автореферат разослан «3» ноября 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.А.Казинский

A2000  
12703

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

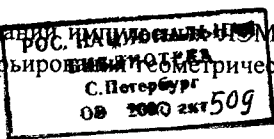
**Актуальность темы.** Среди актуальных задач экономики России важное место отводится комплексной механизации и автоматизации технологических процессов, повышению качества, надёжности, экономичности, производительности машин и оборудования. При этом особое значение предьявляется к энергосберегающим режимам работы электрооборудования. В частности, для решения этих проблем в ряде отраслей промышленности используются импульсные линейные электромагнитные двигатели (ЛЭМД) с комбинированным якорем и двумя рабочими зазорами. В силу конструктивной простоты, надёжности, экономичности они более пригодны по сравнению с другими линейными электродвигателями для ударно-прессового оборудования, а также для реализации других подобных импульсных технологий. Используемые двигатели обладают высокими технико-экономическими показателями, но их тяговые характеристики имеют, как правило, гиперболический вид с малыми силами тяги при относительно больших рабочих зазорах. Двигатели с такой характеристикой имеют ограниченную область применения, поэтому для ЛЭМД необходимы магнитные системы с другими формами тяговых характеристик, обладающих повышенными начальными силами тяг. Получить желаемый вид тяговой характеристики с повышенным значением начальной силы можно конструктивными способами путем объединения нескольких различных по виду электромагнитных или других преобразователей, действующих одновременно или поочередно в пределах определенной части рабочего хода. На изменение формы и величины тяговой силы в электромеханических преобразователях электромагнитного типа влияют геометрические параметры – площадь  $S$  и величина рабочего зазора  $\delta$ .

Импульсные ЛЭМД с такими принципами действия будем называть двигателями с интегрированной структурой. Использование рассмотренных принципов интеграции структуры двигателя позволяет получать повышенные начальные силы тяги, а также формировать необходимую для технологического процесса тяговую характеристику. Степень влияния параметров  $S$  и  $\delta$  и управление ими определяют форму тяговой характеристики двигателя. Поэтому исследование таких двигателей с указанными принципами формирования сил тяги в рабочем диапазоне хода якоря является актуальным.

Актуальность выполненных исследований подтверждается также спросом предприятий многих отраслей промышленности на оборудование импульсных технологий, реализуемых с помощью ЛЭМД.

Исследования, проведенные в диссертации, являются частью комплексных работ по созданию импульсного линейного электромагнитного привода, проводимых в СГТУ по направлениям 04В.03.Н2 и 17В.02, а также по энергосберегающей программе.

Цель работы состоит в исследовании и создании импульсных ЛЭМД с интегрированной структурой, в которых за счёт варьирования геометрических



параметров отдельных конструктивных элементов магнитной системы можно формировать тяговую характеристику в рабочем диапазоне перемещений якоря.

В связи с этим поставлены следующие задачи исследований:

1. Разработать конструкцию ЛЭМД с повышенным начальным усилием и заданной формой тяговой характеристики.
2. Разработать математическую и физическую модели магнитной цепи перспективных ЛЭМД с интегрированной структурой, позволяющие получать повышенные начальные (пусковые) силы с возможностью формирования тяговой характеристики в рабочем диапазоне перемещений якоря.
3. Исследовать влияния геометрических параметров основных элементов магнитной цепи на формирование тяговой характеристики в диапазоне рабочего хода якоря.
4. Разработать и внедрить импульсный ЛЭМД с интегрированной структурой в промышленность.

**Методы исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования базировались на использовании физического и математического моделирования с использованием ЭВМ. Теоретические исследования выполнены с применением аналитических и численных методов математического анализа, теории цепей и электрических машин. В экспериментальных исследованиях использованы методы регрессионного анализа с привлечением математической теории планирования эксперимента.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- введение в магнитные системы импульсных ЛЭМД цилиндрической структуры подвижных дисков в комбинированном якоре с укороченным воздушным зазором под диском до  $0,1 \dots 0,3$  рабочего хода цилиндрической части якоря повышает начальную (пусковую) силу тяги до 6 крат по сравнению с неподвижным диском;
- использование в магнитных системах ЛЭМД цилиндрической структуры с комбинированным якоре́м двух рабочих зазоров – с продольным и поперечным магнитным полем соответственно позволяет повысить начальную силу тяги в  $10 \dots 14$  раз, при этом торец цилиндрической части якоря должен быть смещен с основанием обмотки;
- смещение амплитуды поперечной (фланцевой) составляющей силы и величина оптимального рабочего хода якоря пропорциональны толщине фланца (полуса);
- уменьшение толщины фланца увеличивает амплитуду фланцевой силы;
- увеличение тока в обмотке двигателя значительно повышает фланцевую силу и слабо влияет на изменение дисковой (продольной составляющей силы);
- изменение угла наклона образующей усеченного конуса якоря от  $0$  до  $10^\circ$  на длине, равной радиусу якоря, позволяет получить постоянство усилия на большей части рабочего хода.

**Достоверность** научных положений, приведенных в диссертации, подтверждается:

- удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований разработанных линейных электромагнитных двигателей;
- опытом промышленной эксплуатации оборудования с приводом от импульсных электромагнитных двигателей.

**Научная новизна:**

- обоснованы принципы и пути повышения начальной силы тяги, а также формирования статических тяговых характеристик за счёт конструкции магнитной системы импульсного ЛЭМД;
- установлена степень влияния геометрических параметров основных элементов магнитной цепи ЛЭМД типов  $S\omega\delta$  и  $S\delta$  на форму тяговой характеристики и её максимальную пусковую силу;
- установлена связь максимальной фланцевой силы тяги ЛЭМД типов  $S\omega\delta$  и  $S\delta$  с оптимальной величиной рабочего хода якоря;
- разработана программа расчёта динамических характеристик ЛЭМД типа  $S\delta$  по интервалам времени с применением ЭВМ, позволившая при исследовании отказаться от графических построений и повысить точность расчёта до 1%;
- выявлено влияние изменения толщины дисковой части комбинированного якоря на динамические характеристики ЛЭМД типа  $S\delta$ .

**Личный вклад** автора заключается в формулировке цели работы, постановке задач, решении всех вопросов от идеи до разработки и изготовления образцов ЛЭМД с интегрированной структурой, участии во всех экспериментальных исследованиях, производственных испытаниях и внедрении.

**Практическая ценность:**

- ЛЭМД с интегрированной структурой расширяет функциональные возможности в области применения за счёт повышенных начальных сил тяги, а также формирования требуемой тяговой характеристики;
- разработаны программы и методики расчёта статических и динамических характеристик ЛЭМД с интегрированной структурой.

**Реализация и внедрение результатов исследований**

Разработанные опытные образцы ЛЭМД с интегрированной структурой внедрены на предприятиях г. Саратова и области: «Проммаш», «Нефтемаш», «Автономных источников тока», «Серп и молот», «Балаковорезинотехника» (г. Балаково), «Эридан» (г. Аткарск). Материалы исследований использованы в госбюджетных работах по проблемам 04В.03.Н2 (1991-1996г.г.) и 17В.02 (1996-2001г.г.).

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и науч-

ных сокурсников Саратовского государственного технического университета 1983-2000гг и на одиннадцатой научно-технической международной конференции по электроприводам переменного тока (г. Екатеринбург, 1998).

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 14 работ, из них 6 авторских свидетельств на изобретения.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основной материал изложен на 165 страницах, иллюстрируется 33 рисунками и 7 таблицами, содержит список использованной литературы из 138 наименований и приложения, изложенные на 39 страницах

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана оценка актуальности работы, сформулирована цель, даны понятия о ЛЭМД с интегрированной структурой.

**Первая глава** посвящена обзору исследований конструкций импульсных ЛЭМД с комбинированным формированием тяговых сил. Анализ проведенных исследований показал, что необходимо учитывать требования, обусловленные спецификой области их использования. Такими требованиями в приводе технического оборудования являются: высокая надежность, стойкость якоря к вибрационным и ударным нагрузкам, простота и технологичность конструкции, простота регулирования силы и частоты ходов. К указанным требованиям можно добавить получение повышенных пусковых сил тяги, а также желаемого вида тяговой характеристики, что придает импульсным ЛЭМД большую универсальность.

На основе проведенного научно-технического обзора поставлены цели и задачи исследований.

**Во второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований ЛЭМД с различной степенью интеграции. Цель проведения исследований - повышение технического уровня машин за счёт увеличения начальных (пусковых) тяговых сил и формирование тяговой характеристики по ходу движения якоря. Одним из перспективных путей решения этой задачи является поиск и создание интегрированных конструкций импульсных ЛЭМД. В связи с этим предложены новые конструкции ЛЭМД с различной степенью интеграции. С целью сравнения между собой наиболее перспективных двигателей была разработана обобщённая (многовариантная) физическая модель магнитной системы ЛЭМД, которая позволила на одной базовой модели сравнить пять разновидностей магнитных систем ЛЭМД (рис. 1). Проведён анализ полученных тяговых характеристик, найдены интегральная и условная работы, объём и масса магнитной системы ЛЭМД, а также их удельные показатели силы тяги. В связи с тем, что характеристики силы и работы в рабочем диапазоне быстро изменяются, было принято решение сравнить их по

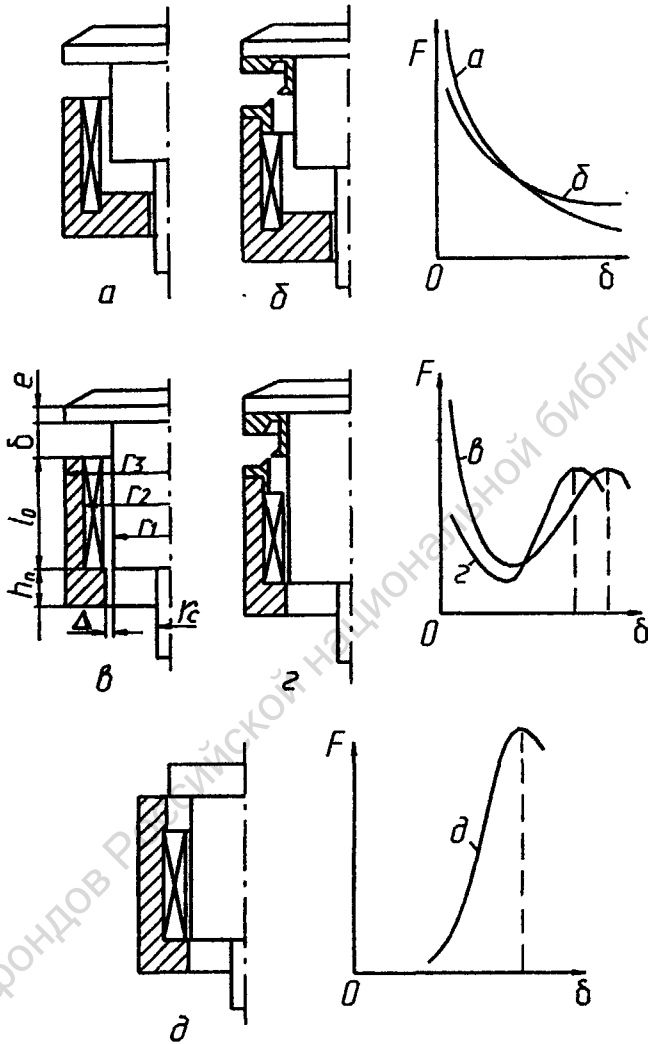


Рис. 1. Магнитные системы ЛЭМД и их тяговые характеристики  
 а – базовая модель; б-д – исследуемые модели

тремя точкам – в начале, середине и в конце хода. Сравнение технико-экономических показателей производилось по комплексному показателю

$$P = \sum_{i=1}^n K_i M_i; \quad K_i = \frac{P_i}{P_{\delta}}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – оценка  $i$ -го показателя свойства модели, о.е.;  $P_i$  и  $P_{\delta}$  – показатели свойств рассматриваемой и базовой моделей в физических единицах;  $M_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го показателя свойства, определяемой экспертным путем так, чтобы  $\sum_{i=1}^n M_i = 1$ .

На основании сравнений моделей магнитных систем по комплексному показателю приоритет отдан модели типа  $S\delta$  (рис. 1, в). Выбор указанной модели теоретически и практически обоснован, при этом начальная сила тяги ЛЭМД типа  $S\delta$  (рис. 1, в) превышает начальную силу базовой модели (рис. 1, а) в 10...14 раз.

В третьей главе изложены теоретические и экспериментальные исследования статических режимов работы импульсного ЛЭМД типа  $Sw\delta$ , согласно которым разработаны программы её расчёта на ЭВМ. Составлены три программы, которые учитывают число членов суммы разложенных функций потока и магнитного напряжения в ряд Маклорена. Для ЛЭМД типа  $Sw\delta$  (рисунок 1, в) с данными в абсолютных единицах  $r_{1a}=20,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $r_{2a}=31,8 \cdot 10^{-3}$  м;  $r_{3a}=38 \cdot 10^{-3}$  м;  $l_{0a}=60 \cdot 10^{-3}$  м;  $l_{1a}=80 \cdot 10^{-3}$  м;  $h_{1a}=r_{1a}$ ;  $r_{ca}=6,2 \cdot 10^{-3}$  м;  $e_a=6,2 \cdot 10^{-3}$  м;  $\Delta_a=0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $W=410$  витков проведены расчёты, по результатам которых построены характеристики статического режима. Анализ полученных результатов показал: при оставленных первых двух членах суммы ряда ошибка составляет 15% от эталона (четыре члена), при трёх членах – не более 7%. При четырёх членах расчётные выражения значительно усложняются. Таким образом, для приближенных расчётов сумму ряда можно ограничить двумя членами, для более точных достаточно трёх.

Используя метод вероятностных путей магнитного потока (метод Ротерса), были получены формулы проводимостей для ЛЭМД типа  $Sw\delta$ , который имеет два различных по конфигурации рабочих зазора – первый со стороны фланца, второй – под диском якоря. При этом большой интерес представляют ситуации: приближение и внедрение конусно-усечённого якоря во фланец при  $m < h_n$ , где  $m$  – длина конуса, а  $h_n$  – толщина фланца.

С целью расширения возможностей расчёта при разных соотношениях между паразитным зазором  $\Delta$  и радиусом якоря  $r_1$  были аппроксимированы графические зависимости проф. Б.К. Буля для удельных проводимостей  $g_{x1}$  и  $g_{x2}$ , необходимых для расчёта проводимостей при внедрении конуса во фланец. В результате получены выражения (при  $x/\Delta \geq 4$ ):



$$g_{x1} = 0,98 - 0,003(90^\circ - \alpha) + [0,275 - 0,0017(90^\circ - \alpha)] \cdot \left( \frac{r_1 - r_2 - \Delta}{\Delta} + \frac{1}{\sin \varphi_2} - \operatorname{tg} \varphi_2 \right), \quad (2)$$

$$g_{x2} \approx 0,72 + 1,125 \left[ 1 + \left( 1 - \frac{m \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\Delta} + \operatorname{tg} \alpha \right) \right], \quad (3)$$

где  $r_1$  и  $r_2$ , - радиусы якоря и внутренней стенки яра статора, о.е.;  $\Delta$  - паразитный зазор, о.е.;  $\alpha$  - угол наклона образующей конуса;  $\varphi_2 = 90^\circ - \alpha$  - угол между образующей конуса и основанием обмотки.

Анализ результатов расчёта проводимостей при  $m < h_n$  показал, что аналитические выражения (2) и (3) верны при наклоне образующей конуса с углом  $\alpha = 3 \dots 45^\circ$ .

На базе разработанных программ расчета статических характеристик выявлено влияние геометрических параметров основных элементов магнитной цепи ЛЭМД типа  $S_w \delta$  на формирование статической тяговой характеристики. Из анализа полученной информации установлено, что наибольшее влияние на формирование тяговой характеристики оказывает толщина фланца  $h_n$  статора (рис. 2, а). Причем амплитуду силы можно перемещать в рабочем диапазоне

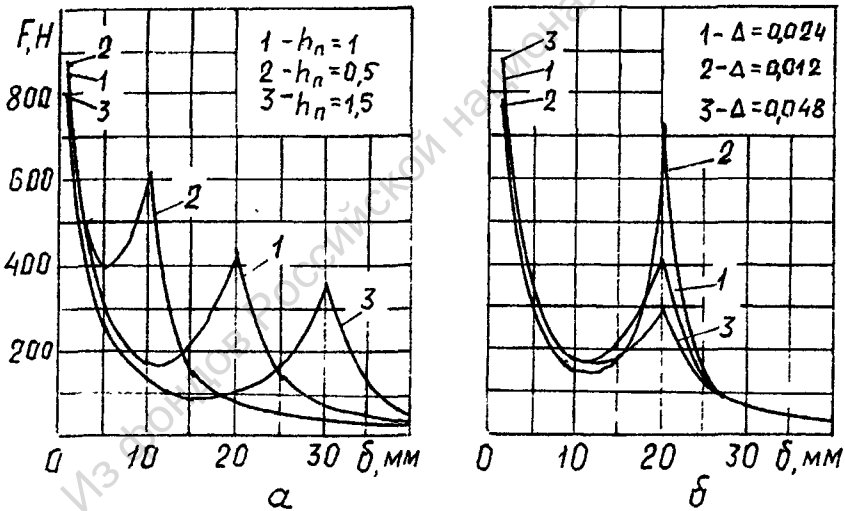


Рис. 2. Зависимости влияния геометрических параметров на форму тяговой характеристики ЛЭМД типа  $S_w \delta$  ( $S \delta$ )  
а - толщина фланца; б - длины паразитного зазора

хода якоря путём выбора толщины фланца статора. При этом амплитуда фланцевой силы обратно пропорциональна толщине фланца. Амплитуда силы тяги

при этом определяет оптимальную величину рабочего хода якоря. Таким образом, с изменением амплитуды фланцевой силы будет изменяться и величина оптимального хода, смещаясь в сторону амплитуды.

Геометрические параметры остальных элементов магнитной цепи не оказывают существенного значения на формирование тяговой характеристики и величины начальных – фланцевых и дисковых сил. Наибольшее влияние на изменение начальной силы оказывает паразитный зазор, расположенный между цилиндром якоря и поверхностью расточки фланца (рисунок 2, б). При уменьшении последнего в два раза относительно расчётного амплитуда фланцевой силы возросла на 66,5%, а при увеличении последнего в два раза – уменьшилась на 31,7%. При этом дисковая сила изменялась незначительно (в первом случае уменьшилась на 2,6%, во втором – увеличилась на 4,0%).

С целью проверки влияния изменения сечения ярма статора и толщины диска якоря на начальную силу тяги был проведен активный эксперимент, где в качестве независимых параметров (факторов) были выбраны  $x_1$  - сечение ярма статора ( $S_n$ ) и  $x_2$  - толщина диска якоря ( $e$ ). При этом остальные элементы магнитопровода оптимизированы натурным экспериментом на опытном образце и заданы постоянными величинами:  $h_n=1$  – толщина фланца статора, о.е. (условие перехода от модели ЛЭМД типа  $Sw\delta$  к  $S\delta$ );  $\Delta=0,024$  - длина паразитного, зазора о.е.;  $\delta_n=1$  - начальная величина рабочего хода якоря, о.е.;  $I=10A$  - рабочий ток двигателя

На основании обработки экспериментальных данных согласно матрице многофакторного эксперимента центрально-композиционного ортогонального планирования получено уравнение

$$\hat{y} = 544,2 + 25,3\tilde{x}_2 - 25,5\tilde{x}_1\tilde{x}_2, \quad (4)$$

адекватность которого эксперименту проверена по критерию Фишера с 95% доверительной вероятностью. Путем замены кодированных факторов на физические получено уравнение

$$\hat{F} = 426,18 + 25,5S_n + 393,4e - 85S_n e, \quad (5)$$

позволяющее определить как значимость, так и направление влияния каждого параметра на процесс влияния начальной силы тяги двигателя.

Анализ полученных результатов показал не критичность влияния геометрических размеров исследуемых элементов магнитопровода ЛЭМД на величину начальной силы тяги, что подтверждается результатами исследований магнитной цепи ЛЭМД типа  $S\delta$ .

С целью подтверждения результатов расчёта был проведён эксперимент. Объектом исследования был образец импульсного ЛЭМД типа  $S\delta$  (рис. 1, в). Образец изготовлен из массивной конструкционной стали марки Ст.3 с практически одинаковым сечением участков магнитной цепи для основного магнитного потока, где данные представлены в о.е.:  $r_1=1$ ;  $r_2=1,55$ ;  $r_3=1,88$ ;  $r_4=0,244$ ;

$l_0=2,93$ ;  $\Delta=0,024$ ;  $\delta_{max}=1,95$ ;  $h_n=1$ ;  $e=0,37$ . Внутри магнитопровода статора размещена обмотка возбуждения, выполненная из провода марки ПЭВ-2 диаметром 1,0 мм с количеством витков 410. В устройстве якоря была предусмотрена замена цилиндрической насадки на конусно - усеченную с углами образующей  $\alpha=5$  и  $10^\circ$ . Экспериментальный образец двигателя исследовался в статическом режиме при питании обмотки возбуждения постоянным током при значениях 5 и 10 А.

Проведённые экспериментальные исследования ЛЭМД типа  $S\delta$  с цилиндрическим якорем (рис. 3, а) показали удовлетворительное совпадение расчёт-

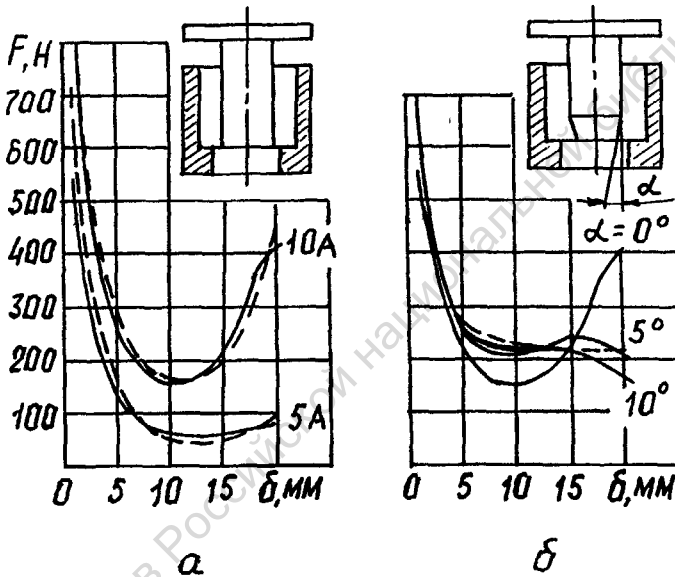


Рис. 3. Статические тяговые характеристики ЛЭМД типа  $S\delta$  с якорем:  
а – цилиндрическим; б – конусным;  
————— - опыт; - - - - - расчет

ных и экспериментальных данных (относительная погрешность в максимально отклонённых точках рабочего диапазона не превышает 17%).

Основные расхождения объясняются неучетом в расчётах гистерезиса, а в эксперименте - падения магнитного напряжения на стыках магнитопровода. При замене концевой цилиндрической насадки на коническую был получен комбинированный якорь с конусно-усеченной частью. В эксперименте использованы три сменные насадки с углами конуса  $\alpha=0,5$  и  $10^\circ$ . Результаты экспе-

римента (рис. 3,б) показали, что увеличение угла конуса от 0 до 10° значительно изменяет форму тяговой характеристики. При этом с увеличением угла начальная сила тяги падает, а сама тяговая характеристика на большей части рабочего хода приближается к постоянному значению. С увеличением угла обрабатываемой конуса происходит деформация тяговой характеристики за счет падения фланцевой и роста дисковой силы.

В четвертой главе исследуется динамика рабочего хода ЛЭМД типа  $S\delta$ , где его массивный магнитопровод с вихревыми токами заменен, согласно подходу В.Н. Гурницкого, эквивалентным трансформатором в режиме короткого замыкания. С целью снижения потерь на вихревые токи и улучшения динамических характеристик двигателя его сердечник якоря выполнен с радиальным разрезом, эквивалентным шихтовке до направляющего стержня. При этом были получены расчетные выражения

$$\Delta t_1 = \frac{\left[ 1 - 0,445 \cdot \left( \frac{r_n}{r_1} \right)^2 \right] \cdot \Delta \psi + K^2 L_{ax,n} \Delta i}{U - i \cdot (R_o + K^2 R_{ax})}; \quad (6)$$

$$F = \frac{i \cdot \left[ 1 - 0,445 \cdot \left( \frac{r_n}{r_1} \right)^2 \right] \cdot \Delta \psi}{2 \Delta x}, \quad (7)$$

где  $\Delta t_1$  - приращение времени,  $U$  - напряжение на обмотке,  $i$ ,  $\Delta i$ ,  $R_o$  - ток, его приращение и омическое сопротивление обмотки,  $K$  - коэффициент трансформации электромагнита,  $\Delta \psi$  - приращение потокосцепления обмотки при отсутствии вихревых токов,  $F$  - мгновенное значение электромагнитной силы,  $R_{ax}$  - омическое сопротивление магнитопровода,  $r_n$  - радиус той части якоря, в которой отсутствует разрез,  $r_1$  - радиус якоря ЛЭМД,  $L_{ax,n} = L_{ax}(r_n/r_1)$  здесь  $L_{ax}$  - индуктивность соленоидов сосредоточенных вихревых токов,  $\Delta x$  - приращение пути якоря.

Для расчета динамических характеристик рабочего хода двигателя использована универсальная математическая система (MathCAD 7.0 PRO). Рассчитаны три случая динамических характеристик ЛЭМД: без учета вихревых токов, с учетом вихревых токов и с радиальным разрезом сердечника якоря. Расчеты проведены для ЛЭМД типа  $S\delta$  с данными, представленными в о.е.:  $r_1=1$ ;  $r_2=1,55$ ;  $r_3=1,88$ ;  $r_c=0,224$ ;  $l_0=2,93$ ;  $\Delta=0,024$ ;  $\delta_{max}=1$ ;  $h_n=1$ ;  $e=0,37$  при этом обмотка содержала  $W=820$  витков с омическим сопротивлением  $R_o=11,2$  Ом и массой подвижной части  $m=1,1$  кг;  $U=100$  В. Магнитопровод выполнен из массивной конструкционной стали марки Ст.3. Результаты расчета для рассмотренных трех случаев представлены на рис. 4.

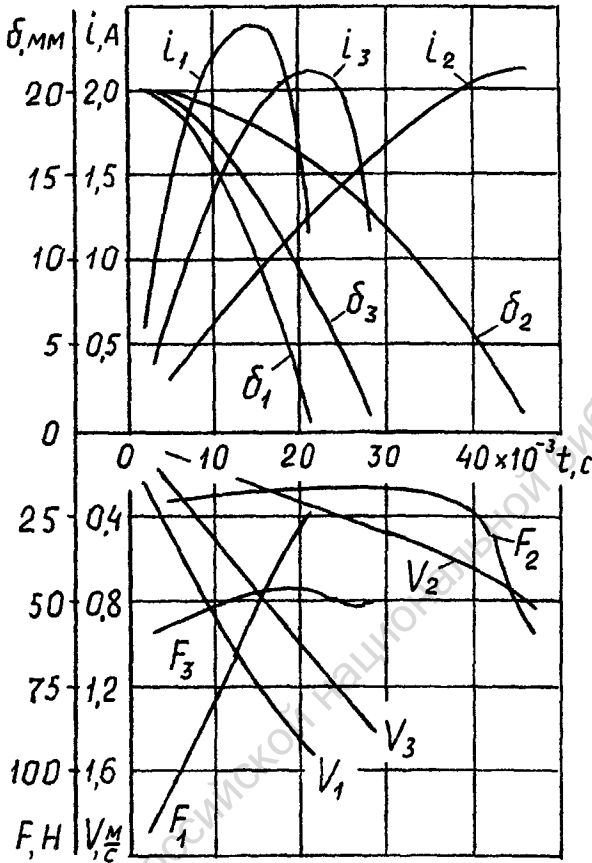


Рис. 4. Динамические характеристики ЛЭМД типа  $S\delta$ :

1 – без учета вихревых токов; 2 – с учетом вихревых токов;

3 – с разрезом якоря по п. 2

Сравнительный анализ полученных характеристик ЛЭМД типа  $S\delta$  с цилиндрическим и конусным якорями (рис. 5) показал, что двигатель с цилиндрическим якорем имеет незначительно улучшенные характеристики по сравнению с конусным. В связи с увеличенным воздушным зазором под краем конуса якоря, возрастает ток обмотки, что и вызывает в конце хода небольшое увеличение силы тяги. В остальном характеристики практически совпадают.

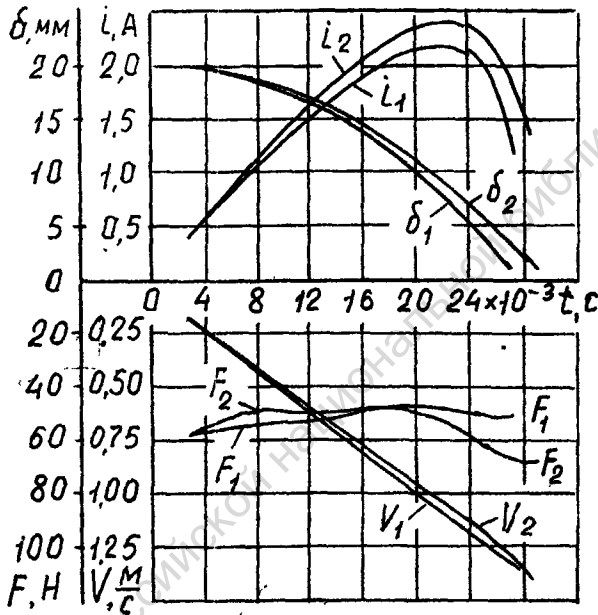


Рис. 5. Динамические характеристики ЛЭМД типа  $S\delta$ :

- 1 – с цилиндрическим якорем;  
2 – с конусным якорем ( $\alpha=5^\circ$ )

Поэтому при разработке двигателя предпочтение можно отдать двигателю с цилиндрическим якорем. Это упростит конструкцию якоря и разгрузит обмотку в тепловом отношении за счет уменьшения в ней тока.

Исследовано влияние количества витков (410; 820 и 1000) в обмотке при полном заполнении обмоточного пространства на динамические (при напряжении 220 В) и временные характеристики (при напряжении 100 В) двигателя. За базовый двигатель был принят ЛЭМД типа  $S\delta$  с данными, представленными выше.

Анализ полученных характеристик показал, что при уменьшенном количестве витков растут быстрее: ток, сила тяги и скорость движения якоря и уменьшаются временные характеристики трогания и движения.

На рис. 6 показаны временные характеристики – трогания (кривая 1) и движения (кривая 2). Из кривой 1 видно, что время трогания мало зависит от витков. Это объясняется тем, что в момент трогания ток в обмотке еще мал, а воздушный зазор велик, магнитная цепь ненасыщена, поэтому индуктивность двигателя практически остается неизменной. Время движения якоря (кривая 2) растет относительно быстро. Быстрое нарастание времени движения якоря объясняется увеличением индуктивности как интегрального параметра магнитной системы ЛЭМД типа  $S\delta$ , который зависит не только от квадрата числа витков обмотки, но и от конструкции магнитной цепи, величины рабочего зазора и свойств магнитных материалов.

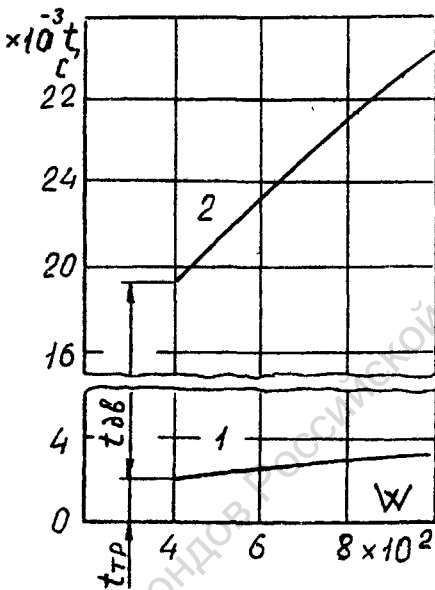


Рис. 6. Влияние количества витков обмотки ЛЭМД типа  $S\delta$  на временные характеристики: 1 – время трогания; 2 – время движения

Двигатели с меньшим количеством витков обладают большим быстродействием и улучшенными динамическими характеристиками. Повышение тока при этом обуславливает необходимость проверки обмотки на допустимый нагрев.

Нагрев обмотки при импульсном питании рассчитывается методом, который учитывает начальную температуру обмотки, длительность импульсов постоянного тока сопоставима с длительностью паузы, а коэффициент теплоотдачи обмотки зависит от температуры ее нагрева.

В процессе рассмотрения переходного процесса нагрева обмотки при по-

даче в нее серии униполярных импульсов получено выражение для температуры нагрева обмотки для  $n$ -го цикла через параметры предыдущего цикла. В результате определяются максимальная температура нагрева обмотки при продолжительной работе ЛЭМД в импульсном режиме и максимальное число ходов якоря, исключая перегрев обмотки выше допустимого значения.

Для сравнительной оценки полученных результатов был проведен эксперимент по нагреву обмотки в двух режимах: I – нагрев током 2,5 А при ПВ=80% и II- нагрев током 4 А при ПВ=80%. Время цикла – 10 с, время импульса – 8 с.

Параметры обмотки: длина –  $64,75 \cdot 10^{-3}$  м; наружный диаметр –  $67,75 \cdot 10^{-3}$  м; внутренний диаметр –  $48,5 \cdot 10^{-3}$  м; провод медный; омическое сопротивление обмотки при температуре окружающей среды 20 °С – 2,4225 Ом; масса обмотки – 0,72 кг. Результаты эксперимента и расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1

## Характеристика нагрева обмотки ЛЭМД

Режим		I						II				
Время, мин		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Температура нагрева	опыт	19,8	29,5	35,5	40,2	43,2	45,0	71,4	90,4	102,9	111,8	117,6
	расчет	19,8	30,6	38,4	43,9	48,0	50,8	75,4	93,1	105,8	115,0	121,6

Превышение результатов расчета над опытными данными обусловлено отсутствием в расчете учета теплоотдачи обмотки за счет теплопроводности воздуха.

Проведено также исследование на ЭВМ влияния толщины диска якоря на динамические и временные характеристики ЛЭМД типа  $\mathcal{S}\delta$  по разработанной программе с вышеуказанными конструктивными параметрами с количеством витков 820 и сопротивлением обмотки 11,2 Ом. На обмотку подавалось напряжение, равное 100 В. Варьирование толщины диска производилось относительно расчетной ( $e = 0,3$  о.е.) в диапазоне 0,1...0,5 о.е. с учетом изменения массы якорей. Анализ параметров движения осуществлялся по трем точкам рассчитанных динамических характеристик – начальной, средней и конечной (рис. 7).

На основе анализа рассчитанных динамических характеристик можно рекомендовать уменьшение на 30% расчетной толщины диска комбинированного якоря ЛЭМД типа  $\mathcal{S}\delta$ , полученной при равенстве сечений ярма статора и якоря. При этом увеличивается быстродействие двигателя с небольшой разгрузкой по току и с некоторым снижением силы тяги в начальной и средней частях характеристики. В конце рабочего хода сила тяги повышается.

В пятой главе рассмотрены методики расчета параметров конструкции импульсного ЛЭМД с интегрируемой структурой. Определены размеры якоря двигателя при заданной силе тяги и минимальных объемах активных материа-



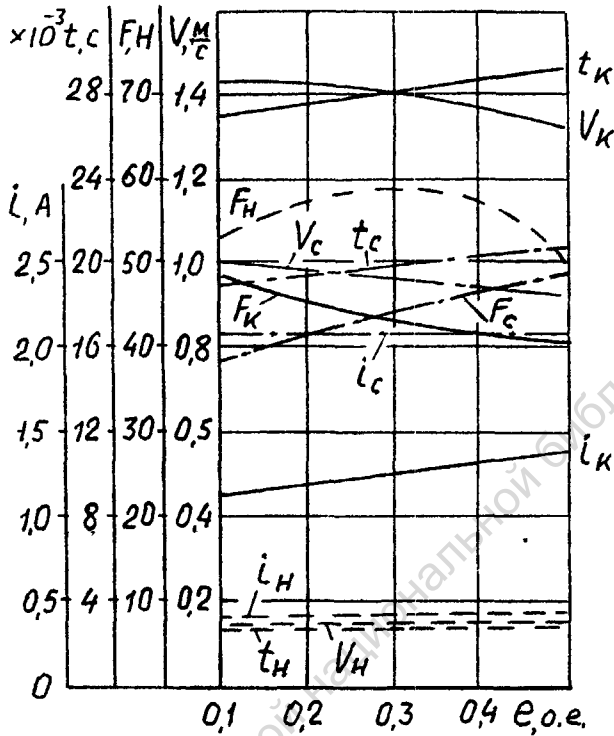


Рис. 7. Зависимости динамических характеристик от толщины диска якоря: — — — — в начале (н); - . - . - в середине (с); — — — — в конце (к) рабочего зазора

лов. Расчетный диаметр якоря определяется из преобразованной машинной постоянной линейного электромагнитного двигателя возвратно – поступательного движения с учетом принятых из практики реальных соотношений размеров обмотки, выраженных в относительных единицах -  $l'_0 = l_0 / 2 = 1,5$  и  $b'_0 = b_0 / 2 = 0,275$ . коэффициенте заполнения обмотки  $K_w = 0,6$  и магнитной индукции в рабочем зазоре, равной 1 Тл. Получено расчетное выражение приближенного диаметра якоря, м

$$d_{ia} = 6,7 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{F}, \quad (8)$$

где  $F$  - электромагнитная сила тяги, Н.

С целью проверки методики приближенного расчета диаметра якоря

проведено сопоставление расчетных размеров якорей с размерами якорей, установленных в действующем прессовом оборудовании (ПЭМ). Результаты сопоставления приведены в таблице 2.

Таблица 2

## Сопоставление радиусов якорей

Пресс	Усилие, кН	Радиус якоря, мм		$\Delta r, \%$
		ПЭМ	расчет	
ПЭМ – 0,1	0,98	16,5	18,8	13,9
ПЭМ – 0,2	1,96	21	22,3	6,2
ПЭМ – 0,3	2,94	24	24,7	2,9
ПЭМ – 0,5	4,9	28,5	28,0	-1,7
ПЭМ – 1,0	9,8	22,5	33,3	-0,6

После определения геометрических размеров магнитной системы производится расчет обмотки возбуждения по заданному оптимальному окну и допустимой температуре ее нагрева. Расчет обмотки производился для двух режимов: при постоянных значениях напряжения и тока. По окончании электромагнитного расчета согласно предложенной методике ведется расчет возвратной пружины на заданное число ходов якоря с силой тяги 1...75 кН и обеспечение возврата якоря в исходное состояние в заданное время.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Основные результаты диссертационной работы в кратком изложении можно сформулировать следующим образом:

1. На основании экспериментальных исследований разработанных физических моделей ЛЭМД проведено их сравнение по комплексным показателям, где приоритет отдан ЛЭМД с интегрированной структурой продольно-поперечного поля (типа  $S\delta$ ), позволяющей повысить начальную силу тяги в сравнении с базовой моделью в 10...14 раз и, как следствие, увеличить быстродействие двигателя.
2. Разработаны программы расчета на ЭВМ магнитной цепи ЛЭМД типа  $S_w\delta$  с цилиндрическим и конусно-усеченным якорем, позволившие исследовать влияние геометрических размеров ее элементов на формирование тяговой характеристики. В результате установлено:
  - изменением толщины фланца можно формировать тяговую характеристику в рабочем диапазоне двигателя, при этом сдвиг амплитуды фланцевой силы и соответствующий ей оптимальный рабочий ход смещаются пропорционально изменению толщины фланца;

- выявлена не критичность сечения ярма статора и толщины диска якоря на формирование тяговой характеристики, что расширяет технологические возможности при изготовлении двигателя.
  - установлено, что изменение угла наклона образующей усеченного конуса якоря от нуля до  $10^\circ$  на длине, равной радиусу якоря, позволяет существенно изменять форму тяговой характеристики.
3. Установлено, что варьирование величины тока обмотки возбуждения ЛЭМД типа S8 значительно изменяет фланцевую силу, а дисковая сила изменяется незначительно.
  4. Разработаны программы расчета на ЭВМ динамических характеристик ЛЭМД типа S8 с шихтованным и массивным магнитопроводом.
5. Предложены методики инженерного расчета основных элементов конструкции ЛЭМД: сечения якоря, параметров обмотки возбуждения и возвратной пружины.
6. Результаты работы внедрены в различные отрасли промышленности, что подтверждается 6 актами внедрения.

#### Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Катаев А.Ф., Угаров Г.Г., Львицын А.В. Регулируемый линейный электромагнитный двигатель для привода прессового оборудования /Саратовский политехнический институт, Саратов, 1982. – 5с. – Деп. в ИНФОРМЭЛЕКТРО 29.06.83, №204 ЭТ-Д83.
2. Катаев А.Ф., Гречкин В.П. Усовершенствование конструкции электромагнитного пресса /Саратовский государственный технический университет, Саратов, 1994.- 5с.- Деп. в ВИНТИ 01.08.94, 3№2005-В94.
3. Катаев А.Ф. Методика приближенной оценки основных размеров ЛЭМД /Саратовский государственный технический университет, Саратов, 1995. – 6с.- Деп. в ВИНТИ 25.07.95, №2268-В95.
4. Катаев А.Ф., Серебряков В.Н., Угаров Г.Г. Расчет температуры нагрева обмотки импульсного линейного электромагнитного двигателя /Саратовский государственный технический университет, Саратов, 1998.-9с.- Деп. в ВИНТИ 17.03.99, №840-В99.
5. Катаев А.Ф., Серебряков В.Н., Угаров Г.Г. Методика расчета обмотки линейного электромагнитного двигателя для привода дозировочного насоса / Саратовский государственный технический университет, Саратов, 1999.-7с.- Деп. в ВИНТИ 28.04.99, №1350-В99.
6. Львицын А.В., Угаров Г.Г., Катаев А.Ф., Кожевников В.Ю., Федонин В.Н. Расчет и выбор возвратной пружины однообмоточного линейного электромагнитного двигателя для прессового оборудования / Саратовский государственный технический университет, Саратов, 1983.-8с.- Деп. в ИНФОРМЭЛЕКТРО 29.06.83, №202 ЭТ-Д83.

7. Угаров Г.Г., Львицын А.В., Федонин В.Н., Витмайер Г.А., Катаев А.Ф., Кожевников В.Ю. Пресс усилием 30 кН с линейным электромагнитным приводом // Информационный листок. Саратовский ЦНТИ, 1984, серия 55.29.31., №41-84.
8. Угаров Г.Г., Катаев А.Ф., Хусаинов И.М., Нейман В.Ю. Импульсные линейные электромагнитные двигатели с интегрированной структурой // Электроприводы переменного тока. Материалы XI научно-техн. конф. - Екатеринбург: УГТУ, 1998.- С.40-43.
9. А.с. 844116 (СССР). Электромагнитный пресс /Катаев А.Ф., Серебряков В.Н.-Опубл. в БИ, 1981, №25.
10. А.с. 1816528 (СССР). Электромагнитный пресс с вертикальной осью /Катаев А.Ф., Федонин В.Н., Витмайер Г.А., Гречкин В.П.- Опубл. в БИ, 1993, №19.
11. А.с. 1726101 (СССР). Электромагнитный привод пресса /Катаев А.Ф., Федонин В.Н., Витмайер Г.А.- Опубл. в БИ, 1993, №14.
12. А.с. 1294446 (СССР). Электромагнитный пресс /Федонин В.Н., Кожевников В.Ю., Катаев А.Ф., Львицын А.В.- Опубл. в БИ, 1987, №9.
13. А.с. 1725330 (СССР). Электродвигатель возвратно-поступательного движения /Катаев А.Ф., Федонин В.Н., Витмайер Г.А.- Опубл. в БИ, 1992, №13.
14. Пат. 1792783 (РФ). Электромагнитный пресс /Федонин В.Н., Катаев А.Ф., Витмайер Г.А., Гречкин В.П.- Опубл. в БИ, 1993, №5.

**КАТАЕВ Анатолий Федорович**  
**ИМПУЛЬСНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ**  
**С ИНТЕГРИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ**

Автореферат

Ответственный за выпуск В.Н. Серебряков  
Корректор Л.А. Скворцова

Лицензия ЛР №020271 от 15.11.96

Подписано в печать 30 10 00

Формат 60×80 1/16

Бум. тип.

Усл.-печ.л. 1,1

Уч.-изд.л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 460

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054 г.Саратов, ул. Политехническая, 77

Копипринтер СГТУ, 410054 г Саратов, ул. Политехническая, 77