

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПОПЕРЕЧНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЯКОРЯ И ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ШУНТАМИ В РАБОЧИХ ЗАЗОРАХ

Байда Е.И., к.т.н., доц., Чепелюк А.А.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"

тел. (0572) 40-08-64, E-mail: baida@kpi.kharkov.ua, chep@kpi.kharkov.ua

Приведені результати розрахунку статичних тягових характеристик електромагнітних систем з поперечним рухом якоря методом ділянок та методом кінцевих елементів. Проведений порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних, на основі якого визначені області застосування даних методів при проектуванні електромагнітних систем з поперечним рухом якоря.

Приведены результаты расчета статических тяговых характеристик электромагнитных систем с поперечным движением якоря методом участков и методом конечных элементов. Проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных, на основании которого определены области применения данных методов при проектировании электромагнитных систем с поперечным движением якоря.

Использование в воздушных контакторах переменного тока с поворотной контактной системой приводных электромагнитов постоянного тока с поперечным движением якоря, взамен традиционных, позволяет улучшить их технико-экономические показатели за счет более рациональной компоновки конструкции [1].

Эскиз такого электромагнита с обозначением основных размеров приведен на рис. 1. Подвижная часть электромагнита - якорь 4 закреплен жестко на валу 5, на котором вращаются и подвижные контакты. Ось вращения якоря при этом совпадает с осью вращения вала (точка O), однако, рабочая плоскость якоря смещена относительно оси вращения вала (установлена прокладка 6). В результате такой компоновки электромагнита ось сердечника 2 с катушкой 3 располагается параллельно плоскости установки контактора, что приводит к уменьшению его габаритного размера по глубине. Якорь наклонен относительно неподвижной части электромагнита, при этом величины рабочих зазоров (между скобами 1 и якорем) будут разными - δ_1 и δ_2 .

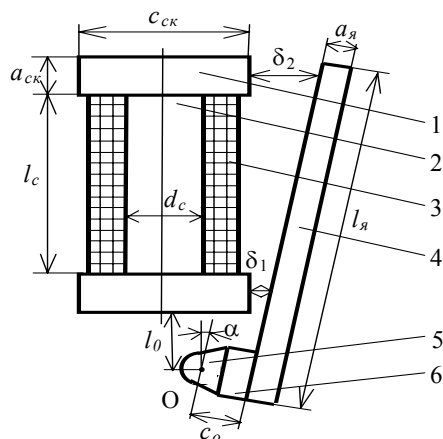


Рис.1 Эскиз электромагнита с поперечным движением якоря для контактора переменного тока

Основной характеристикой рассматриваемого электромагнита постоянного тока является его статическая тяговая характеристика, которая представляет

собой зависимость тягового момента от угла поворота, вид которой зависит от конструктивного исполнения электромагнита.

Величина раствора между контактами контактора должна быть порядка 6-8 мм [2], что соответствует углу поворота вала на 8-10 градусов. При такой компоновке электромагнита и заданных габаритных размерах контактора, величины рабочих зазоров в начальном положении могут достигать больших значений, что приводит к уменьшению проводимостей этих зазоров, вследствие чего снижаются тяговые усилия электромагнита.

Для увеличения тяговых усилий при начальных углах поворота якоря в электромагните постоянного тока, целесообразным является установка в рабочих зазорах ферромагнитных шунтов [3,4]. Наличие ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах, однако, приводит к уменьшению тяговых усилий при притяннутом якоря. Применительно к приводным электромагнитам контакторов, это не является недостатком, так как значительное превышение тягового усилия над противодействующим приводит к снижению износостойкости конструкции.

На рис.2 приведены предложенные нами варианты конструкций электромагнитных систем с поперечным движением якоря [5]. Сопоставление тяговых характеристик таких электромагнитных систем, полученных экспериментально с противодействующей характеристикой макетного образца контактора [5] подтверждает целесообразность применения таких технических решений в конструкциях контакторов переменного тока.

Для расчета магнитных систем с поперечным движением якоря ранее нами предлагалось использование комбинированного метода расчета по схеме замещения [1,6]. Данный метод представляет собой сочетание метода дихотомии с методом итераций. Расчет тяговых усилий (моментов) в рабочих зазорах производится по энергетической формуле. При использовании энергетической формулы требуются аналитические выражения определения магнитных про-

проводимостей рабочих воздушных зазоров. Поэтому при использовании комбинированного метода расчета магнитных цепей расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров обычно производится методом укрупненных трубок поля (метод Г. Ротерса), что позволяет получить аналитическую зависимость магнитной проводимости рабочего зазора от его величины. Однако, в случае сложных конфигураций полюсов (при использовании ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах) применение данного метода становится затруднительным.

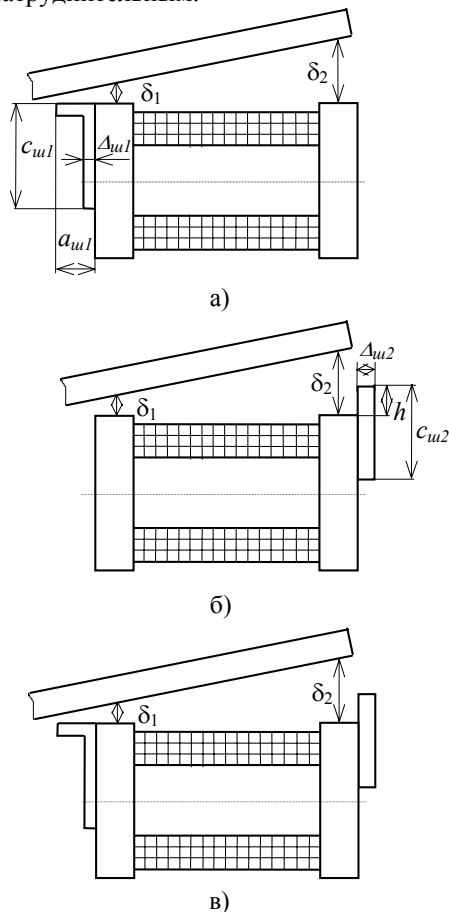


Рис.2 Варианты исполнения конструкции электромагнита с поперечным движением якоря (а – с шунтом в меньшем зазоре, б – с шунтом в большем зазоре, в – с шунтами в двух зазорах)

Основными недостатками расчета магнитной цепи указанными методами является и то, что они основываются на недостаточно строго обоснованных допущениях, а именно:

- формы укрупненных трубок магнитного потока задаются произвольно расчетчиком, что при сложных конфигурациях полюсов (при наличии ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах) может привести к существенным неточностям и как следствие к значительной погрешности вычисления проводимости;
- допущение о равномерности распределения магнитного потока в сечениях деталей магнитопровода и ферромагнитных шунтов;
- допущение о перпендикулярности магнитных силовых линий к поверхности полюсных наконечников,

что в случае насыщения ферромагнитных деталей (участков) не вполне корректно.

Принятие этих допущений в ряде случаев приводит к значительным погрешностям расчета магнитных цепей.

Более корректным и точным методом расчета электромагнитных систем в этом отношении является метод конечных элементов [7,8], в основе которого лежит принцип минимума энергии магнитного поля.

До недавнего времени (80-е годы прошлого века) метод конечных элементов имел ограниченное применение, так как его практическая реализация из-за больших объемов вычислений была возможна лишь при наличии мощных ЭВМ обладающих большим объемом оперативной памяти и высоким быстродействием. Применение данного метода ограничивалась разработкой пользователями небольших программ, позволяющих решать конкретную задачу. Практическая реализация метода конечных элементов в виде универсальных компьютерных программ для расчетов электромагнитных полей, имеющих место в электрических аппаратах, стала возможной благодаря появлению современных быстродействующих ЭВМ.

В настоящее время рядом фирм разработаны специализированные комплексные программы, значительно упрощающие реализацию полевого метода в расчетах электромагнитных механизмов. Примером такой комплексной программы является программа femm, размещенная в Internet на сайте femm.berlios.

Для реализации метода конечных элементов расчетная область, в которой определяется решение, разбивается на объемные (в случае объемных полей) или плоские (в случае плоскопараллельных полей) элементы конечной величины, внутри которых значение магнитного потенциала аппроксимируется кусочно-планарной функцией. Размеры и формы элементов могут изменяться произвольно, а их взаимные соединения не обязательно должны следовать какой-либо регулярной структуре, т.е. сетка из элементов, с помощью которой моделируется внутренняя область задачи, не является регулярной ни геометрически, ни топологически. При выборе размеров и формы элементов следует принимать во внимание ожидаемое распределение плотности энергии в пределах рассматриваемой области. Размеры элементов должны быть минимальными там, где плотность энергии велика, и там где она резко изменяется.

При решении плоских задач чаще всего для разбивки расчетной области используются треугольные элементы, а значение магнитного потенциала аппроксимируется линейной функцией. При решении объемных задач для разбивки расчетной области чаще всего используются тетраэдры.

После разбивки расчетной области на элементы и наложения граничных условий рассчитываются коэффициенты аппроксимации, исходя из минимума функционала, определяющего суммарную запасенную энергию системы при условии стыковки потенциалов в узлах. Вид функционала в случае ферромагнитной среды имеет вид:

$$F(A) = \int_V W(\vec{A}) \cdot dV - \int_V \vec{J} \cdot \vec{A} \cdot dV, \quad (1)$$

где $W(\vec{A})$ - удельная энергия, запасенная системой:

$$W(\vec{A}) = \int \vec{H} \cdot d\vec{B}, \quad (2)$$

где V - объем, занимаемый ферромагнетиком, $\vec{J}$ - вектор плотности тока в катушке электромагнита; $\vec{A}$ - векторный магнитный потенциал.

Вектор магнитной индукции - $\vec{B}$ и вектор напряженности магнитного поля - $\vec{H}$ представляют собой:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}, \quad (3)$$

$$\vec{H} = \nu \cdot \vec{B}, \quad (4)$$

где ν - величина, обратная магнитной проницаемости.

Определяемое в ходе решения задачи методом конечных элементов распределение магнитной индукции, позволяет выявлять в ферромагнитных деталях магнитопровода насыщенные участки, корректировка размеров которых приведет к более эффективному использованию активных материалов.

Целью расчета приводных электромагнитов является получение зависимости электромагнитного момента (M) создаваемого потоками в рабочих зазорах и потоками утечки между якорем и сердечником от угла поворота якоря (α).

В случае плоскопараллельного поля вектор электромагнитной силы, действующей на элементарный участок якоря, может быть определен с помощью формулы Максвелла - по заданному распределению магнитной индукции [9,10], определяемой в ходе решения задачи методом конечных элементов:

$$d\vec{Q} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \left((\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{B} - \frac{1}{2} (B^2) \cdot \vec{n} \right) \cdot d\vec{l}, \quad (5)$$

где $d\vec{Q}$ - вектор электромагнитной силы, действующей на элементарный участок якоря длиной $d\vec{l}$; $\vec{n}$ - вектор внешней нормали к элементарному участку контура интегрирования.

Тогда статический тяговый момент, действующий на элементарный участок якоря в случае плоскопараллельного поля, определится из выражения:

$$d\vec{M} = \vec{h} \times d\vec{Q}, \quad (6)$$

где $\vec{h}$ - радиус-вектор от оси вращения якоря до точки приложения электромагнитной силы действующей на элементарный участок якоря длиной $d\vec{l}$.

Статический тяговый момент, действующий на якорь, находят путем интегрирования выражения (6) по контуру длиной l :

$$\vec{M} = \int_l d\vec{M}. \quad (7)$$

При расчете электромагнитного момента значения магнитной индукции поля необходимо брать со стороны внешней нормали к поверхности якоря. При этом необходимо, чтобы границы контура интегрирования охватывали ферромагнетик, в нашем случае - якорь электромагнита.

В исследуемых нами вариантах исполнения электромагнита в макетном образце контактора [5], которые приведены на рис.1 и рис.2, величины рабочих зазоров в начальном положении якоря составляют $\delta_1=6,5\text{мм}$, $\delta_2=21,5\text{мм}$, что соответствует углу поворота якоря $\alpha=9,8^\circ$, а его основные размеры (в мм) при этом составляют: $a_{ck}=11,5$; $c_{ck}=68$; $e_{ck}=68$; $d_c=32$; $l_c=75$; $a_{\pi}=8$; $l_{\pi}=141$; $e_{\pi}=68$; $l_0=30$. Буквой e обозначены размеры вглубь чертежа электромагнита. Рабочая плоскость якоря смещена относительно оси вращения вала на $c_0=17,5\text{мм}$. Размеры ферромагнитных шунтов (рис.2), с которыми проводились исследования, приведены ниже. Для шунта в меньшем зазоре (в мм.): $c_{u1}=40$; $\Delta_{u1}=3$; $a_{u1}=17$; $e_{u1}=68$. Для шунта в большем зазоре: $c_{u2}=30$; $\Delta_{u2}=8$; $h=10$; $e_{u2}=68$. Материал деталей магнитопровода - сталь 10895. Число витков катушки составляет $w=15500$, диаметр меди обмоточного провода $d_m=0,224\text{мм}$. Марка обмоточного провода - ПЭТ-155 (допустимая температура нагрева - $\theta_{\text{доп}}=155^\circ\text{C}$). Номинальное напряжение питания катушки - $U_n=220\text{В}$.

Поскольку в предложенных вариантах исполнения электромагнита с поперечным движением якоря размер вглубь чертежа электромагнита значительно превышает величины рабочих зазоров - магнитное поле в рабочих воздушных зазорах таких электромагнитов можно считать плоскопараллельным и задачу расчета таких магнитных систем рассматривать как двухмерную.

При решении данной задачи круглый сердечник в реальных конструкциях электромагнита заменяется прямоугольным (рис.3) из условия равенства их площадей поперечного сечения ($S_c=S_{np}$). При известном размере $b_c=b_{\pi}$ размер a_c можно определить по формуле:

$$a_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4 \cdot b_{\pi}}, \quad (8)$$

где d_c - диаметр сердечника.

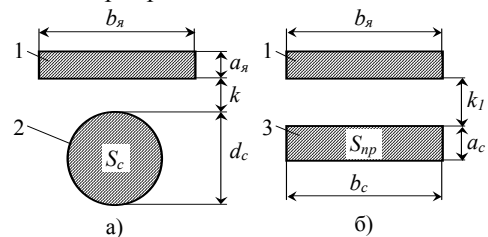


Рис.3 Поперечное сечение якоря и сердечника в электромагните (а - в предложенных вариантах исполнения электромагнита, б - при расчете методом конечных элементов)

Результаты расчета статических тяговых характеристик предложенных нами вариантов исполнения электромагнита с поперечным движением якоря при минимальном значении МДС обмотки ($F_{\text{min}}=1891\text{ А}$ [5]) приведены в табл. 1-4. Также в этих таблицах приводятся результаты экспериментальных исследований, полученных в [5].

Таблица 1

Сопоставление статических тяговых характеристик электромагнита без ферромагнитных шунтов

	Угол поворота якоря, град.					
	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5
Эксперимент	-	6,44	2,53	1,39	0,89	0,63

Расчет МКЭ	41,75	6,15	2,45	1,34	0,85	0,61
Расчет методом участков	38,26	5,93	2,36	1,29	0,82	0,57

Таблица 2

Сопоставление статических тяговых характеристик электромагнита с ферромагнитным шунтом в меньшем зазоре

	Угол поворота якоря, град.					
	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5
Эксперимент	-	7,60	3,15	1,79	1,18	0,84
Расчет МКЭ	38,46	7,18	3,04	1,72	1,11	0,78

Таблица 3

Сопоставление статических тяговых характеристик электромагнита с ферромагнитным шунтом в большем зазоре

	Угол поворота якоря, град.					
	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5
Эксперимент	-	12,71	3,91	2,05	1,26	0,90
Расчет МКЭ	26,86	12,03	3,75	1,98	1,21	0,85

Таблица 4

Сопоставление статических тяговых характеристик электромагнита с ферромагнитными шунтами в двух зазорах

	Угол поворота якоря, град.					
	0,5	2,5	4,5	6,5	8,5	10,5
Эксперимент	-	14,93	5,30	2,73	1,68	1,18
Расчет МКЭ	21,49	14,02	5,19	2,64	1,62	1,13

На рис. 4 и 5 приведено распределение магнитного потока в рассматриваемых вариантах конструкции электромагнита, полученное в результате расчета методом конечных элементов.

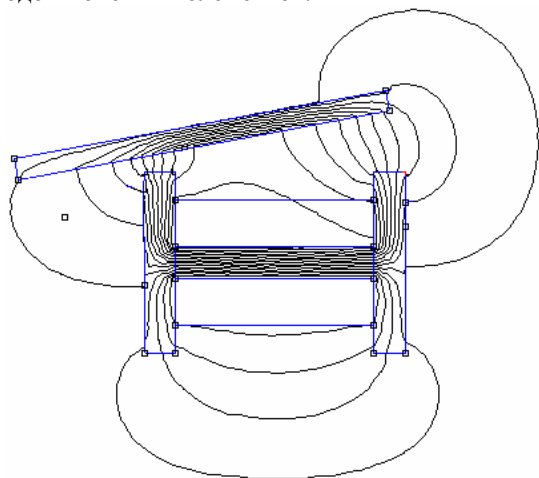


Рис.4 Распределение магнитного потока в электромагните без ферромагнитных шунтов

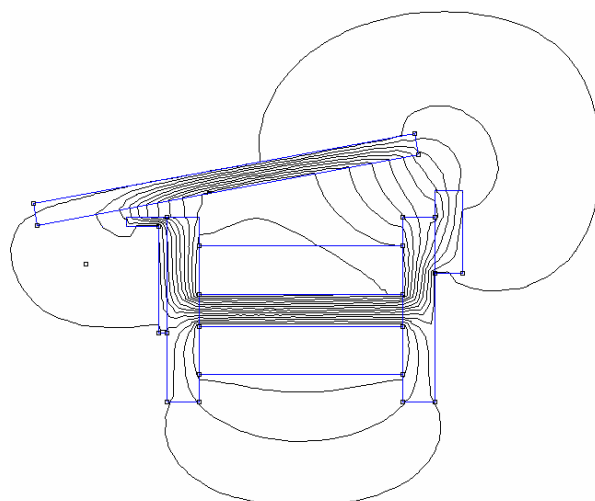


Рис.5 Распределение магнитного потока в электромагните с ферромагнитными шунтами

Увеличенные картины распределения магнитного потока в рабочих воздушных зазорах исследуемых вариантов исполнения электромагнита представлены на рис.6 и рис.7.

Результаты проведенных исследований показывают, что максимальное значение погрешности между результатами расчета методом конечных элементов и экспериментальными данными не превышает 6-7%, что подтверждает обоснованность принимаемого при расчете магнитной системы методом конечных элементов допущения о плоскопараллельности магнитного поля в исследуемых вариантах исполнения электромагнитных систем. Максимальная погрешность расчетов электромагнитной системы с поперечным движением якоря без ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах комбинированным методом с использованием схем замещения не превышает 10%.

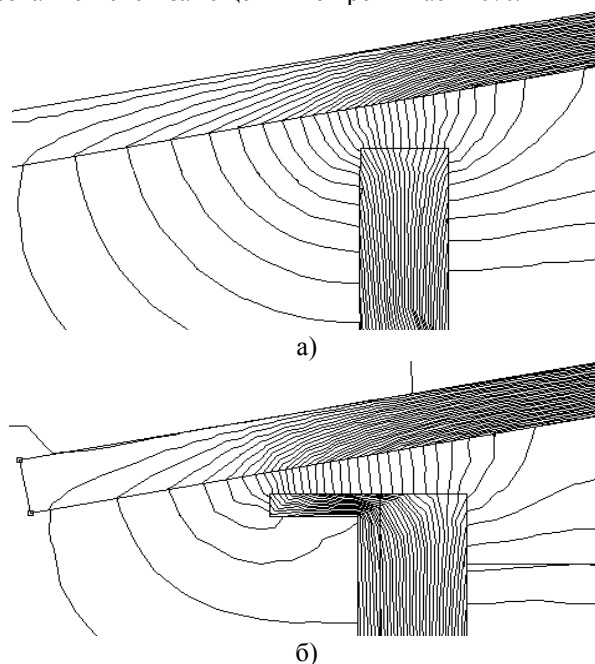


Рис.6 Распределение магнитного потока в меньшем рабочем зазоре электромагнита (а – без ферромагнитного шунта, б – с ферромагнитным шунтом)

Сопоставление результатов расчета электромаг-

нитной системы методом участков (по схеме замещения) и методом конечных элементов свидетельствует о том, что метод конечных элементов является более точным методом расчета рассматриваемых магнитных систем.

Для приводных электромагнитов постоянного тока контакторов характерным является то, что при проектировании таких систем запас по электромагнитной силе (моменту) выбирается с коэффициентом порядка 1,5 и более, что значительно превышает погрешности вычислений при расчете электромагнитных систем предложенными методами. На основании этого можно сделать вывод о том, что предложенные методы расчета исследуемых магнитных систем обеспечивают удовлетворительную для инженерных расчетов точность и могут быть рекомендованы к использованию при проектировании таких электромагнитов.

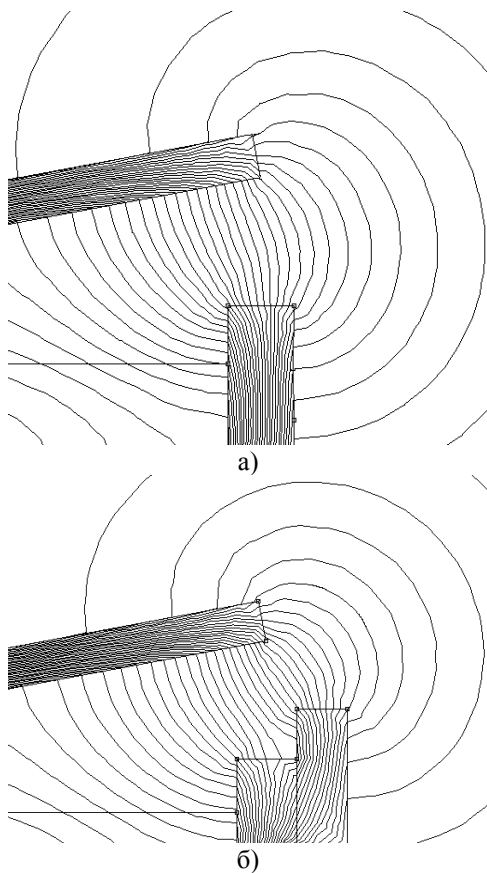


Рис.7 Распределение магнитного потока в большом рабочем зазоре электромагнита (а – без ферромагнитного шунта, б – с ферромагнитным шунтом)

Поскольку при наличии ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах электромагнита применение метода участков становится затруднительным, при выборе и расчете одного из четырех приведенных вариантов исполнения электромагнита (рис.1,2) можно рекомендовать следующий подход:

1. Провести проектный расчет электромагнитной системы с поперечным движением якоря без ферромагнитных шунтов, включающий в себя тепловой расчет обмотки и расчет статической тяговой характеристики

(используя при расчете магнитной системы метод участков), на основании которого определяются основные размеры деталей электромагнита и обмоточные данные его катушки.

2. Сопоставить форму полученной статической тяговой характеристики с противодействующей характеристикой проектируемого аппарата. На основании экспериментальных данных о форме тяговых характеристик, полученных в [5], выбрать, в соответствии с противодействующей характеристикой, вариант исполнения электромагнита.

3. Провести уточненные расчеты выбранного варианта исполнения электромагнита методом конечных элементов и при необходимости скорректировать размеры деталей магнитопровода.

Также следует отметить, что при расчете электромагнитной системы методом конечных элементов может быть определен магнитный поток, приведенный по потокоцеплению. Это позволяет получить зависимости приведенного по потокоцеплению магнитного потока от МДС обмотки электромагнита при различных углах поворота якоря, на основании которых может быть проведен расчет динамических характеристик электромагнита по методике, изложенной в [3].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Б.В., Чепелюк А.А., Форкун Я.Б. Нетрадиционные приводы электромагнитных контакторов постоянного и переменного тока. Материалы междунардн. научн.-техн. конф. UEES'97 (Unconventional electromechanical and electrical systems). В трех частях. Ч. 2.-, 1997.-с.315-320.
- [2] Брон О.Б. Электрическая дуга в аппаратах управления. - М.: ГЭИ, 1954.
- [3] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. - М.: Энергоатомиздат, 1989. –160с.
- [4] Гапоненко Г.Н., Клименко Б.В., Омельченко В.В., Чепелюк А.А. Влияние формы рабочего зазора на тяговые усилия в электромагните с поперечным движением якоря для контактора переменного тока. Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сборник научных трудов ХГПУ. Вып. 6. В четырех частях. Ч. 2.-Харьков: Харьк. гос. политехн. ун-т, 1998.-с.220-223.
- [5] Чепелюк А.А. Экспериментальное исследование влияния формы рабочего зазора на тяговые усилия в электромагните с поперечным движением якоря // Електротехніка і електромеханіка. –2002, №1, с.77-80.
- [6] Гапоненко Г.Н., Клименко Б.В., Омельченко В.В., Форкун Я.Б., Чепелюк А.А. Расчет многоконтурных нелинейных магнитных систем с поперечным якорем. MicroCAD'97. Материалы междунардн. научн.-техн. конф. ч.3.-Харьков, Мишкольц, Магдебург: ХГПУ, МУ, МТУ, с.38-41.
- [7] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
- [8] Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
- [9] А.Г.Никитенко, В.Г. Щербаков, Б.Н. Лобов, Л.С. Лобанова. Математическое моделирование и автоматизация проектирования тяговых электрических аппаратов / Под ред. А.Г. Никитенко, В.Г. Щербакова. М.: Высш. Школа, 1996. 544.

- [10] Пеккер И.И., Никитенко А.Г. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. М.; Энергия, 1967. 168 с.

Поступила 30.06.2003