

4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования / Официальное издание. М.: Госстрой России, Мин. экономики РФ, Мин. финансов РФ, Госкомпром РФ, 1994. 98 с.

5. Толстов В.А. Эффективность электротехнологических установок / В.А.Толстов, Ю.С.Архангельский. Саратов: СГТУ, 2000. 146 с.

6. Архангельский Ю.С. Элементная база СВЧ электротермического оборудования / Ю.С.Архангельский, В.А.Воронкин. Саратов: СГТУ, 2003. 212 с.

7. Дунаева Т.Ю. Обеспечение конкурентоспособности СВЧ электротермических установок и мероприятия по ее повышению на стадиях проектирования и эксплуатации: дис... канд. техн. наук / Т.Ю. Дунаева. Саратов, 2009. 215 с.

8. Колесников Е.В. Проектирование электротехнологических установок / Е.В.Колесников. Саратов: СГТУ, 2006. 282 с.

**Архангельский Юрий Сергеевич** –  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Автоматизированные  
электротехнологические установки и системы»  
Саратовского государственного  
технического университета

**Arkhangelskiy Yuri Sergeyevich** –  
Honoured Worker of Science of the Russian  
Federation, Doctor of Technical Science,  
Professor, Head of the Department  
of «Automated Electrical-Technological Plants  
and Systems» of Saratov State  
Technical University

*Статья поступила в редакцию 04.04.10, принята к опубликованию 26.05.10*

УДК 621.318.3

**А.А. Егоров**

### **БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ СВЧ-ЭНЕРГИИ С ИМПУЛЬСНЫМ ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ**

*Показана перспективность применения линейного электромагнитного двигателя цилиндрической укороченной магнитной системы в приводе быстродействующего переключателя СВЧ-энергии.*

Линейный электромагнитный двигатель, привод, переключатель СВЧ-энергии, магнитная система.

**A.A. Yegorov**

### **PULSED LINEAR ELECTROMAGNETIC DRIVE CONCEPT FOR HIGH-SPEED SWITCH OF MICROWAVE ENERGY**

*In the article the perspective of the linear electromagnetic engine use of the cylindrical shortcut ferromagnetic system in drive for high-speed switch of the microwave energy is shown. The article demonstrates consideration of these problems.*

Linear electromagnetic engine, drive, microwave energy switch, ferromagnetic system.

В электрически сканируемых антенных системах, радиолокации, технике измерений слабых СВЧ-сигналов для плоских прямоугольных, а также щелевых, волноводных каналов могут найти применение быстродействующие переключатели СВЧ-энергии, использующие в качестве приводного двигателя заслонки импульсный линейный электромагнитный двигатель (ЛЭМД). Недостатками известных переключаемых устройств СВЧ-энергии [1] являются невысокое быстродействие, а также повышенные масса и объем за счет применения ЛЭМД нерациональной магнитной системы.

В работе [2] изложены результаты моделирования методом конечных элементов линейных электромагнитных двигателей цилиндрической укороченной магнитной системы (МС), обладающих высокими энергетическими показателями, простотой и технологичностью изготовления. Основная часть результатов работы получена с использованием вычислительного программного комплекса электромагнитных полей Elcut. Анализ тяговых характеристик электромагнитных двигателей различных типов позволяет считать перспективными для целей силового привода в данной технологической операции цилиндрические бронева ЛЭМД укороченной магнитной системы, обладающие высокими удельными энергетическими показателями, простотой и технологичностью изготовления; данные исследования также показывают, что ЛЭМД с укороченной МС также превосходят соответствующие базисные по величине интегральной работы на 23%. Поэтому для электромагнитного привода быстродействующего переключателя будем рассматривать цилиндрические бронева ЛЭМД укороченной магнитной системы.

Исследования, проведенные в работе [3], показали, что двигатели с крутым начальным фронтом импульса силы обладают лучшим быстродействием, чем с пологим, так как в начале хода они быстрее разгоняют якорь. Согласно теории оптимальных быстродействий [4], одними из главных требований в момент включения двигателя являются получение максимальной начальной силы тяги и поддержание ее на высоком уровне в течение времени движения якоря. Поэтому для применения ЛЭМД в быстродействующих переключателях СВЧ-энергии необходимо иметь двигатели с формами тяговых характеристик, обладающих повышенными начальными тяговыми силами.

Стремление получить тяговую характеристику с крутым начальным фронтом импульса силы привело к идее совмещения положительных качеств у конструкций МС ЛЭМД с продольным магнитным полем и у ЛЭМД с поперечным магнитным полем. Исследование магнитных цепей различных типов магнитных систем ЛЭМД показало, что тяговую механическую характеристику двигателя, имеющую крутой начальный фронт импульса силы, можно получить лишь у ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем и конусообразным полюсом и якорем [2].

Произведем расчет осесимметричной МС ЛЭМД продольно-поперечного поля с учетом формирования требуемой тяговой характеристики для быстродействующего переключателя СВЧ-энергии в вычислительном программном комплексе Femm. Расчет магнитостатического осесимметричного поля в кусочно-однородной, нелинейной области ( $\mu(H)$ ) покажем для ЛЭМД продольно-поперечного поля с втяжным якорем. Исследуется модель в плоскости  $r_0 z$  декартовой системы координат. Геометрия двумерной модели представлена на рис. 1 а.

Далее строятся модель ЛЭМД и картина эквипотенциальных линий модуля вектора магнитной индукции в данной модели (рис. 1 б). После распределения силовых линий магнитного поля определяется электромагнитная сила по формуле Максвелла в выражении для натяжения на произвольно ориентированной в магнитном поле поверхности:

$$\vec{T}n = \frac{1}{\mu \cdot \mu_0} \left( \vec{B} \cdot Bn - \frac{1}{2} B^2 \cdot \vec{n} \right), \quad (1)$$

соответственно полная сила, действующая на объем  $V$ , выделенный поверхностью  $S$ , определяется путем интегрирования элементарных сил  $d\vec{F} = \vec{T}n \cdot dS$ , действующих в магнитном поле на элемент  $dS$  поверхности  $S$  со стороны нормали, т.е. снаружи:

$$\vec{F} = \oint_S \vec{T}_n \cdot d\vec{S}, \quad (2)$$

где  $\vec{B}$  – вектор индукции в рассматриваемой точке поверхности;  $\mu_r \mu_0$  – магнитная проницаемость среды в этой точке;  $\vec{n}$  – нормальный орт к той стороне поверхности, на которую действует вектор натяжения  $\vec{T}_n$ ;  $B_n$  – нормальная составляющая индукции.

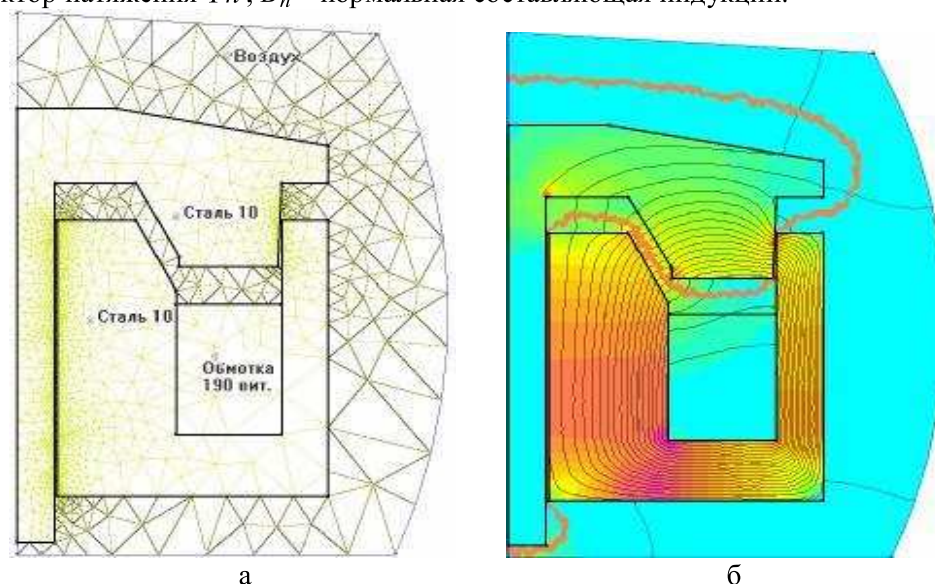


Рис. 1. Модель ЛЭМД с продольно-поперечным полем и конусообразным ярком:  
а – геометрия модели с сеткой треугольных элементов; б – картина эквипотенциальных линий модуля вектора магнитной индукции в модели ЛЭМД с обозначенным тензором натяжений

В исследуемой магнитной системе объединены несколько электромагнитных преобразователей с различными видами магнитных потоков (продольного, поперечного, рассеяния и выпучивания), действующих одновременно в пределах определенной части рабочего хода. Статические тяговые характеристики ЛЭМД продольно-поперечного поля с конусно-усеченным полюсом и ярком при различных углах образующей рассчитаны по формуле (2) и представлены на рис. 2.

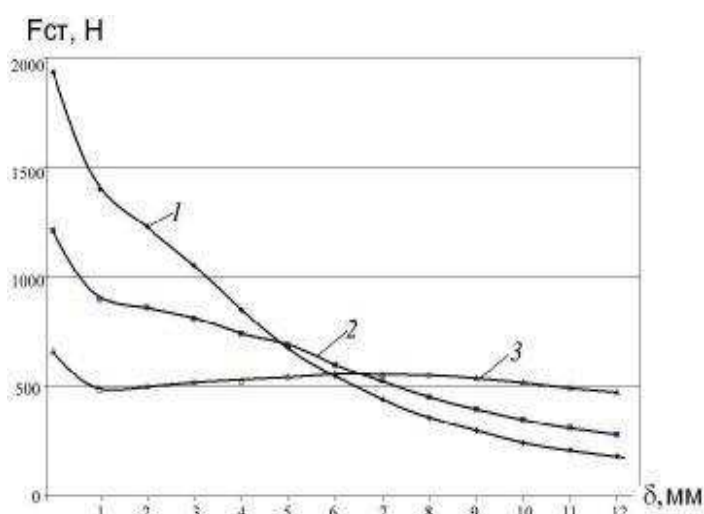


Рис. 2. Статические тяговые характеристики ЛЭМД укороченной магнитной системы с продольно-поперечным полем и конусно-усеченным полюсом и ярком при угле образующей:  
1 –  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 60^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 80^\circ$

На рис. 2 представлены статические тяговые характеристики ЛЭМД укороченной магнитной системы с продольно-поперечным полем при изменении величины угла образующей. Из анализа статических тяговых характеристик следует, что при увеличении угла образующей характеристика приближается к магнитной системе ЛЭМД с поперечным полем, а при уменьшении – ЛЭМД с продольным полем. Это выгодно отличает рассматриваемые системы с продольно-поперечным полем от аналогичных систем других конструкций. Зависимость 3 имеет относительно постоянную силу тяги на всем рабочем диапазоне ходов.

Полученные статические тяговые характеристики были проверены экспериментально на изготовленной физической модели ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем и конусно-усеченным полюсом и якорем (угол образующей  $30^\circ$ ) для привода быстродействующего переключателя СВЧ-энергии (рис.3). Расчетная статическая тяговая характеристика удовлетворительно совпадает с экспериментальной (рис. 3).

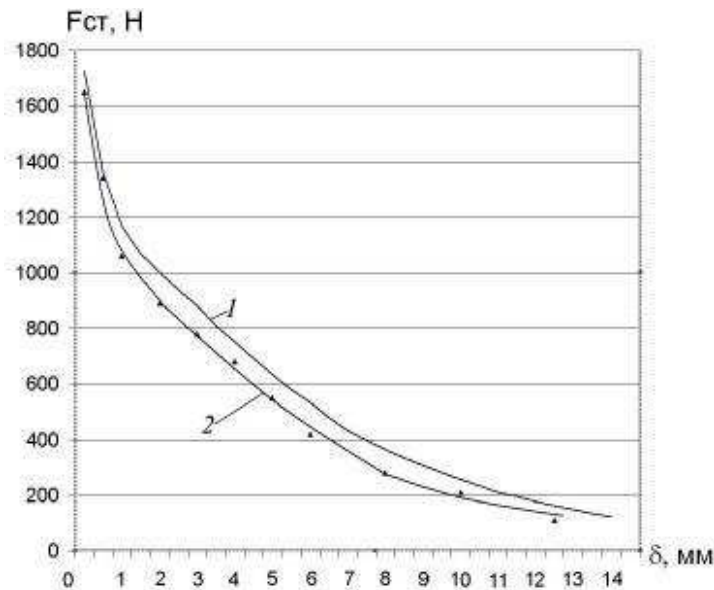


Рис. 3. Статические тяговые характеристики ЛЭМД с продольно-поперечным магнитным полем, конусно-усеченным полюсом и якорем ( $\alpha = 30^\circ$ ): 1 – результат моделирования; 2 – эксперимент

Среднеквадратичная погрешность среднего результата измерения тягового усилия в серии экспериментов определялась по формуле:

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{\sum (F_{CT} - \overline{F_{CT}})^2}{N \cdot (N-1)}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

выборочное среднеквадратичное отклонение среднего результата измерений:

$$\overline{F_{CT}} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{CT}}{N}, \quad (4)$$

где  $F_{CT}$ ,  $\overline{F_{CT}}$  – статические силы тяги, измеренное и истинное (среднее выборочное) значения измеряемой величины соответственно;  $N$  – количество фиксируемых точек.

Расчет по формуле (3) дает значение 5,7%. Расхождение в параметрах между теоретическими и экспериментальными данными обусловлено как существующими погрешностями измерений, так и разбросом параметров магнитных характеристик стали магнитной системы ЛЭМД. Таким образом, результаты теоретических расчетов моделирования согласуются с экспериментальными данными (рис. 3), что подтверждает адекватность модели ЛЭМД рассматриваемого типа.

Возможная конструкция быстродействующего переключателя СВЧ-энергии с линейным электромагнитным приводом продольно-поперечного поля укороченной МС представлена на рис. 4.

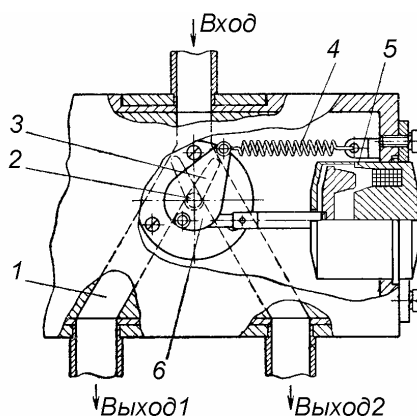


Рис. 4. Быстродействующий переключатель СВЧ-энергии с линейным электромагнитным приводом

Переключатель работает следующим образом. В отключенном состоянии электромагнитная энергия проходит по волноводному каналу 1 на Выход 1, на Выход 2 энергия не проходит, так как канал закрыт заслонкой 3, закрепленной на оси 2. Для подачи электромагнитной энергии на Выход 2 включается ЛЭМД 5, якорь которого связан с двуплечим рычагом 6. Преодолевая силу противодействующей пружины 4, якорь при движении перемещает рычаг 6 с заслонкой 3, а следовательно, закрывается канал 1 и открывается канал для СВЧ-энергии на Выход 2.

Предложенный ЛЭМД укороченной МС продольно-поперечного поля с конусно-усеченными полюсом и якорем и двумя рабочими зазорами позволяет повысить массогабаритные показатели переключателя СВЧ-энергии и обеспечить его быстродействие.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Казаков Л.А. Электромагнитные устройства РЭА: справочник / Л.А. Казаков. М.: Радио и связь, 1991. 52 с.
2. Угаров Г.Г. Моделирование магнитной системы линейного электромагнитного двигателя для прессования СВЧ-ферритов / Г.Г. Угаров, А.А. Егоров, Д.А. Вырыханов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. №4(19). Вып. 4. С. 47–52.
3. Михайлов О.П. Электромагнитные и магнитные устройства в станкостроении / О.П. Михайлов, Э.Б. Рогачев, Ю.Н. Ивенский. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.
4. Садовский В.Н. Принцип системности, системный подход и общая теория систем. Системные исследования / В.Н. Садовский. М.: Наука, 1988. 305 с.

**Егоров Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета

**Egorov Andrey Aleksandrovich** – Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of «Electrosupply of Industrial Enterprises» of Saratov State Technical University

*Статья поступила в редакцию 26.04.10, принята к опубликованию 26.05.10*