

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПОПЕРЕЧНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЯКОРЯ И ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ШУНТАМИ В РАБОЧИХ ЗАЗОРАХ

Чепелюк А.А.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-69-76, E-mail: chep@kpi.kharkov.ua

*Проведена оптимізація параметрів електромагнітної системи з поперечним рухом якоря і ферромагнітними шунтами у робочих проміжках, ціллю якої є зменшення витрат обмоткового дроту та покращення інших параметрів запропонованої електромагнітної системи.*

*Проведена оптимизация параметров электромагнитной системы с поперечным движением якоря и ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах, целью которой является уменьшение расхода обмоточного провода и улучшение других параметров предложенной электромагнитной системы.*

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].

Как указывается в [1-3], для увеличения тяговых усилий в таких электромагнитах при начальных углах поворота якоря, целесообразной является установка в рабочих зазорах ферромагнитных шунтов. Проведенные нами в [2,3] исследования свидетельствуют о существенном влиянии ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах исследуемого электромагнита на параметры статической тяговой характеристики (форма характеристики и значение электромагнитного момента). На основании этого были сделаны выводы о целесообразности исследований влияния размеров ферромагнитных шунтов на тяговые характеристики электромагнита с целью оптимизации его параметров.

Эскиз электромагнита с ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах 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 б). 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.

В исследуемом нами электромагните с ферромагнитными шунтами 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:  $a_{ск}=11,5$ ;  $c_{ск}=68$ ;  $v_{ск}=68$ ;  $d_c=32$ ;  $l_c=75$ ;  $a_я=8$ ;  $l_я=141$ ;  $v_я=68$ ;  $l_0=30$ . Буквой  $v$  обозначены размеры вглубь чертежа электромагнита. Рабочая плоскость якоря смещена относительно оси вращения вала на  $c_0=17,5\text{мм}$ . Размеры ферромагнитных шунтов 7 и 8 (в

мм):  $c_{ш1}=40$ ;  $\Delta_{ш1}=3$ ;  $a_{ш1}=17$ ;  $v_{ш1}=68$ ;  $c_{ш2}=30$ ;  $\Delta_{ш2}=8$ ;  $h_{ш}=10$ ;  $v_{ш2}=68$ . Материал деталей магнитопровода – сталь 10895. Число витков катушки  $w=15500$ , диаметр меди обмоточного провода  $d_m=0,224\text{мм}$ . Марка обмоточного провода – ПЭТ-155. Номинальное напряжение питания катушки –  $U_n=220\text{В}$ .

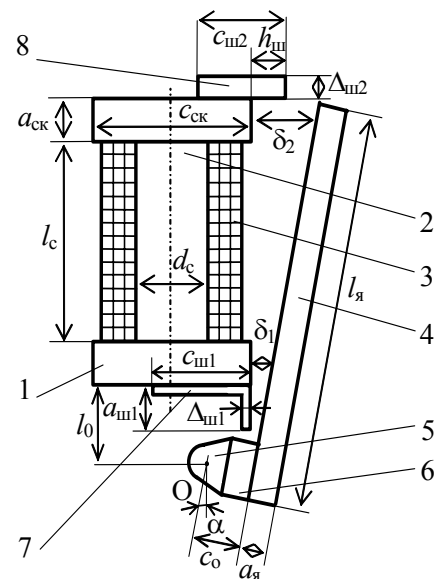


Рис.1. Эскиз электромагнита с поперечным движением якоря с ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах для контактора переменного тока

Основной задачей оптимизационных расчетов проектируемых электромагнитных механизмов является снижение их стоимости при не ухудшении (или улучшении) параметров, определяющих их работу. Параметром, в наибольшей степени влияющим на стоимость исследуемого электромагнита, является масса медного обмоточного провода. При решении поставленной оптимизационной задачи, направленной на снижение расхода обмоточного провода необходимо обеспечить удовлетворительный температурный режим катушки электромагнита и требуемый запас по тяговому усилию на всем протяжении движения якоря. Т.е. в основе решения поставленной оптимизационной зада-

чи лежит задача расчета статических тяговых характеристик исследуемой ЭМС, представляющая собой целый комплекс задач по расчету магнитных полей, а также задача теплового расчета катушки электромагнита.

Для снижения расхода обмоточного провода в исследуемом электромагните целесообразным является первоначально на основании оптимизации размеров ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах минимизировать МДС электромагнитной системы, после чего провести тепловые расчеты катушки электромагнита, целью которых является определение обмоточных данных (диаметра обмоточного провода, числа витков) при минимально возможных размерах окна катушки с которыми обеспечивается удовлетворительный температурный режим катушки и требуемое значение МДС системы. Следует отметить, что минимизация МДС системы приводит также и к снижению потребляемой электромагнитом мощности, что снижает эксплуатационные расходы при эксплуатации контакторов.

В виду того, что МДС намагничивающей обмотки электромагнита постоянного тока определяется исходя из необходимого тягового усилия при начальном положении якоря, а при притяннутом якоре она многократно превышает требуемое значение, минимизацию МДС целесообразнее проводить в начальном положении якоря.

Для расчета ЭМС с поперечным движением якоря, целью которого является получение зависимости электромагнитного момента ( $M$ ), создаваемого потоками в рабочих зазорах и потоками утечки между якорем и сердечником от угла поворота якоря -  $\alpha$  (статической тяговой характеристики), ранее нами предлагалось использование метода конечных элементов [3], в основе которого лежит принцип минимума энергии магнитного поля. Определяемое в ходе решения задачи методом конечных элементов распределение магнитной индукции, позволяет выявлять в ферромагнитных деталях магнитопровода насыщенные участки, корректировка размеров которых приводит к более эффективному использованию активных материалов. В [3] на основании сопоставления расчетных и экспериментальных значений тяговых усилий оценена адекватность двумерной математической модели ЭМС, используемой при расчетах методом конечных элементов.

Как было установлено предварительными расчетами и экспериментальными исследованиями [2,3], в наибольшей степени на параметры тяговой характеристики электромагнитного механизма при начальных положениях якоря влияют следующие параметры ферромагнитных шунтов:

- длина шунта в меньшем рабочем зазоре -  $a_{ш1}$ ;
- высота шунта в большем рабочем зазоре -  $h_{ш}$ ;
- толщина шунта в большем рабочем зазоре -  $\Delta_{ш2}$ .

При оценке влияния этих параметров необходимо учитывать, что тяговой момент на всем протяжении движения якоря должен быть больше противодействующего умноженного на коэффициент запаса.

На рис.2 приведена расчетная зависимость статического тягового момента в начальном положении

якоря от длины ферромагнитного шунта в меньшем рабочем зазоре при фиксированных размерах шунта в большем рабочем зазоре. Анализ данной кривой свидетельствует о том, что увеличение длины ферромагнитного шунта в меньшем рабочем зазоре от 0 до конструктивно обоснованных размеров (20 мм) приводит к увеличению начального тягового момента до 40%, что подтверждает целесообразность его применения в рассматриваемой конструкции электромагнита. Длину этого шунта можно выбрать наибольшей с учетом конструктивных ограничений.

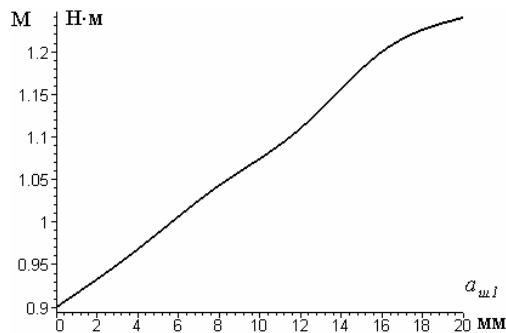


Рис. 2. Зависимость тягового момента в начальном положении якоря от длины ферромагнитного шунта в меньшем рабочем зазоре

На рис.3 представлена расчетная зависимость статического тягового момента в начальном положении якоря от толщины ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре при фиксированных параметрах шунта в меньшем рабочем зазоре. В расчетах минимальная толщина ферромагнитного шунта принималась равной 2 мм, поскольку меньшие ее значения приводят, при действующих в данной конструкции тяговых усилиях, к уменьшению прочностных характеристик шунта.

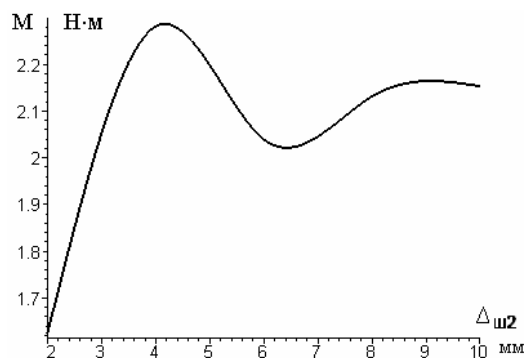


Рис. 3. Зависимость тягового момента в начальном положении якоря от толщины ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре

Анализ полученной зависимости свидетельствует о наличии оптимального значения толщины ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре при увеличенной его высоте (рис.4), при которых достигается максимальное значение начального тягового момента в электромагните. В данном случае оптимальной является толщина ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре 4мм. Статический тяговой момент при этом составляет 2,28 Н·м.

Данные расчетов зависимости начального тягового момента от высоты ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Зависимость начального тягового момента от высоты ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре

$h_{ш}$ , мм	29	31	33	35
$M$ , Н·м	1,845	2,025	1,849	1,466

По данным табл. 1 с использованием метода наименьших квадратов может быть получена аналитическая зависимость начального тягового момента от высоты ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре:

$$M(h_0) = 4,166 \cdot 10^{-5} \cdot h_0^3 - 4,225 \cdot 10^{-2} \cdot h_0^2 + 2,512 \cdot h_0 - 36,5$$

На рис.4 по указанному выражению построена зависимость статического тягового момента от высоты ферромагнитного шунта, а также показаны исходные значения из табл. 1. Анализ функции на экстремум показывает, что при высоте ферромагнитного шунта 31,2 мм начальный электромагнитный момент имеет максимальное значение равное 2,026 Н·м, что в 1,56 раза больше, чем первоначальное значение (табл. 4 [3]).

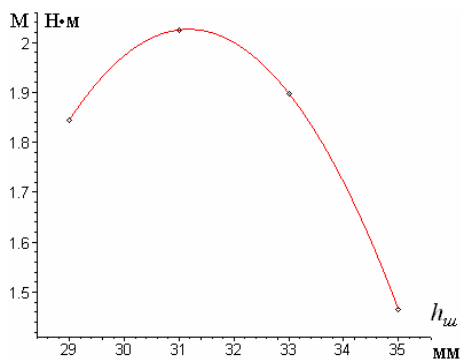


Рис.4. Зависимость начального тягового момента от высоты ферромагнитного шунта в большем рабочем зазоре

Таким образом, на основании анализа расчетных зависимостей на рис.2 - 4 были установлены оптимальные размеры ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах, при которых достигается максимум статического тягового момента при заданной МДС системы.

На рис.5 сопоставлены статические тяговые характеристики базового электромагнита, исследуемого в [2,3] (кривая 1) и электромагнита с оптимальными размерами ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах (кривая 2) с противодействующей характеристикой макетного образца контактора. Из анализа результатов на рис.5 следует, что по сравнению с исходной конструкцией ЭМС при одном и том же значении ампервитков системы в конструкции ЭМС с оптимальными размерами ферромагнитных шунтов в рабочих зазорах начальный тяговый момент увеличивается в 1,87 раза. Такой результат позволяет существенно уменьшить МДС системы.

При окончательном определении МДС электромагнитной системы необходимо исходить из требования технических условий (ГОСТа 11206-93) на контакторы электромагнитные о том, что при напряжении сети равном 0,6 от номинального напряжения

электромагнит контактора срабатывать не должен, т.е., при таком напряжении сети начальный электромагнитный тяговый момент должен быть равен или меньше начального противодействующего момента.

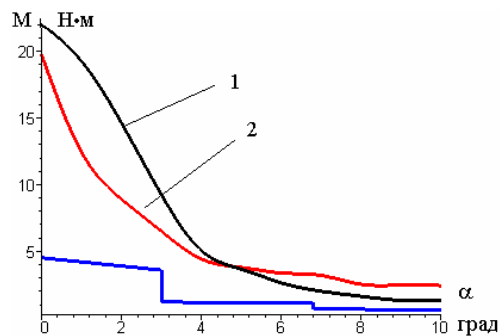


Рис.5. Сопоставление статических тяговых характеристик ЭМС с ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах с противодействующей характеристикой контактора

Определение МДС несрабатывания электромагнита может осуществляться как графоаналитическим, так и численными методами. На рис.6 показан график зависимости начального тягового момента от ампервитков ЭМС и начальный противодействующий момент контактора.

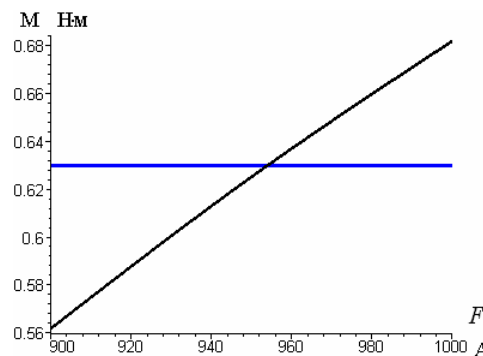


Рис.6. Зависимость начального тягового момента от ампервитков ЭМС и начальный противодействующий момент контактора

Искомое значение МДС несрабатывания электромагнита определяется точкой пересечения характеристик на рис.6 и составляет 955А.

Исходя из этого могут быть определены ампервитки ЭМС при напряжении сети 0,85 от номинального и они составят 1353А, которые и будут в данном случае являться оптимальными (минимальными). При этом значении МДС согласно ГОСТу 11206-93 должно быть четкое срабатывание электромагнита контактора, т.е. статическая тяговая характеристика электромагнита должна проходить на всем ходе якоря выше суммарной противодействующей характеристики контактора. Для проверки этого условия был проведен расчет статической тяговой характеристики электромагнита с оптимальными размерами ферромагнитных шунтов и минимальной МДС, результаты которого приведены в табл.2.

На рис.7 сопоставлены статическая тяговая характеристика оптимального варианта конструкции ЭМС с ферромагнитными шунтами, построенная по данным из табл. 2, и суммарная противодействующая

характеристика макетного образца контактора.

Как следует из рис.7, тяговая характеристика электромагнита проходит выше противодействующей характеристики контактора и характеризуется значительным начальным моментом, что обеспечивает работоспособность оптимального варианта конструкции предложенной ЭМС с ферромагнитными шунтами.

Форма тяговой характеристики хорошо согласуется с формой противодействующей характеристики, что также является положительным фактором. Т.о., за счет оптимизации размеров ферромагнитных шунтов в ЭМС удалось снизить МДС обмотки на 40% по сравнению с базовым вариантом конструкции ЭМС с ферромагнитными шунтами.

Таблица 2

Зависимость тягового электромагнитного момента ЭМС с оптимальными размерами ферромагнитных шунтов и минимальной МДС катушки

$\alpha$ , град	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$M$ , Н·м	16,48	9,42	6,28	4,66	2,74	2,41	2,08	1,92	1,41	1,22	1,32

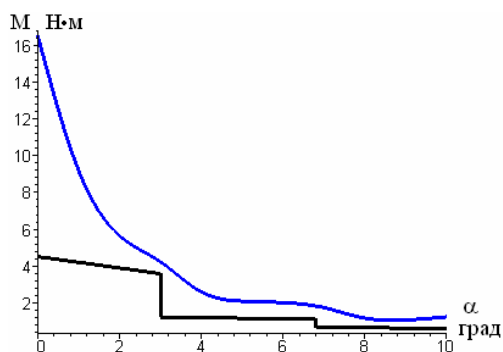


Рис.7. Сопоставление статической тяговой характеристики электромагнита с оптимальными размерами ферромагнитных шунтов и минимальной МДС с противодействующей характеристикой контактора

Оптимизация (минимизация) расхода обмоточного провода в электромагните, как указывалось ранее, может быть проведена на основании тепловых расчетов. В виду того, что длина сердечника, а, следовательно, и высота катушки заложены в исследуемом электромагните конструктивно, целесообразным в данном случае является проведение тепловых расчетов для различных значений диаметров обмоточного провода с целью нахождения минимальной ширины окна намотки катушки. При указанных выше параметрах, расчетное значение МДС должно равняться оптимизированному ранее значению при удовлетворительном температурном режиме катушки.

У базового электромагнита для создания требуемой МДС при конструктивно заложенной максимальной ширине намотки катушки, равной 17мм, среднеобъемная температура нагрева составила 137,3<sup>0</sup>С при условии намотки катушки на сердечник, что требует использования обмоточного провода марки ПЭТ-155 с максимально допустимой температурой нагрева 155<sup>0</sup>С. Недостатком такой катушки является намотка на сердечник (при перегорании катушка подлежит замене вместе с сердечником), а также необходимость использования дорогостоящего обмоточного провода с высоким температурным индексом. В связи с указанными выше недостатками базовой катушки, в ЭМС с оптимизированными параметрами ферромагнитных шунтов и МДС, оптимизируя обмоточные данные, целесообразным является предусмотреть наличие каркаса для намотки катушки и снижение ее температуры, что позволит использовать для изготовления катушки менее дорогой обмоточный провод с меньшим температурным индексом.

При решении указанной оптимизационной задачи тепловые расчеты проводились по обобщенной формуле Ньютона, с использованием обобщенного коэффициента теплоотдачи и поправочных коэффициентов, учитывающих условия теплоотдачи с внутренней поверхности катушки [4].

В результате проведенных тепловых расчетов оптимальные обмоточные данные катушки, намотанной на полиамидный каркас с высотой окна намотки 72мм и внутреннем диаметре намотки 35мм, при ширине ее намотки 13мм составили: диаметр меди обмоточного провода  $d_m=0,18$ мм; число витков обмотки  $w=17880$ . Среднеобъемная температура нагрева такой обмотки составляет 103,4<sup>0</sup>С, что позволяет использовать обмоточный провод марки ПЭТВ с температурным индексом 130<sup>0</sup>С. Масса обмоточного провода катушки - 0,61кг, что на 0,22 кг меньше чем в катушке базового электромагнита. Потребляемая электромагнитом с оптимальными обмоточными данными номинальная мощность составляет 19,8 Вт, что на 12,54 Вт меньше по сравнению с базовым электромагнитом контактора.

Т.о., в результате решения ряда последовательных оптимизационных задач удалось улучшить ряд технико-экономических показателей ЭМС с поперечным движением якоря, а именно за счет оптимального выбора размеров ферромагнитных шунтов в ЭМС удалось существенно уменьшить МДС системы, следствием чего является уменьшение расхода обмоточного провода (на 36%) и снижение температуры нагрева катушки электромагнита, а также существенное уменьшение потребляемой электромагнитом мощности (на 61%).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Б.В., Чепелюк А.А., Форкун Я.Б. Нетрадиционные приводы электромагнитных контакторов постоянного и переменного тока. Материалы междунар. научн.-техн. конф. UEES'97 (Unconventional electromechanical and electrical systems). В трех частях. Ч. 2.-, 1997.-с.315-320.
- [2] Чепелюк А.А. Экспериментальное исследование влияния формы рабочего зазора на тяговые усилия в электромагните с поперечным движением якоря // Электротехника і електромеханіка. –2002, №1, с.77-80.
- [3] Байда Е.И., Чепелюк А.А. Расчет электромагнитных систем с поперечным движением якоря и ферромагнитными шунтами в рабочих зазорах // Электротехніка і електромеханіка. –2003, №3, с.7-11.

- [4] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы электрических аппаратов. Дисс. докт. техн. наук. – Харьков, 1997.

*Поступила 20.03.2005*