

## РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С ОДНОПОЗИЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ НА БАЗЕ ВЫСОКОКОЭРЦИТИВНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Выровец С.В., Чепелюк А.А., к.т.н.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

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

тел. (057) 707-08-64, E-mail: vsv@kpi.kharkov.ua, cher@kpi.kharkov.ua

*Приведені результати розрахунку електромагнітної системи з однопозиційною магнітною защілкою на базі висококоерцитивних постійних магнітів методом кінцевих елементів. Експериментально підтверджено працездатність електромагніта. Задовільна точність розрахунків засвідчила про прийнятність розрахункової моделі.*

*Приведены результаты расчета электромагнитной системы с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов методом конечных элементов. Экспериментально подтверждена работоспособность электромагнита. Удовлетворительная точность расчетов свидетельствует о приемлемости расчетной модели.*

Проведенный в [1] анализ технических решений приводов вакуумных выключателей свидетельствует о том, что на сегодняшний день, остро стоит задача создания надежных и простых в эксплуатации приводов для вакуумных выключателей, наиболее перспективными из которых являются электромагниты постоянного тока с магнитным удержанием, применение которых обеспечивает высокое быстродействие выключателей и приводит к отсутствию потребления электроэнергии во включенном состоянии.

Для решения поставленной задачи в [2, 3] предложена конструкция электромагнита постоянного тока с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов, эскиз которой представлен на рис. 1.

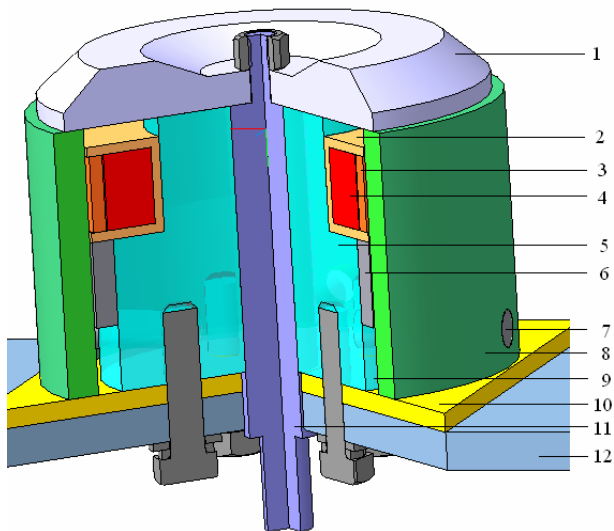


Рис. 1. Эскиз электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов (1 – якорь, 2 – каркас катушки, 3 – отключающая обмотка, 4 – включающая обмотка, 5 – сердечник, 6 – постоянные магниты, 7 – шпилька, 8 – корпус, 9 – воздушный зазор (шунт), 10 – немагнитный фланец, 11 – немагнитный шток, 12 – элемент выключателя для крепления электромагнитной системы)

Срабатывание такого электромагнита происходит при пропускании через включающую обмотку постоянного тока, создающего в рабочем зазоре магнитный поток, действующий согласно с потоком, который создается постоянным магнитом. После притяжения якоря (или несколько ранее) обмотка отключается, и удержание якоря в притянутом положении происходит за счет магнитного поля постоянного магнита.

Для отключения электромагнита через отключающую обмотку кратковременно пропускают ток противоположного направления, в результате чего магнитный поток через рабочий зазор уменьшается, что в свою очередь приводит к уменьшению силы удержания и движению якоря под действием противодействующих сил, создаваемых тарельчатыми контактными пружинами и пружинами поджатия вакуумного выключателя.

Высокого быстродействия при отключении электромагнита добиваются за счет того, что магнитный поток, создаваемый отключающим током вытесняет магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами из области рабочего воздушного зазора в область воздушного шунта 9 (рис. 1), что приводит к более резкому снижению силы удержания [2, 3].

Управление питанием обмоток такого электромагнита осуществляется с помощью специальных систем управления, обеспечивающих импульсный режим работы обмоток (в моменты включения и отключения выключателя). Напряжение, подаваемое на катушки в виде импульса разряда конденсатора, составляет  $U = 380$  В.

Импульсный режим работы обмоток электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой позволяет увеличивать рабочие токи в обмотках без увеличения температуры их нагрева. Благодаря этому расход обмоточного провода в таких электромагнитах и, как следствие, его габариты будут меньшими по сравнению с традиционными электромагнитами постоянного тока, что также, наряду с отсутствием потребления электроэнергии во включенном состоянии, является несомненным достоинством предложенного электромагнита. Также следует отметить, что им-

пульсный режим работы включающей обмотки позволяет реализовать форсированное управление электромагнитом, вследствие чего может быть существенно уменьшено время его включения.

Указанный электромагнитный привод разрабатывался для вакуумных выключателей ранцевого типа ВБ-4Е напряжением 10 кВ на номинальный ток 630 А, в которых используются вакуумные дугогасительные камеры производства концерна АВВ. Противодействующая характеристика такого выключателя, приведенная к ходу якоря, представлена на рис. 2. В исследуемом электромагните величина рабочего зазора (хода якоря) составляет  $\delta = 18$  мм. Противодействующая характеристика состоит из двух участков (на начальном этапе движения якоря (на участке от 18 мм до 6 мм) ему противодействуют только пружины поджатия, а затем (на участке от 6 мм до 0 мм) в противодействие к пружинам поджатия включаются тарельчатые пружины). При полностью притянutom якоря величина противодействующей силы составляет  $Q_{пр} = 6242$  Н.

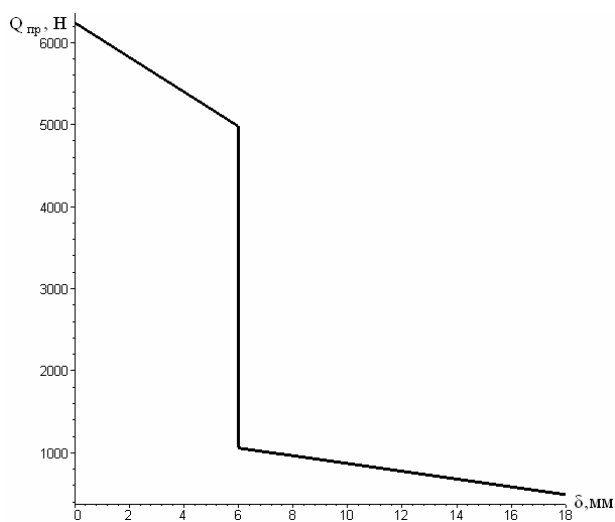


Рис. 2. Приведенная противодействующая характеристика вакуумного выключателя

Надежное удержание якоря электромагнита во включенном состоянии будет обеспечено, если тяговая сила, развиваемая электромагнитом в притянutom положении, будет превосходить противодействующую силу включенного выключателя с определенным запасом.

Надежное срабатывание электромагнита будет обеспечено, если на всем протяжении хода якоря тяговая сила будет превосходить противодействующую силу и иметь определенный запас, т.е. статическая тяговая характеристика будет проходить выше противодействующей характеристики с определенным запасом.

Надежное отключение электромагнита будет обеспечено, если тяговая сила, развиваемая электромагнитом в притянutom положении при отключении, будет меньше противодействующей силы включенного выключателя, причем, для уменьшения собственного времени отключения выключателя, тяговая сила при этом должна быть минимально возможной (что-

бы не препятствовать силам противодействия отключать выключатель).

Проверка указанных выше условий может быть произведена на основании расчета тяговых усилий, развиваемых в исследуемом электромагните во включенном состоянии, при его включении и при его отключении. На основании таких расчетов могут быть определены требуемые размеры и параметры постоянных магнитов и других деталей и участков магнитопровода, а также, требуемые для надежной работы электромагнита, МДС включающей и отключающей обмоток, по которым, при известном напряжении питающей сети, могут быть определены их обмоточные данные.

Для расчета магнитной системы и тяговых усилий, развиваемых в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов, нами предлагается использование метода конечных элементов [4, 5], в основе которого лежит принцип минимума энергии магнитного поля, а саму задачу расчета решать как осесимметричную.

При 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.

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  $\nu$  - величина, обратная магнитной проницаемости.

В случае плоскопараллельного поля вектор электромагнитной силы, действующей на якорь, может быть определен с помощью формулы Максвелла - по заданному распределению магнитной индукции [6, 7], определяемом в ходе решения задачи методом конечных элементов:

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

где  $l$  - длина контура интегрирования;  $\vec{n}$  - вектор внешней нормали к элементарному участку контура интегрирования  $dl$ .

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.

Расчет магнитной системы методом конечных элементов проводился с помощью хорошо себя зарекомендовавшей при решении подобных задач, компьютерной программы femm, размещенной в Internet на сайте femm.berlios. Указанная программа позволяет производить расчет двухмерных и осесимметричных магнитных полей с приемлемой для инженерных расчетов точностью, о чем свидетельствует целый ряд публикаций в научно-технических изданиях последних лет.

Предварительные размеры деталей электромагнита выбирались, исходя из имеющегося для установки электромагнита свободного пространства внутри выключателя, а также с учетом имеющегося сортамента на ферромагнитные материалы из которых будут изготавливаться детали магнитопровода, с целью уменьшения отходов при их обработке.

В расчетной модели магнитной системы исследуемого электромагнита, приведенной на рис. 3 размеры деталей и участков магнитопровода составили (в мм):  $d_{с.вн} = 20$ ,  $d_{с.нар} = 106$  - внутренний и наружный диаметры сердечника;  $d_{я.вн} = 10$ ,  $d_{я.нар} = 137$  - внутренний и наружный диаметры дискообразного якоря;  $\Delta_{узк} = 9$ ,  $\Delta_{ут} = 19$  - высота якоря в узком и в утолщенном местах;  $b_{ут} = 13$  - ширина утолщенного места в якоря;  $d_{к.вн} = 117$ ,  $d_{к.нар} = 139$  - внутренний и наружный диаметры корпуса;  $h_c = h_{кп} = 89$  - высота сердечника и корпуса;  $h_m = 38$ ,  $\Delta_m = 5$  - высота и толщина постоянного магнита;  $h_b = 22$ ,  $\Delta_b = 5,5$  - высота и толщина воздушного шунта (зазора);  $\delta_n = 0,25$  - величина нерабочих воздушных зазоров между постоянным магнитом и сердечником (и корпусом);  $\delta_{ост} = 0,1$  - величина остаточного воздушного зазора между якорем и сердечником (и корпусом);  $h_k = 29$ ,  $a_k = 20,5$  - высота и ширина пространства для установки катушки;  $d_k = 80$  - внутренний диаметр намотки катушки;  $h_{вкл} = 25$ ,  $a_{вкл} = 12,7$  - высота и ширина намотки включающей обмотки;  $h_{откл} = 25$ ,  $a_{откл} = 3,3$  - высота и ширина намотки отключающей обмотки. Материал ферромагнитных деталей электромагнита - сталь 10. Ма-

териал постоянного магнита - композиция Nd-Fe-B с коэрцитивной силой 750 кА/м и остаточной магнитной индукцией 1,07 Тл.

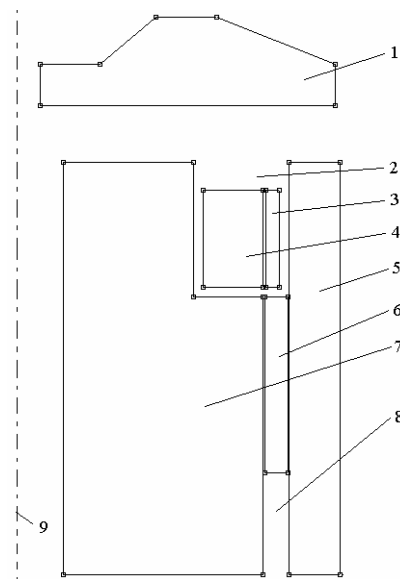


Рис. 3. Расчетная модель магнитной системы электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой (1 - якорь, 2 - пространство для установки катушки, 3 - отключающая обмотка, 4 - включающая обмотка, 5 - корпус, 6 - постоянные магниты, 7 - сердечник, 8 - воздушный зазор (шунт), 9 - ось симметрии магнитной системы)

Для определения высоты постоянного магнита, обеспечивающей необходимую силу удержания якоря в притянутом положении, производились расчеты магнитной системы во включенном состоянии при различных значениях  $h_m$ , на основании чего была построена зависимость тяговой силы от высоты постоянного магнита, которая представлена на рис. 4. Горизонтальной линией на рисунке показано значение противодействующей силы при притяннутом якоря. На

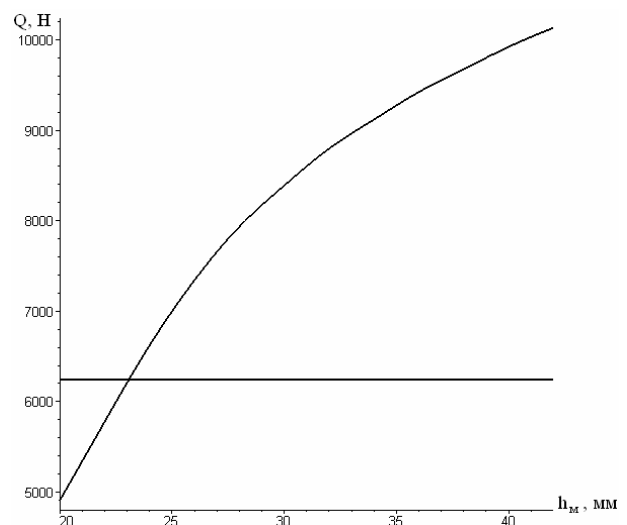


Рис. 4. Зависимость удерживающего тягового усилия от высоты постоянного магнита и противодействующая сила выключателя

основании анализа указанной зависимости была определена высота постоянного магнита  $h_m = 38$  мм. Сила удержания якоря при этом составила 9677 Н, а коэффициент запаса по силе – 1,55, что гарантирует надежное удержания якоря в притяннутом положении.

Для определения требуемой МДС включающей обмотки проводился расчет статических тяговых характеристик при варьируемых значениях МДС включения –  $F_{вкл}$ , которые в дальнейшем сопоставлялись с противодействующей характеристикой вакуумного выключателя. Результаты сопоставления указанных характеристик приведены на рис. 5.

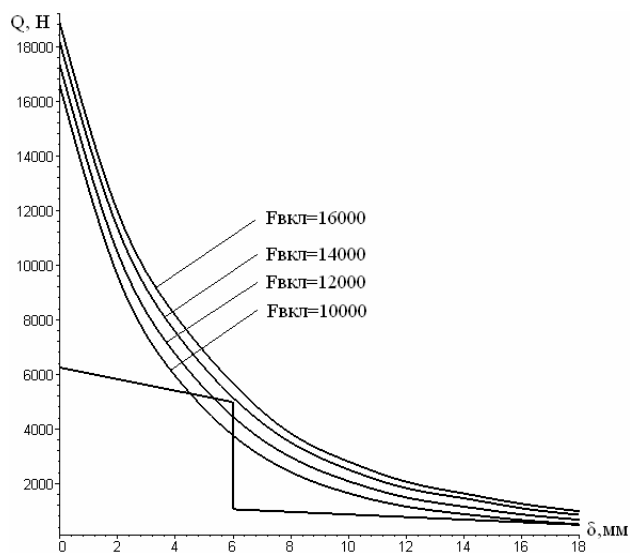


Рис. 5. Сопоставление статических тяговых характеристик электромагнита с противодействующей характеристикой выключателя

На основании анализа данных на рис. 5, с учетом необходимого запаса по тяговой силе, предварительно была определена МДС включающей обмотки электромагнита и она составила  $F_{min} = 14000$  А. На основании имеющегося в электромагните обмоточного пространства и сортамента обмоточных проводов по известной требуемой МДС включающей обмотки были определены обмоточные данные включающей обмотки (марка медного обмоточного провода – ПЭТВ-2; диаметр обмоточного провода –  $d_{вкл} = 0,5$  мм; число витков –  $w_{вкл} = 700$ ; сопротивление обмотки при максимальной температуре нагрева  $40^{\circ}\text{C}$  –  $R_{вкл} = 19$  Ом, минимальное значение МДС обмотки включения  $F_{вкл.min} = 14233$  А). Результаты расчета статической тяговой характеристики при найденном значении МДС обмотки включения ( $F_{вкл.min} = 14233$  А) сведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетная статическая тяговая характеристика электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой

$\delta$ , мм	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
$Q$ , Н	18146	11343	7551	5140	3500	2511	1828	1459	1095	857

На рис. 6 проведено сопоставление расчетной статической тяговой характеристики электромагнита, построенной по данным из табл. 1, с противодействующей характеристикой выключателя. Коэффициент запаса по силе при начальном ходе якоря составляет 1,75, а в момент касания контактов 1,05, что обеспечит надежное срабатывание электромагнита.

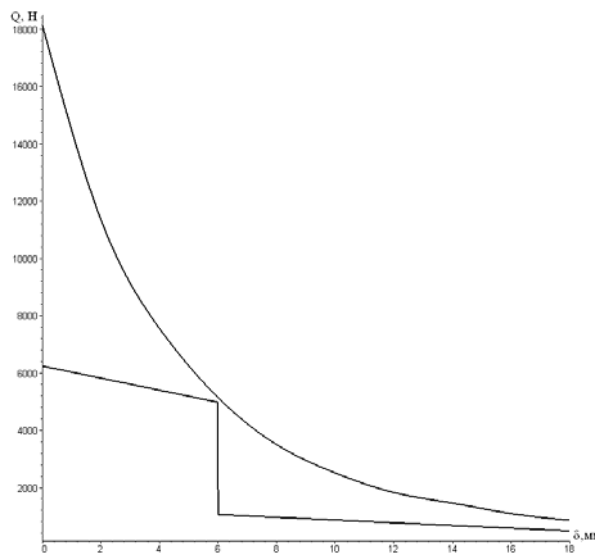


Рис. 6. Сопоставление расчетной статической тяговой характеристики электромагнита с противодействующей характеристикой выключателя

Для определения требуемой МДС отключения проводились расчеты суммарного тягового усилия в притяннутом положении якоря при варьируемых значениях МДС отключения системы, создающих в рабочем зазоре магнитный поток, направленный встречно потоку постоянных магнитов. Результаты этих расчетов представлены в виде графика на рис. 7, где показан также противодействующий момент выключателя во включенном состоянии.

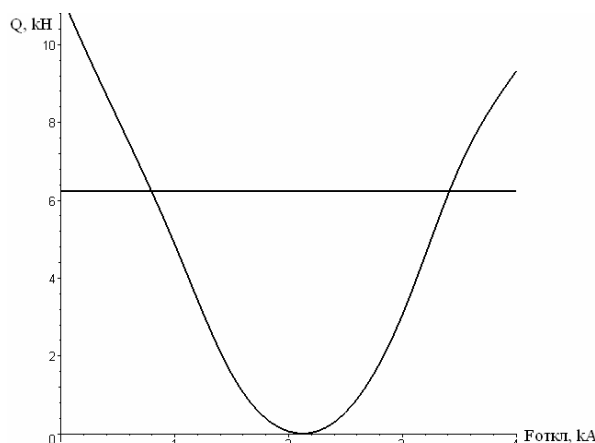


Рис. 7. Зависимость суммарного тягового усилия при притяннутом якоря от МДС отключения и противодействующая сила выключателя

Как следует из рис. 7, минимальное значение суммарного тягового усилия при отключении электромагнита составляет 5 Н при МДС отключения рав-

ной 2113 А. Диапазон ампервитков отключения, в котором тяговая сила меньше или равна противодействующей силе составляет (794 - 3413) А.

С учетом анализа крутизны кривой на рис. 7 может быть выбрано предварительное значение МДС отключения электромагнита являющееся минимальным значением интервала МДС, гарантирующего отключение электромагнита. Окончательное значение МДС отключения может изменяться в небольших пределах и в большую, и в меньшую стороны в зависимости от обмоточных данных (размеров окна намотки обмотки, диаметра обмоточного провода по сортаменту и др.).

На основании имеющегося в электромагните обмоточного пространства и сортамента обмоточных проводов по известной требуемой МДС отключающей обмотки были определены обмоточные данные отключающей обмотки (марка обмоточного провода – ПЭТВ-2; диаметр обмоточного провода –  $d_{откл} = 0,224$  мм; число витков –  $w_{откл} = 970$ ; сопротивление обмотки при максимальной температуре нагрева  $40^{\circ}\text{C}$  –  $R_{вкл} = 152$  Ом, минимальное значение МДС обмотки отключения  $F_{откл.мин} = 2414$  А). Расчетное значение удерживающего усилия при этом составляет  $Q_{сум} = 326$  Н.

По результатам проведенных расчетов был изготовлен макетный образец электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов и проведены его экспериментальные исследования.

Поскольку катушки исследуемого электромагнита работают в импульсном режиме, то не представлялось возможным снять экспериментально величину тягового усилия развиваемого электромагнитом в промежуточных положениях якоря, т.к. это может привести к перегреву обмоток и, как следствие, к выходу их из строя. Поэтому, работоспособность электромагнита проверялась путем его включения-отключения в опытной установке, имитирующей воздействие на электромагнитный привод контактных и отключающих пружин выключателя [3].

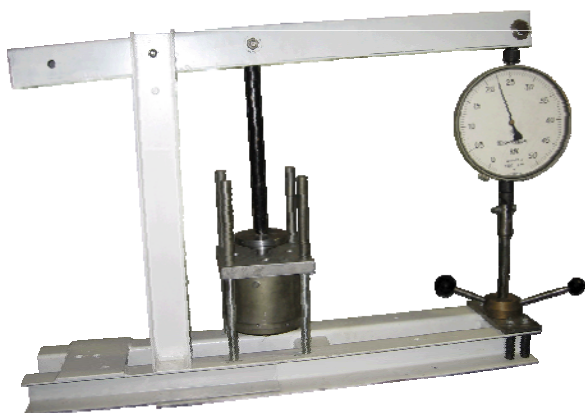


Рис.8. Экспериментальная установка для определения силы отрыва якоря электромагнита

Отрывное усилие в исследуемом электромагните измерялось на экспериментальной установке, пред-

ставленной на рис. 8. Указанная установка была разработана и изготовлена в ЗАО "Кременчугская электротехническая компания "АМПЕР" (Кременчуг).

Погрешность между расчетным ( $Q_{удерж} = 9677$  Н) и экспериментальным ( $Q_{эксп} = 9600$  Н) значениями отрывного усилия не превышает 1-2%, что подтверждает адекватность расчетной модели магнитной системы методом конечных элементов.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный метод расчета исследуемой магнитной системы обеспечивает удовлетворительную для инженерных расчетов точность и может быть рекомендован к использованию при проектировании таких электромагнитов.

2. Изготовленный по результатам расчетов опытный образец электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов является работоспособным.

3. Целесообразным является проведение дополнительных исследований магнитной системы с целью оптимизации параметров исследуемого электромагнита, направленной на улучшение его технико-экономических показателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений // Вестник НТУ "ХПИ". – 2004. – № 42. – С.73 – 80.
- [2] Патент України № 15210 Электромагнітний привод // авт. Клименко Б.В., Вировець С.В., Форкун Я.Б. Опубл.15.06.2006 р., Бюл. №16.
- [3] Клименко Б.В., Гречко А.М., Вировець С.В. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника и электромеханика. – 2006. – № 4. – С. 22 – 26.
- [4] Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
- [5] Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
- [6] 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 с.
- [7] Пеккер И.И., Никитенко А.Г. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. М.; Энергия, 1967. 168 с.

Поступила 18.04.2007