

УДК 621.313.17

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРИВОДОВ С УЧЕТОМ ЗУБЧАТОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТОПРОВОДА

Л.А. Нейман, О.В. Рогова

*Новосибирский государственный технический университет  
neyman31@gmail.com*

Представлены результаты исследований влияния зубчатых элементов магнитопровода электромагнитного двигателя одного объема на амплитуды тяговых характеристик. Решение задачи получено с помощью конечно-элементного моделирования магнитного поля. Дана предварительная оценка эффективности применения магнитных систем относительно пространственной геометрии расположения зубчатых элементов магнитопровода.

*Ключевые слова:* электромагнитный двигатель, зубчатые элементы магнитопровода, расчет тяговых характеристик.

### 1. Постановка задачи

При разработке и создании электромеханических систем технологического оборудования большое внимание уделяется линейному электроприводу с циклическим возвратно-поступательным движением, подвижная часть которого непосредственно без промежуточных кинематических звеньев и передач связана с перемещаемыми массами. К числу известных разработок в этой области можно отнести электропривод компрессоров, вибраторов, насосов и т. д., силовым исполнительным элементом которых является электромагнитный двигатель [1].

Для обеспечения наибольшей эффективности по удельным силовым и энергетическим показателям в перечисленных устройствах в большинстве случаев используют конструкции электромагнитных двигателей с фиксацией конечного положения якоря, что позволяет наилучшим образом концентрировать магнитное поле в области электромеханического преобразования магнитной энергии и максимально повысить глубину модуляции индуктивности.

Однако при проектировании подобных устройств возникает необходимость создания тяговых характеристик специального вида, не допускающих удара в рабочем диапазоне перемещений якоря, что может быть связано с совершенствованием самих электромеханических преобразователей энергии или оптимизацией алгоритмов управления ими.

Наличие динамической зависимости между массой механических звеньев устройства и условиями его работы, а также высокой частоты колебаний (до 50 Гц) и, следовательно, производной индуктивности по перемещению усложняет процесс управления и качество позиционирования при перемещении якоря, что не гарантирует безударной работы.

Наилучшие результаты в достижении поставленной цели можно получить применением электромагнитных двигателей специальной зубчатой конструкции элементов

магнитопровода, что дает ряд преимуществ, когда отсутствие механической фиксации якоря сочетается со значительным тяговым усилием и относительно малыми размерами самого устройства.

**2. Варианты исполнения электромагнитных двигателей**

Возможен ряд вариантов исполнения двигателей, шесть из них, представляющих наибольший интерес, показаны на рис. 1.

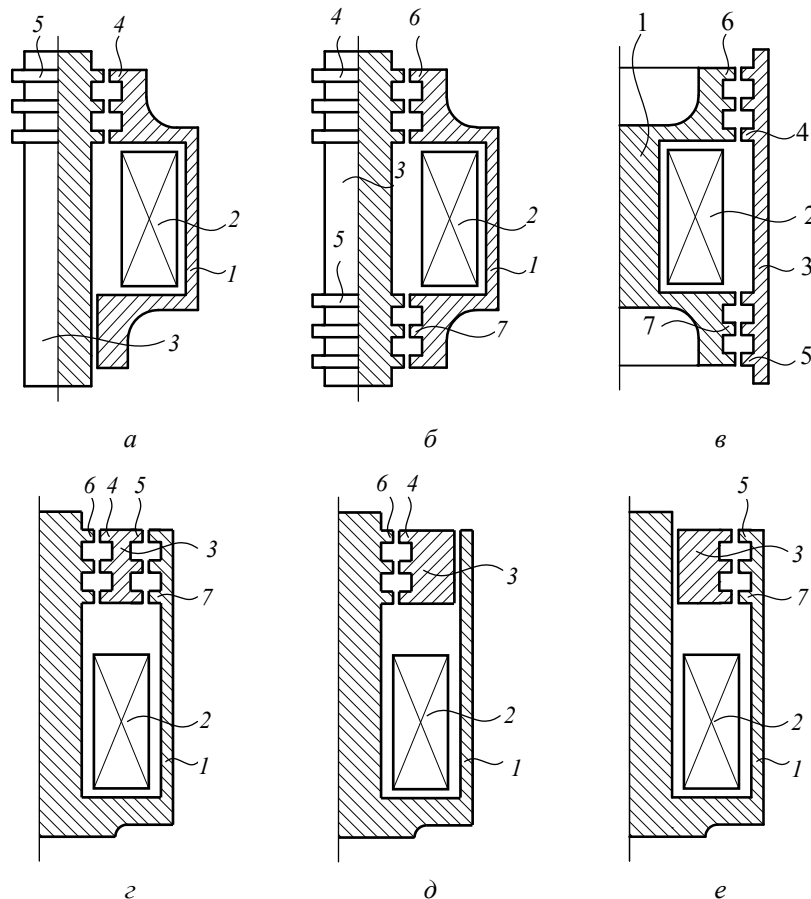


Рис. 1. Варианты конструктивных схем двигателей

Цилиндрический вариант таких электромагнитных двигателей позволяет конструктивно просто выполнить элементы магнитопровода и направляющих устройств для прямолинейного перемещения подвижного элемента (якоря).

Проведенные ранее исследования показали, что, изменяя геометрические параметры магнитной цепи, можно менять форму тяговых характеристик, а также величину интегральной работы даже при одной и той же величине магнитодвижущей силы.

В отличие от традиционных цилиндрических электромагнитных двигателей с притягивающимся якорем с продольным, поперечным или комбинированным в области энергопреобразования магнитным потоком для зубчатых магнитных систем присущи

следующие особенности, учет которых имеет существенное значение для их проектирования с оптимальными параметрами:

- сложность пространственного распределения индукционных линий магнитных полей во внутреннем объеме между кольцевыми частями зубцовой зоны внутренней полюсной системы статора и наружной полюсной системы якоря;
- магнитная несимметрия, вызывающая неравномерное распределение магнитного потока в рабочих областях зубцовой зоны.

С учетом перечисленных особенностей введение некоторых упрощений при анализе даже на этапе предварительной оценки может оказаться достаточно грубым приближением.

В настоящей работе дается предварительная оценка эффективности применения перспективных структур зубчатых магнитных систем с точки зрения конструктивного совершенства.

Цилиндрический двигатель (рис. 1, *а*) содержит статор 1, имеющий наружный магнитопровод с примыкающими к нему полюсами и расположенной внутри катушкой 2, с подвижным элементом (якорем) 3. На одной из сторон подвижного элемента – якоря выполнены равномерно чередующиеся зубцовые элементы 4 в виде колец, являющиеся частью магнитной системы и расположенные перпендикулярно передаваемой силе.

По образующей внутренней цилиндрической поверхности полюсной системы статора выполнены ответные зубцовые элементы 5 с равномерным шагом, равным шагу зубцовых делений на якоре.

Структура элементов магнитной цепи двигателя удовлетворяет соотношениям:  $h_k/l_k=0,5$ ;  $b_z/\tau=0,4$ ;  $b_z/h_z=1,0$ ;  $b_{\Pi}/\tau=0,6$ ;  $\Delta/\tau=0,025$ ,  $h_k$  – высоты окна катушки;  $l_k$  – длина катушки;  $h_z$  – высота зубца;  $b_z$ ,  $b_{\Pi}$  – соответственно ширина зубца и паза зубцового деления  $\tau$ ;  $\Delta$  – технологический зазор.

Между полюсными элементами статора и якорем по конструктивно-технологическим соображениям выполнен технологический зазор, исключающий их механическое взаимодействие.

При протекании тока в катушке движение якоря осуществляется в аксиальном направлении. Направление движения якоря определяется начальным положением зубцовой зоны элементов на якоре по отношению к зубцовой зоне элементов на полюсе статора.

Положение зубцовых элементов на якоре по отношению к зубцовым элементам полюса статора, согласно рис. 1, обеспечивает магнитное равновесие системы, когда индукция в рабочем зазоре максимальна, а результирующее тяговое усилие равно нулю.

В другом варианте двигателя (рис. 1, *б*) достигается симметрирование магнитной системы за счет того, что зубцовые элементы 4, 5 на якоре 3 и ответные зубцовые элементы 6, 7 на полюсах статора 1 выполнены по симметричной по отношению к катушке 2 двухсторонней схеме. По сути, вариант двигателя, выполненный по рис. 1, *б*, является логическим завершением варианта двигателя по схеме рис. 1, *а*. Структура элементов магнитной цепи удовлетворяет тем же соотношениям.

На рис. 1, *в* приведена конструкция аналогичного по назначению и принципу действия линейного двигателя, но в отличие от вариантов двигателей рис. 1, *а* и *б*

статор  $I$  с намотанной на него катушкой  $2$  расположен внутри цилиндрического по форме якоря  $3$ . Предлагаемый вариант схемы по конструкции магнитопровода имеет симметрированную магнитную систему. Зубцовые элементы  $4, 5$  на якоре  $3$  и зубцовые элементы  $6, 7$  на полюсах статора  $I$  выполнены по симметрированной схеме.

Рассмотренный вариант схемы двигателя (рис. 1,  $в$ ) по аналогии с вариантом схемы двигателя на рис. 1,  $а$  может быть также реализован по односторонней схеме.

Принципиальные конструктивные отличия имеют линейные двигатели, выполненные по вариантам схем, представленных на рис. 1,  $з-е$ . Основу конструкции таких двигателей составляет цилиндрический линейный электромагнитный двигатель поперечного магнитного потока с кольцеобразным якорем [2].

Цилиндрический двигатель на рис. 1,  $з$  содержит статор  $I$  с расположенными внутри катушкой  $2$  и кольцеобразным втяжным якорем  $3$ . На внешнем и внутреннем диаметре якоря выполнены с равным шагом зубцовые элементы  $4$  и  $5$ , расположенные перпендикулярно передаваемой силе. По внутренним диаметрам статора  $I$  выполнены с равным шагом ответные зубцовые элементы  $6$  и  $7$ .

Структура элементов магнитной цепи двигателя удовлетворяет соотношениям варианта схемы рис. 1,  $а$ .

В варианте двигателя на рис. 1,  $д$  предполагается использование односторонней зубчатости якоря  $3$  по его внешней образующей цилиндрической поверхности, а в варианте двигателя на рис. 1,  $е$  – по его внутренней образующей цилиндрической поверхности. Таким образом, сочетание конструктивных особенностей двигателей, выполненных по вариантам схем рис. 1,  $д$  и  $е$ , позволяет реализовать вариант двигателя рис. 1,  $д$ .

Несмотря на простоту конструкций электромагнитных двигателей, проектирование их затруднено нелинейностью свойств используемых магнитных материалов и сложным пространственным распределением магнитных полей.

### 3. Результаты исследований

На основе анализа характера распределения магнитных полей и сил можно сформулировать требования к построению зубчатых магнитных систем, заключающиеся в повышении глубины модуляции индуктивности за счет конструирования магнитных систем с резко неоднородными по магнитным свойствам участками; в наибольшей концентрации магнитного поля в области электромеханического преобразования энергии; в снижении магнитных сопротивлений путем сокращения длины силовых линий магнитного поля; в формировании за счет пространственной геометрии взаимодействующих элементов, синхронизирующих характеристик требуемого вида; в повышении магнитной индукции в рабочем зазоре концентрацией магнитных полей [3].

Следует указать, что значения тяговых сил будут в значительной степени зависеть от соотношений геометрии зубцовых зон элементов магнитопровода, которые в рамках проводимых исследований не рассматривались.

Здесь только следует отметить, что в основе выбора оптимальных соотношений геометрии зубцовой зоны в основном лежит обеспечение максимальной степени использования магнитного потока, заключающееся в стремлении уменьшить величину нерабочей постоянной составляющей и увеличить амплитуду рабочей переменной составляющей потока, обеспечивающего наиболее эффективную работу линейного двигателя, критерием которого может являться механическая работа или коэффициент полезного действия.

При проведении электромагнитных расчетов использовалось программное обеспечение, позволяющее с учетом насыщения стали и поля рассеяния рассчитывать тяговые характеристики.

Алгоритм расчета базируется на использовании семейства характеристик тяговых усилий, рассчитанных для различных взаимных положений якоря относительно статора на расстоянии одного шага зубцового деления  $\tau$  с применением метода конечных элементов [4]. Апробация данного метода показала высокую степень точности электромагнитных расчетов при исследовании ряда электромагнитных двигателей со сложной конфигурацией магнитной цепи [5, 6].

В процессе расчетов для каждого варианта рис. 1, *a–e* рассчитывалась статическая тяговая характеристика при одинаковых значениях намагничивающей силы обмоток и при значениях индукции, близких к насыщению стальных участков магнитопровода при положении якоря по отношению к полюсам статора, обеспечивающем наименьшее магнитное сопротивление.

Также варьирование количеством зубцовых зон оказывает влияние на форму и амплитуду тяговых усилий, в связи с чем в проводимых исследованиях количество зубцов во всех вариантах двигателей было ограничено  $z=3$ . Форма и соотношения размеров зубцовых элементов, как и свойства магнитных материалов, принимались одинаковыми. Кривая намагничивания конструкционной стали приведена на рис. 2.

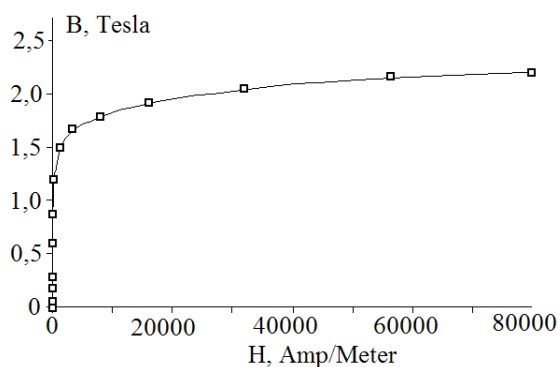


Рис. 2. Кривая намагничивания стали

Намагничивающая сила катушки принималась равной  $F=2500$  А при токе  $I=10$  А.

Все варианты двигателей примерно одного веса и объема. Магнитная цепь, сечения и размеры магнитопровода, параметры катушки возбуждения рассчитывались традиционными методами.

Следует учесть, что на практике выдерживание постоянства сечения стали магнитопровода на всем пути магнитного потока не означает равенства индукции в ней, особенно это касается участков магнитной цепи, где осуществляется основной процесс электромеханического преобразования энергии, в результате чего в системе существуют участки магнитопровода с индукцией, большей или меньшей расчетной.

На рис. 3 приведены расчетные значения статических тяговых характеристик в зависимости от положения якоря. Номер кривой, указанный на рисунке, соответствует варианту схемы двигателя.

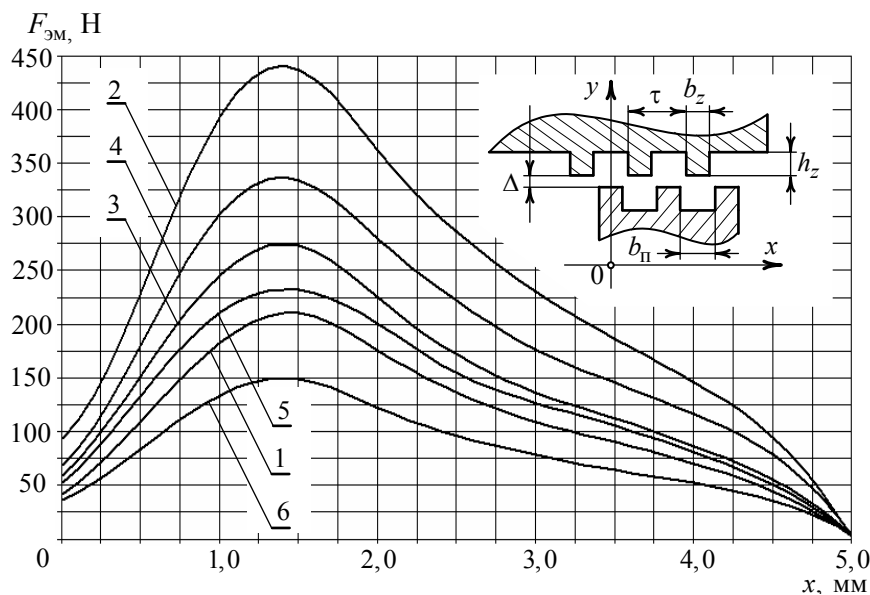


Рис. 3. Статические тяговые характеристики

Положение прямоугольных по форме зубцов якоря относительно зубцов на полюсах статора, указанное на рис. 1, соответствует точке статической тяговой характеристики с координатой  $x=5$  мм. Точка на графике (рис. 3) с координатой  $x=0$  мм соответствует начальному положению якоря.

В результате исследований установлено, что при одном и том же значении намагничивающей силы и рабочего зазора сила тяги для различных вариантов существенно отличается.

Анализ показывает, что наилучшими показателями обладает вариант схемы двигателя рис. 1, б, превосходящий по силе тяги в среднем в 1,3 раза близкий к нему вариант схемы двигателя рис. 1, г, и в 2,9 раза вариант схемы двигателя рис. 1, е.

Сравнение двух наиболее близких по конструкции вариантов схем двигателей с несимметрированной (рис. 1, а) и симметрированной (рис. 1, б) магнитной системой показывает, что выполнение зубцовых элементов по двухсторонней схеме позволило добиться увеличения тяговых усилий в два раза.

В связи с тем, что тяговое усилие пропорционально квадрату индукции и площади поверхности рабочего зазора, то при вдвое большей площади рабочего зазора в варианте схемы двигателя рис. 1, б по сравнению с вариантом рис. 1, а двукратное увеличение усилия возможно только при постоянстве индукции в области, занятой рабочим зазором.

Распределения индукции в рабочем зазоре, полученного на ширине полюса рис. 4, а и б при притяннутом якоре, соответствующие вариантам схем двигателей рис. 1, а и б, доказывают о возможности данного утверждения.

Так как все варианты схем двигателей имеют одинаковые соотношения размеров и отличаются только одно- или двухсторонней зубчатостью магнитной системы и ее конфигурацией, то при одинаковой площади рабочего зазора тяговое усилие будет в значительной степени определяться индукцией.

Сравнения тяговых характеристик (рис. 3) и соответствующих вариантам схем двигателей распределений индукции в рабочем зазоре (рис. 4) показывают полную идентичность между амплитудами получаемых усилий и амплитудами индукции.

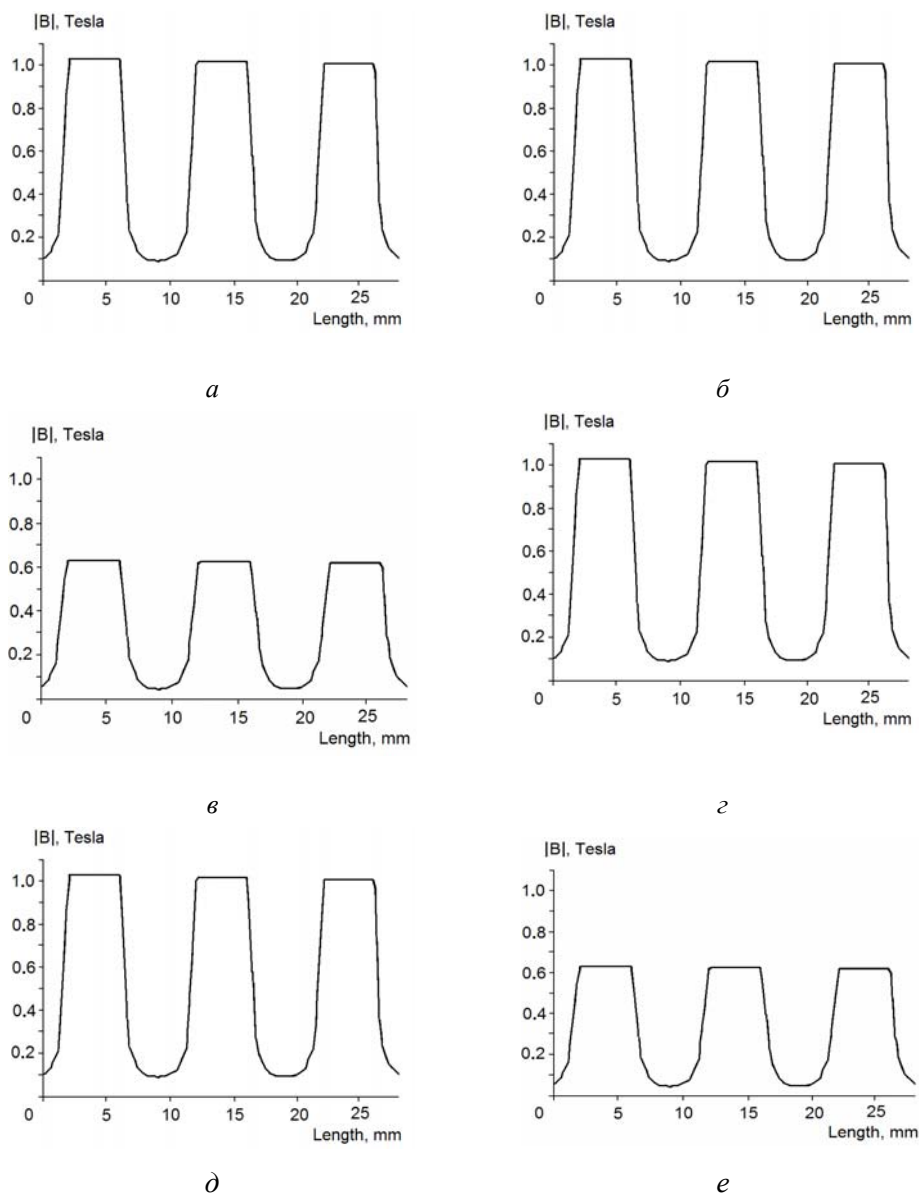


Рис. 4. Распределение индукции в зубцовой зоне на ширине полюса

Для варианта схемы двигателя (рис. 1, *з*) распределение индукции в рабочем зазоре показано по внутреннему диаметру якоря (рис. 4, *з*). Распределение индукции по внешнему диаметру аналогично варианту схемы двигателя рис. 1, *е*.

При использовании того или иного варианта схемы двигателя (для принятого за 100 %) на рис. 5 для сравнения показано распределение амплитудных тяговых усилий.

Дальнейшее сравнение типовых вариантов схем двигателей приведено по интегральной работоспособности (рис. 6). В диапазоне рабочего хода определялась площадь под кривыми статических тяговых характеристик (рис. 3). Интегральная работа  $A_{\text{и}}$  представлялась в процентах по отношению (принятая за 100 %) к варианту схемы двигателя рис. 1, б.

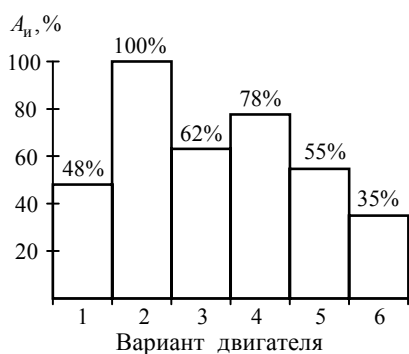


Рис. 5. Относительные значения максимального усилия

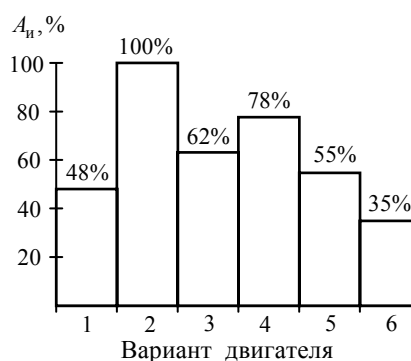


Рис. 6. Относительные значения интегральной работы

По критерию интегральной работоспособности как величине, характеризующей потенциальную возможность в совершении полезной механической работы, сравнение вариантов схем двигателей между собой не изменило расстановки мест.

Так как исследуемые двигатели имели примерно равный вес, то и удельные показатели  $F_{\text{м}}$ ,  $A_{\text{и}}$  на единицу веса активных материалов будут отличаться в процентном соотношении, как и их абсолютные значения (рис. 5 и 6).

При сравнении вариантов схем двигателей также следует принимать во внимание возможность уменьшения динамической зависимости за счет массы подвижных элементов (якорей). По конструктивному исполнению вариант схемы двигателя рис. 1, з при заданных соотношениях размеров имеет в 2,3 раза меньшую массу якоря в сравнении с вариантом схемы двигателя рис. 1, а.

Также следует обращать внимание на одну важную особенность в исполнении конфигурации магнитных систем, а именно пространственную геометрию зубцовых зон. Двигатели, в которых зубцовые зоны пространственно расположены ближе к линии осевой симметрии, имеют более высокую концентрацию магнитных полей, вследствие чего обладают более высокими показателями по усилию и интегральной работе.

### 3. Заключение

Исследования показали, что при сохранении принятых габаритных размеров и единой структуре элементов магнитной цепи варианты схем двигателей, имеющие зубчатые элементы магнитопровода, имеют существенные отличия по силовым и энергетическим показателям.

Таким образом, исследования показали, что при сохранении весовых показателей и одинаковой структуре элементов магнитной цепи варианты схем двигателей, имею-



щие зубчатые элементы магнитопровода, могут в значительной степени отличаться между собой по силовым и энергетическим показателям.

Наиболее высокими показателями обладают двигатели, выполненные по вариантам схем рис. 1, б и г.

Также установлено, что пространственное расположение зубчатых элементов магнитопровода относительно линии осевой симметрии двигателя оказывает влияние на его тяговую характеристику и интегральную работу.

Для обеспечения безударных нагрузок в кинематических звеньях электромагнитного привода целесообразно принять двигатели специальной зубчатой конструкции элементов магнитопровода, для которых отсутствие механической фиксации якоря сочетается со значительным тяговым усилием.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / под ред. Н.П. Ряшенцева. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981. – 150 с.

[2] **Ряшенцев Н.П.** Электромагнитные прессы / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, А.В. Львицын. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 216 с.

[3] **Афонин А.А.** Электромеханические преобразователи непосредственного привода / А.А. Афонин // Изв. вузов. Электромеханика, 1990. – № 9. – С. 96–102.

[4] **Буль О.Б.** Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М.: Академия, 2005. – 336 с.

[5] **Neyman V.I., Yu.** Calculation of Efficiency of a DC Power Electromagnet for Mechanotronic Systems / V.I. Neyman, L.A. Neyman, A.A. Petrova // IFOST 2008: Proceedings of the 3d International Forum on Strategic Technology, June 23-29, 2008, Novosibirsk, Tomsk. – P. 452–454.

[6] **Нейман В.Ю.** К вопросу учета главных размеров при выборе типа электромагнита по значению конструктивного фактора / В.Ю. Нейман, Л.А. Нейман, А.А. Петрова, О.В. Рогова, А.А. Скотников // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 50–53.

*Neyman L.A., Rogova O.V.*

#### INVESTIGATION OF TRACTION CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC DRIVES WITH RESPECT TO THE INFLUENCE OF TOOTH COMPONENTS OF A CORE

The results of the influence of tooth components of a core on amplitudes of traction characteristics of the electromagnetic motor at an original volume are presented. The problem was solved by the finite-element magnetic field modulation. The preliminary estimation of the influence of tooth components arrangement is given.

*Keywords:* Electromagnetic drive; Tooth components of a core; Calculation of traction characteristics.

*Статья поступила 1 ноября 2012 г.*