

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ МАГНИТОПРОВОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТА С ОДНОПОЗИЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ

Гречко А.М.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (057) 707-62-81, e-mail: grechko@kpi.kharkov.ua.

Бугайчук В.М.

ООО "АВМ АМПЕР"  
Украина, 39605, Кременчуг, Полтавская обл., ул. Красина, 6  
тел. (05366) 3-30-98, e-mail: info@amper.com.ua.

*Проведені дослідження та розрахунок лінійних розмірів магнітопроводу електромагнітного приводу з однопозиційною магнітною защілкою для вакуумного вимикача середньої напруги.*

*Проведены исследования и расчет линейных размеров магнитопровода электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения.*

### ВВЕДЕНИЕ

Из выпускаемых в Украине вакуумных выключателей с электромагнитным приводом (ЭМП) широкое распространение получили выключатели производства предприятия "Таврида Электрик" [1]. Однако применяемый в работе ЭМП принцип перемагничивания постоянного магнита не позволяет использовать для его изготовления высококоэрцитивных магнитотвердых материалов, что приводит к уменьшению силы удержания ЭМП. Этот факт является существенным недостатком данного ЭМП, так как обеспечение достаточно большого значения силы удержания (и как следствие, силы контактного нажатия) позволяет значительно уменьшить силу сваривания контактов вакуумной дугогасительной камеры (ВДК), уменьшить разъединяющее усилие и компенсировать силу отброса контактов при протекании больших сквозных токов короткого замыкания, что существенно повышает электродинамическую стойкость, отключающую способность и надежность работы вакуумного выключателя в целом [2, 3].

Для вакуумных выключателей с ЭМП, выпускаемых ООО "АВМ АМПЕР" (г. Кременчуг), в качестве приводного механизма разработана новая конструкция электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой, принцип работы которого подробно рассмотрен в [4-6]. В данных выключателях установлены три малогабаритных ЭМП отдельно на каждую фазу, а подвижные части электромагнитов механически соединены между собой через синхронизирующий вал. Удержание ЭМП (и выключателя) во включенном положении происходит за счет магнитного потока, создаваемого постоянными магнитами на основе редкоземельных металлов (NdFeB) с высокой удельной энергией и коэрцитивной силой, а в отключенном – за счет действия отключающей пружины.

Данная конструкция ЭМП позволяет обеспечить необходимые операционные механические функции вакуумного выключателя, а именно: надежное и стабильное включение с нормированными параметрами; надежная фиксация выключателя в обоих крайних положениях; ручное неоперативное отключение.

Малые габаритные размеры каждого ЭМП позволяют уменьшить величину индуктивности магнитной системы и снизить значение вихревых токов в магнитопроводе, и, как следствие, значительно уменьшить время переключения вакуумного выключателя. Также в конструкции выключателя был применен принцип соосности ЭМП и ВДК, что позволило уменьшить механические нагрузки в узлах приводов и значительно увеличить как надежность работы, так и срок службы выключателя в целом.

При изготовлении опытных образцов ЭМП для вакуумных выключателей были применены результаты исследований и расчетов, а также учтены рекомендации, предложенные в данной работе и позволяющие в приемлемые сроки и с достаточной для инженерной практики точностью определить линейные размеры магнитопровода при заданных габаритных размерах и требуемом значении силы удержания якоря.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью расчета является определение линейных размеров участков магнитопровода (сердечника, корпуса и якоря), при которых обеспечиваются минимальные массогабаритные показатели ЭМП, максимальная сила удержания при обесточенных катушках при одновременном отсутствии насыщения участков магнитной системы электромагнита.

Приведенный далее расчет линейных размеров магнитопровода является предварительным и дает возможность построить начальную расчетную модель ЭМП в программе Femm [7]. После построения модели следует произвести корректировку линейных участков магнитопровода, в которых наблюдается насыщение магнитной системы. Для повышения быстродействия ЭМП необходимо уменьшить массу подвижных частей (якоря и немагнитного штока). Для увеличения силы удержания следует скорректировать величину площади поперечного сечения сердечника и корпуса в области воздушных рабочих зазоров в сторону обеспечения значения магнитной индукции в диапазоне, близкой к индукции насыщения ( $B = 1,9-2,0$  Тл).

**Предварительный выбор размеров сердечника и корпуса.** Значение диаметра немагнитного штока, а значит и значение внутреннего диаметра проходного отверстия сердечника  $d_{c1}$  (рис. 1), следует выбирать исходя из:

- наружного диаметра тягового механизма вакуумного выключателя, передающего тяговое усилие от ЭМП на контакты ВДК;
- механической прочности штока, зависящей от противодействующей характеристики выключателя;
- шкалы диаметров прутков стали, которая используется для изготовления штока.

Исходя из экспериментальных исследований и опыта эксплуатации различных типов конструкций ЭМП, рекомендуется выбирать значение  $d_{c1}$ , руководствуясь эмпирической зависимостью (рис. 2; пунктиром показано допустимое варьирование величины диаметра  $d_{c1}$ ).

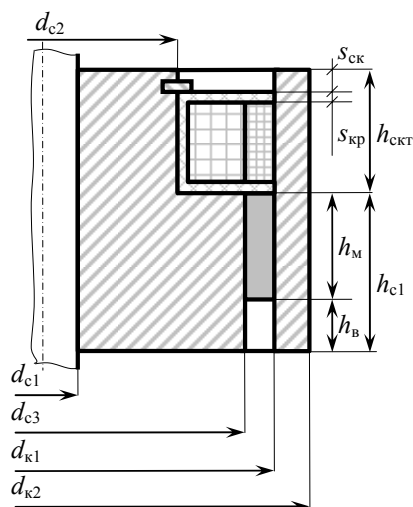


Рис. 1. Линейные размеры неподвижной части магнитопровода ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой

Значение наружного диаметра корпуса  $d_{c2}$  выбирается, исходя, с одной стороны, из сортамента выпускаемого круглого проката стали 10895 [8], с другой стороны – из требуемых по техническому заданию (ТЗ) максимальных габаритных размеров ЭМП, так как по ТЗ требовалось установить ЭМП в вакуумный выключатель с минимальным межполюсным расстоянием в 150 мм. Для размещения узлов и деталей выключателя между ЭМП, а также для исключения влияния магнитного поля, создаваемого в процессе работы одним ЭМП на характеристики соседнего ЭМП, максимальное значение наружного диаметра корпуса по ТЗ не должно было превышать 110 мм. Согласно [8], ближайшее меньшее значение выпускаемого круглого проката составляет 100 мм, а с учетом припуска на механическую обработку значение наружного диаметра корпуса  $d_{c2}$  было принято равным 99 мм. Также согласно ТЗ заказчика проектируемый ЭМП должен был обеспечить силу удержания с учетом минимального коэффициента запаса ( $k_f = 10\%$ ) в 3,5 кН, так как установка ЭМП планировалась в вакуумный выключатель с отключающей способностью в 31,5 кА. Связь двух указанных параметров подробно описана в [3, 4, 9].

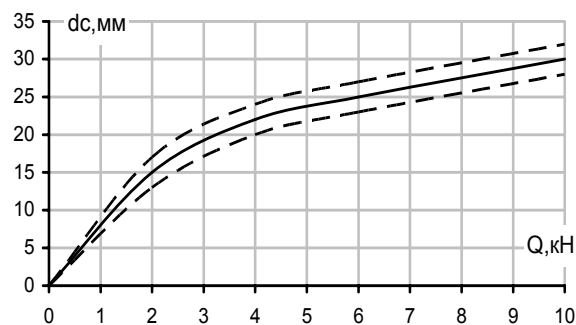


Рис. 2. К определению внутреннего диаметра проходного отверстия сердечника  $d_{c1}$ . Здесь:  $Q$  – сила удержания ЭМП

Так как разрыв контактов ВДК по ТЗ составляет 8 мм, а величина контактного нажатия на один полюс 3,5 кН, то, учитывая механические характеристики применяемых тарельчатых пружин, величина провала контактов принималась равной 4 мм. Так как в выключателе был применен принцип соосности ЭМП и ВДК, то ход подвижной части магнитопровода должен соответственно составлять 12 мм.

Известно, что для расчета электромагнитной тяговой силы, в случае, когда расстояние между плоскими одинаковыми параллельными торцами двух полюсов намного меньше линейных размеров их поперечного сечения, может быть использована формула Максвелла [10, 11]:

$$S_{\delta} = \frac{2 \cdot \mu \cdot Q}{B_{\delta}^2}, \quad (1)$$

где  $B_{\delta}$  – магнитная индукция в рабочем зазоре;  $S_{\delta}$  – эквивалентное сечение воздушного зазора;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха ( $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м).

Также известно, что величина магнитной индукции насыщения материала магнитопровода в современных магнитомягких материалах равна примерно 2 Тл, а соответствующее такой индукции значение силы удержания составляет 16 кг/см<sup>2</sup> [12].

Проведя экспериментальные исследования различных типов конструкций предлагаемой конструкции ЭМП, отличающиеся наружным диаметром корпуса  $d_{c2}$  (99, 119 и 139 мм) и, соответственно, пропорциями линейных размеров магнитопровода, рекомендуется предварительно принять равными значения сечений рабочих воздушных зазоров  $S_c$  (в области сердечника и якоря) и  $S_k$  (в области корпуса и якоря):

$$S_c = S_k \quad (2)$$

Учитывая, что  $S_c + S_k = S_{\delta}$ , получаем:

$$\begin{cases} S_c = S_k \\ S_c + S_k = S_{\delta} \end{cases} \quad (3)$$

Требуемой по ТЗ силе удержания  $Q = 3,5$  кН соответствует (рис. 2) значение  $d_{c1} = 20$  мм; значение  $d_{c2}$  принято равным 99 мм. Тогда:

$$\begin{aligned} d_{c2} &= \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\delta}}{\pi} + d_{c1}^2} \\ d_{k1} &= \sqrt{d_{k2}^2 - \frac{4 \cdot S_{\delta}}{\pi}} \end{aligned} \quad (4)$$

В ЭМП постоянные магниты располагаются в зазоре между сердечником с диаметром  $d_{c3}$  и корпусом с диаметром  $d_{k1}$ . С целью увеличения коэффициента за-

полнения постоянными магнитами данного зазора ширину постоянного магнита  $a_m$  рекомендуется выбирать минимальной. Учитывая технологию производства и механические характеристики постоянного магнита величина  $a_m$  была принята равной 5 мм. Тогда:

$$d_{c3} = d_{k1} - 2 \cdot a_m - 2 \cdot (s_{mc} + s_{mk}), \quad (5)$$

где  $s_{mc}$ ,  $s_{mk}$  – технологические зазоры между постоянным магнитом и сердечником ( $s_{mc}$ ) и корпусом ( $s_{mk}$ ). Принимаем  $s_{mc} = s_{mk} = 0,25$  мм.

Ширина обмоточного окна катушки  $a_{кт}$  с учетом толщины каркаса ( $s_{кр} = 2$  мм) и зазора для укладки монтажных проводов ( $\Delta = 2$  мм) равна:

$$a_{кт} = 0,5 \cdot (d_{k1} - d_{c2}) - s_{кр} - \Delta \quad (6)$$

Предварительно принимаем высоту обмоточного окна катушки  $h_{кт}$  равную ее ширине  $a_{кт}$ . Окончательно значение  $h_{кт}$  будет установлено при определении требуемой МДС включения и отключения ЭМП.

Высоту участка сердечника  $h_{скт}$  с диаметром  $d_{c2}$  в области установки катушки с учетом толщины стопорного кольца для фиксации катушки и технологического зазора для получения паза под стопорное кольцо ( $s_{ск}$ ) принимаем равной:

$$h_{скт} = h_{кт} + 2 \cdot s_{ск} + s_{ск} \quad (7)$$

Высота выступа сердечника  $h_{c1}$  с диаметром  $d_{c3}$  определяется исходя из высоты постоянного магнита  $h_m$ , которая, в свою очередь, выбирается согласно требуемой по ТЗ силе удержания; предварительно задаем произвольным значением  $h_m$ . При построении расчетной модели ЭМП высота постоянного магнита корректируется до величины, при которой обеспечивается необходимая сила удержания при отсутствии насыщения участков магнитной системы. Поскольку такое изменение высоты постоянного магнита не влияет на изменение полученных ранее линейных размеров магнитопровода, то нет необходимости в проведении повторного расчета данных размеров. С учетом высоты воздушного шунта  $h_b = 10$  мм, получаем:

$$h_{c1} = h_m + h_b \quad (8)$$

**Предварительный выбор размеров якоря.** При определении размеров якоря необходимо исходить из следующих соображений:

- высота якоря должна обеспечивать необходимую механическую прочность;
- значение наружного диаметра якоря не должно превышать значение наружного диаметра корпуса  $d_{k2}$ ;
- значение магнитной индукции в якоре не должно превышать 2 Тл;
- для повышения быстродействия электромагнита необходимо обеспечить минимальную массу якоря.

Исходя из этого, предварительно принимаем форму якоря с прямоугольным поперечным сечением (рис. 3) со следующими линейными размерами:

- наружный диаметр якоря  $d_{я2}$  равен наружному диаметру корпуса  $d_{k2}$  и составляет 99 мм;
- внутренний диаметр якоря  $d_{я1}$  выбирается в зависимости от большего наружного диаметра немагнитного штока  $d_{ш1}$ , который с учетом технологии изготовления по скользящей посадке приблизительно равен внутреннему диаметру проходного отверстия сердечника  $d_{c1}$  (20 мм). При установке якоря на опорную поверхность штока необходимо обеспечить достаточную

площадь соприкосновения штока и якоря  $S_{\Deltaя}$  для надежной фиксации последнего, так как при срабатывании электромагнита возникает механический удар якоря о неподвижную часть магнитопровода.

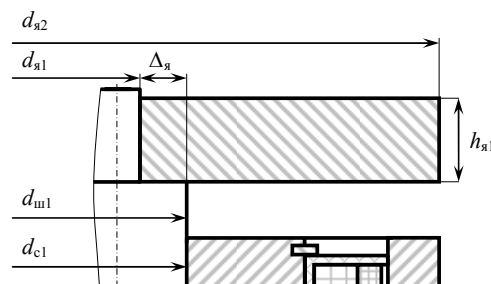


Рис. 3. К определению предварительных размеров якоря

Из экспериментальных исследований установлено, что отношение диаметров штока и якоря находится в пределах  $d_{ш1} / d_{я1} \approx 2 \div 3$ . Тогда:

$$S_{\Deltaя} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ш1}^2 - d_{я1}^2) \quad (9)$$

- высота якоря  $h_{я1}$  выбирается в зависимости от механической прочности и предварительно принимается равной 6 мм. После построения расчетной модели в случае насыщения магнитной системы необходимо произвести корректировку высоты якоря.

**Моделирование магнитной системы ЭМП в программе Femm.** Исходные данные для построения расчетной модели ЭМП получены по (1-9). Решение осесимметричной задачи методом конечных элементов (КЭ) в программе Femm дало следующие результаты:

- общая сила удержания ЭМП:  $Q = 2100,0$  Н;
- сила удержания в рабочих зазорах:  
 $Q_{\delta1} = 1075,7$  Н;  $Q_{\delta2} = 986,6$  Н;
- среднее значение индукции в рабочих зазорах:  
 $B_{\delta1} = 1,59$  Тл;  $B_{\delta2} = 1,54$  Тл;
- среднее значение потока через рабочие зазоры:  
 $\Phi_{\delta1} = 1,70$  мВб;  $\Phi_{\delta2} = 1,61$  мВб.

Анализ картины магнитного поля показал, что на отдельных участках ЭМП наблюдается насыщение магнитопровода, а значит, увеличение на данном этапе высоты постоянного магнита не приведет к существенному увеличению силы удержания. Поэтому следующим этапом проектирования является корректировка линейных размеров магнитопровода с целью увеличения силы удержания путем снижения индукции в насыщенных участках (корпус и якорь ЭМП) и увеличения индукции в ненасыщенных участках (рабочие зазоры) до значения 2 Тл.

#### Корректировка линейных размеров корпуса.

Проанализировав картину распределения магнитного поля в корпусе и, исходя из невозможности увеличения по ТЗ наружного диаметра  $d_{k2}$ , рекомендуется снижение магнитной индукции в корпусе до значения 2 Тл добиться путем увеличения площади поперечного сечения корпуса в осевом направлении, то есть, уменьшая внутренний диаметр  $d_{к1}$ . Результат корректировки линейных размеров корпуса показан на рис. 4.

Оптимальным с точки зрения значения силы удержания является значение  $d_{к1} = 90$  мм, так как при больших значениях диаметра корпуса наблюдается насыщение магнитопровода.

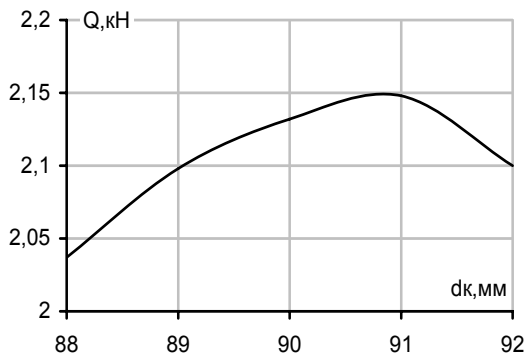


Рис. 4. Результаты корректировки внутреннего диаметра корпуса  $d_{к1}$  ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой

#### Корректировка линейных размеров якоря.

Анализ картины магнитного поля в якоре позволяет сделать вывод о неравномерности распределения магнитной индукции по сечению якоря (1,1-2,2 Тл). Поэтому рекомендуется корректировать высоту якоря не равномерно по всей ширине, а увеличивать отдельные участки (рис. 5), незначительно увеличивая массу якоря и уменьшая высокое значение индукции в зоне соприкосновения якоря и сердечника.

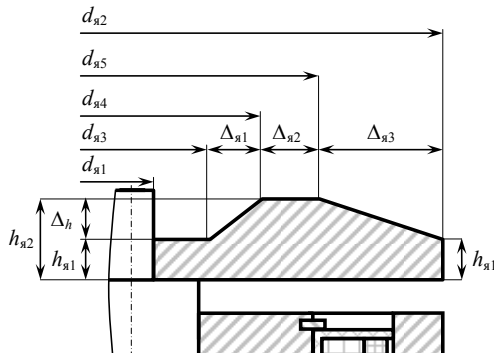


Рис. 5. Корректировка линейных размеров якоря

При корректировке линейных размеров якоря необходимо исходить из следующих соображений:

- высота якоря  $h_{я1}$  должна быть достаточной для обеспечения механической прочности; рекомендуется для данного ЭМП принять  $h_{я1} = 6$  мм;
- высота якоря  $h_{я2}$  ограничивается сверху габаритами ЭМП для возможности его установки в корпус выключателя. Высота якоря  $h_{я2}$  по ТЗ не должна превышать 15 мм;
- наружный диаметр якоря  $d_{я2}$  не должен превышать значение наружного диаметра корпуса  $d_{к2}$  (99 мм), но допускается изменение в меньшую сторону;
- значение магнитной индукции в якоре не должно превышать 2 Тл;
- для повышения быстродействия ЭМП необходимо обеспечить минимальную массу якоря.

Целью корректировки размеров якоря является увеличение силы удержания и исследование влияния характерных участков ( $\Delta_h$ ,  $\Delta_{я1}$ ,  $\Delta_{я2}$ ,  $\Delta_{я3}$ ), и наружного диаметра якоря  $d_{я2}$  на значение данной силы. Исследование и корректировка размеров якоря проводились при построении расчетной модели в программе Femm. Благодаря относительной простоте выполняемых операций было проведено значительное количество перестроений линейных размеров якоря с вычислением на каждом этапе силы удержания, магнитной индукции в рабочих

зазорах и массы якоря. На основании результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

- наибольшее влияние на величину силы удержания оказывает величина  $\Delta_h$ , при окончательном выборе которой необходимо руководствоваться с одной стороны минимальным значением массы якоря, с другой – отсутствием насыщения, особенно в области рабочих зазоров. В результате  $\Delta_h$  было принято равным 6 мм, так как при меньших значениях наблюдалось насыщение якоря, при больших – неоправданное увеличение массы якоря с точки зрения незначительного увеличения силы удержания ЭМП (0,5%);

- изменение значений  $\Delta_{я1}$ ,  $\Delta_{я2}$ ,  $\Delta_{я3}$  не оказывает существенного влияния на силу удержания при фиксированном значении  $\Delta_h$ . Изменение силы удержания при  $\Delta_h = 6$  мм составило от 2452,2 Н до 2560,5 Н;

- так как величины варьируемых параметров лежат в пределах нескольких миллиметров, то при их изменении масса якоря изменялась незначительно; максимальное значение составило 0,7 кг.

#### Результаты расчета:

- общая сила удержания ЭМП:  $Q = 2547,4$  Н;
- сила удержания в рабочих зазорах:  
 $Q_{\delta 1} = 1427,2$  Н;  $Q_{\delta 2} = 1086,3$  Н;
- среднее значение индукции в рабочих зазорах:  
 $B_{\delta 1} = 1,83$  Тл;  $B_{\delta 2} = 1,43$  Тл;
- среднее значение потока через рабочие зазоры:  
 $\Phi_{\delta 1} = 1,96$  мВб;  $\Phi_{\delta 2} = 1,91$  мВб.

После корректировки линейных размеров корпуса и якоря и анализа результатов расчета можно сделать следующие выводы:

- корректировка линейных размеров якоря позволила увеличить силу удержания ЭМП при незначительном увеличении массы якоря по сравнению с якорем прямоугольного сечения; на данном этапе нет необходимости в повторной корректировке размеров корпуса, так как изменение формы якоря практически не повлияло на значение индукции в корпусе;
- после корректировки якоря возникает участок в сердечнике (область установки катушки) с высоким значением индукции более 2 Тл, что требует корректировки линейных размеров сердечника.

**Корректировка линейных размеров сердечника** заключается в уменьшении значения индукции путем увеличения площади поперечного сечения сердечника в осевом направлении. Так как диаметр  $d_{с1}$  был выбран исходя из развиваемой ЭМП силы удержания, то варьируемым параметром для снижения магнитной индукции в сердечнике до значения 2 Тл будет являться диаметр  $d_{с2}$ . Результат корректировки диаметра сердечника  $d_{с2}$  показан на рис. 6. С точки зрения развиваемой ЭМП силы удержания и величины индукции оптимальным является значение  $d_{с2} = 50$  мм, так как дальнейшее увеличение диаметра сердечника не приводит к существенному росту силы удержания – наблюдается даже незначительное уменьшение.

При изменении диаметра сердечника  $d_{с2}$  увеличилась индукция в корпусе. Поэтому рекомендуется повторно произвести увеличение площади поперечного сечения корпуса, уменьшая внутренний диаметр  $d_{к1}$  до достижения индукцией значения 2 Тл. Результат корректировки диаметра корпуса  $d_{к1}$  показан на рис. 7.

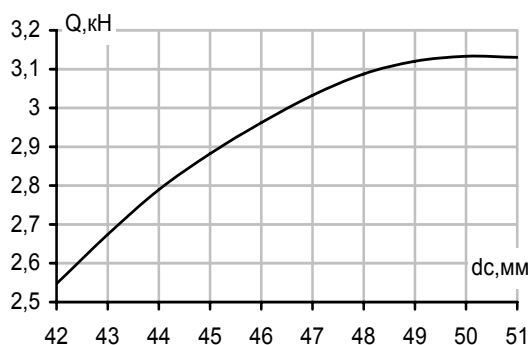


Рис. 6. Зависимость силы удержания от  $d_{c2}$

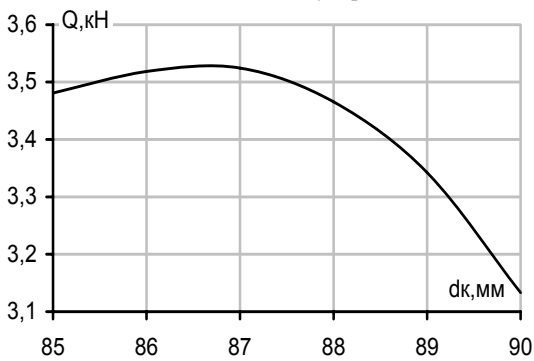


Рис. 7. Зависимость силы удержания от  $d_{k1}$

С точки зрения силы удержания и индукции оптимальным является значение  $d_{k1} = 87$  мм, так как дальнейшее уменьшение диаметра корпуса не приводит к увеличению силы удержания ЭМП.

Проанализировав влияние высоты участка сердечника в области установки катушки  $h_{скт}$  (предварительно равна 30 мм), можно сделать вывод о целесообразности уменьшения данного участка с целью снижения расхода материала магнитопровода, при этом учитывая следующие ограничения:

- нижнее значение  $h_{скт}$  ограничивается минимальной высотой обмоточного окна катушки  $h_{кт}$ , которая с учетом технологии изготовления равна 10 мм;
- отсутствие насыщения участков магнитопровода.

Проведенный расчет позволяет сделать вывод, что высота сердечника  $h_{скт}$  практически не влияет на величину индукции в ЭМП, но при значении  $h_{скт}$  менее 24 мм наблюдается насыщение в области рабочего зазора между сердечником и якорем. Поэтому для расчетов принимаем:  $h_{скт} = 24$  мм;  $h_{кт} = a_{кт} = 15$  мм.

*Результаты расчета:*

- общая сила удержания ЭМП:  $Q = 3675,6$  Н;
- сила удержания в рабочих зазорах:  $Q_{\delta 1} = 1941,3$  Н;  $Q_{\delta 2} = 1697,7$  Н;
- среднее значение индукции в рабочих зазорах:  $B_{\delta 1} = 1,72$  Тл;  $B_{\delta 2} = 1,56$  Тл;
- среднее значение потока через рабочие зазоры:  $\Phi_{\delta 1} = 2,84$  мВб;  $\Phi_{\delta 2} = 2,73$  мВб.

Анализируя результаты расчета в рабочем зазоре между корпусом и якорем, можно сделать вывод о возможности увеличения силы удержания ЭМП путем увеличения значения магнитной индукции.

С целью определения максимальной силы удержания ЭМП при заданных габаритных размерах, фиксированной высоте постоянного магнита  $h_m$  (20 мм) проведем исследование по определению зависимости силы удержания и индукций в рабочих зазорах от зна-

чения наружного диаметра якоря  $d_{я2}$  при фиксированных значениях: внутреннего  $d_{к1}$  (87 мм) и наружного  $d_{к2}$  (99 мм) диаметров корпуса, и наружного диаметра сердечника  $d_{с2}$  (50 мм).

Обозначим разность между наружными диаметрами якоря и корпуса как  $\Delta_{кя} = 0,5 \cdot (d_{к2} - d_{я2})$ . По результатам исследований построены зависимости силы удержания от величины  $\Delta_{кя}$  (рис. 8), на основании которых можно заключить:

- величина  $\Delta_{кя}$  при притянтом якоре существенно влияет на силу удержания (максимальное увеличение составляет 5,7%);
- значение  $\Delta_{кя} = 1,5$  мм является оптимальным с точки зрения величин силы удержания и индукции в рабочих зазорах.

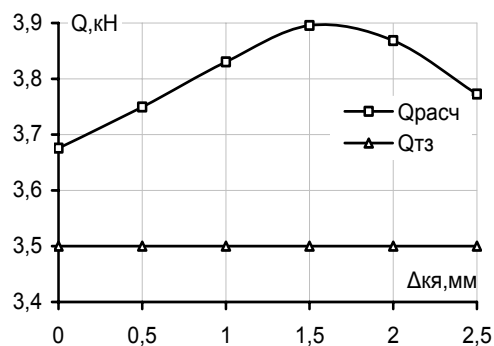


Рис. 8. Зависимость силы удержания ЭМП от разности между наружными диаметрами якоря и корпуса  $\Delta_{кя}$

После проведенных корректировок линейных размеров якоря, сердечника и корпуса, в результате которых магнитная индукция в магнитопроводе не превышает значения индукции насыщения в 2 Тл, сила удержания ЭМП равна 3895,6 Н, что удовлетворяет требуемому по ТЗ значению силы удержания ( $k_f = 19\%$ ).

В случае если корректировка линейных размеров магнитопровода не привела к требуемой силе удержания, необходимо изменить размеры либо материал постоянных магнитов. Для определения зависимости силы удержания ЭМП от линейных размеров и характеристики постоянных магнитов были проведены исследования, результаты которых приведены ниже в виде графиков (рис. 9-12). Анализ зависимостей на рис. 9-10 показывает, что сила удержания зависит как от высоты  $h_m$ , так и от ширины  $a_m$  постоянного магнита. Для увеличения коэффициента заполнения постоянными магнитами зазора между сердечником и корпусом рекомендуется выбирать ширину постоянных магнитов, исходя из минимально допустимой с точки зрения технологии производства и механических характеристик ширины постоянного магнита (принимаем  $a_m = 5$  мм). Поэтому варьируемым параметром для увеличения силы удержания ЭМП при одновременном отсутствии насыщения магнитопровода рекомендуется использовать высоту постоянного магнита. Анализ зависимостей на рис. 11-12 показывает, что в конструкции описываемого ЭМП должны применяться постоянные магниты с наибольшими значениями остаточной магнитной индукции  $B_r$  и коэрцитивной силы  $H_c$ . В опытном ЭМП применены высококоэрцитивные постоянные магниты на основе редкоземельных материалов NdFeB ( $B_r = 1.144$  Тл,  $H_c = 750$  кА/м).

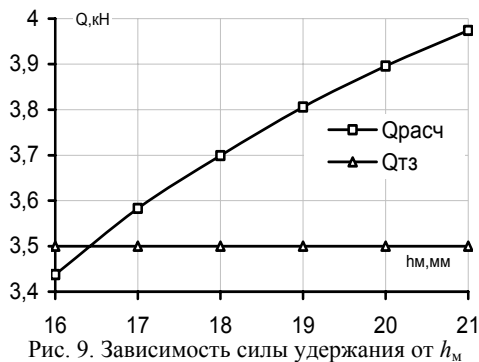


Рис. 9. Зависимость силы удержания от  $h_m$

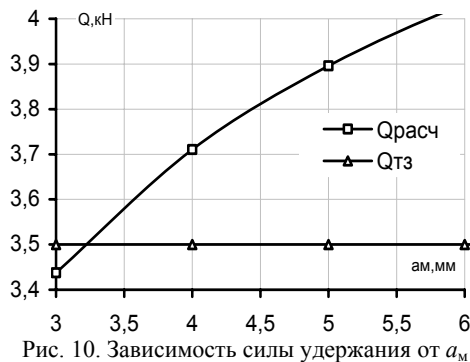


Рис. 10. Зависимость силы удержания от  $a_m$

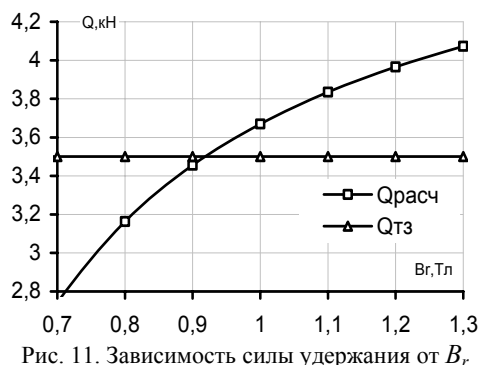


Рис. 11. Зависимость силы удержания от  $B_r$

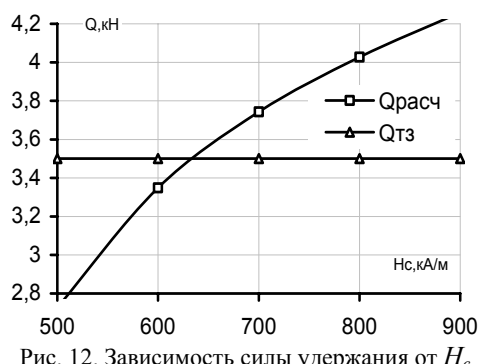


Рис. 12. Зависимость силы удержания от  $H_c$

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

По результатам исследований и расчетов линейных размеров магнитопровода были изготовлены ЭМП для опытного образца вакуумного выключателя среднего напряжения производства ООО "АВМ АМПЕР". Для проверки точности результатов расчета ЭМП была изготовлена установка для снятия удерживающей характеристики. Результаты экспериментальных исследований, приведенные ниже, свидетельствуют о достаточной для инженерной практики точности определения линейных размеров ЭМП подобных конструкций.

Удерживающая характеристика ЭМП с однопозиционной магнитной защелкой  $Q$ :

- расчет методом КЭ:  $Q = 3895,6 \text{ Н}$ ;
- эксперимент:  $Q = 3700,0 \text{ Н}$ ;
- погрешность:  $\Delta = 5,0\%$ .

#### ВЫВОДЫ

1. По результатам исследований и расчетов в данной работе разработаны рекомендации по определению линейных размеров магнитопровода электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой на базе высокоэрцитивных постоянных магнитов с двумя рабочими воздушными зазорами методом КЭ с помощью программного комплекса Femm.

2. Проведен анализ влияния линейных размеров магнитопровода на удерживающую характеристику электромагнита. Показано, что за счет рационального подбора линейных размеров якоря, корпуса и сердечника, удастся повысить силу удержания электромагнита при незначительном увеличении массы магнитопровода.

3. Полученная в результате экспериментального исследования удерживающая характеристика опытного образца прямоходового электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой подтверждает корректность предложенных рекомендаций по определению линейных размеров магнитопровода. Относительная погрешность расчетов методом КЭ составляет 5,0%.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Выключатели вакуумные серии ВВ/TEL. Руководство по эксплуатации ИТЕА674152.003РЭ. 2002 г.
- [2] Дашкевич А.С. Сваривание металлокерамических контактов при больших сквозных токах: дисс. канд техн. наук. Харьков. 1981. 151 с.
- [3] Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. М.: Энергия, 1970. 544 с.
- [4] Клименко Б.В., Гречко А.М., Выровец С.В., Бугайчук В.М. Быстродействующий электромагнитный привод с вытеснением магнитного поля для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника и электромеханика. 2006. № 4. С. 22-26.
- [5] Клименко Б.В., Гречко А.М., Ерьсько А.В. Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения // Электротехника и электромеханика. 2007. № 6. С. 40-43.
- [6] Патент України № 15210 Электромагнитный привод // авт. Клименко Б.В., Вировець С.В., Форкун Я.Б. Опубл.15.06.2006 р., Бюл. №16.
- [7] Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. Version 3.3. <http://femm.berlios.de>
- [8] ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная.
- [9] Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Опытный образец двухпозиционного электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения. // Электротехника и электромеханика. 2005. № 2. С. 23-27.
- [10] Гордон А.В., Сливинская А.Г. Электромагниты постоянного тока. М. – Л., 1960.
- [11] Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. - М.: Энергия, 1977. 272 с.
- [12] Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 160 с.

Поступила 13.10.2007