

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ДВУХПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Клименко Б.В., д.т.н., проф., Гречко А.М., аспирант
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"
тел. (057) 707-62-81, E-mail: kbv@kpi.kharkov.ua.

Бугайчук В.М.
Кременчугская электротехническая компания "АМПЕР"
Украина, 39605, Кременчуг, Полтавская обл., ул. Красина, 6
тел. (05366) 3-30-98, E-mail: info@amper.poltava.ua.

На прикладі дослідного зразку двопозиційного електромагнітного приводу вакуумного вимикача показано технічне рішення проблеми збільшення сили утримання рухомої частини магнітопроводу при знеструмлених котушках. Розглянуто принципи дії запропонованої конструкції електромагнітного приводу. Розглянуто конструктивні особливості основних елементів вакуумного вимикача.

На примере опытного образца двухпозиционного электромагнитного привода вакуумного выключателя показано техническое решение проблемы повышения силы удержания подвижной части магнитопровода при обесточенных катушках. Рассмотрен принцип работы предложенной конструкции электромагнитного привода. Рассмотрены конструктивные особенности основных элементов вакуумного выключателя.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время среди ведущих специалистов в области коммутационного оборудования часто возникают дискуссии о преимуществах и недостатках применения вакуумной и элегазовой коммутационной техники в сетях среднего напряжения в Восточно-европейских странах. Особенно пристальное внимание этой проблеме уделяется в странах бывшего СССР (кроме того, до сих пор в некоторых странах СНГ существуют запреты по применению вакуумной коммутационной техники для определенных коммутационных задач, связанные с отрицательным опытом эксплуатации первых образцов вакуумных выключателей) [1]. В отличие от Восточной Европы, в Западной уже достаточно давно разработана и успешно применяется политика по внедрению в электротехническую промышленность в качестве коммутационных аппаратов вакуумного оборудования для сетей среднего класса напряжения.

К выключателям среднего и высокого напряжения со стороны эксплуатационных служб электроэнергетических предприятий предъявляются следующие требования [2, 3]:

- высокий механический и коммутационный ресурс;
- минимум обслуживания и затрат при эксплуатации;
- высокая надежность;
- взрыво- и пожаробезопасность;
- отсутствие загрязнения окружающей среды.

Перечисленным требованиям полностью удовлетворяют вакуумные выключатели (в сетях среднего напряжения) и элегазовые выключатели (в сетях среднего и высокого напряжения).

За последние 15 лет в мире практически не вводилось в эксплуатацию никаких других выключателей на среднее напряжение 6 – 35 кВ, кроме вакуумных. На мировом рынке динамика спроса на выключатели различного типа на средние напряжения в

период с 1975-1990 гг. имеет следующий характер [4] (рис. 1):

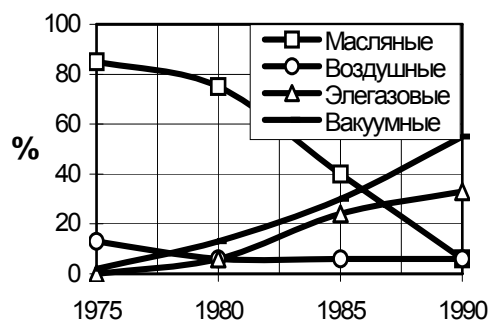


Рис. 1. Динамика спроса на выключатели различного типа на среднее напряжение в период с 1975-1990 гг

Как показывает анализ рынка, ожидаемый спрос на вакуумную коммутационную технику к 2010 году составит 80% всего рынка коммутационной техники среднего напряжения [1].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современное состояние отечественного и мирового коммутационного оборудования определяется решением следующих основных проблем [4]:

- определение судьбы находящихся длительное время в эксплуатации аппаратов;
- создание новых более совершенных конструкций аппаратов.

Именно решению последней проблемы уделяют особое внимание ведущие производители коммутационного оборудования, как на Украине, так и за рубежом.

Как уже отмечалось [5], в специализированной лаборатории при ЗАО "Кременчугская электротехническая компания "АМПЕР" совместно с кафедрой электрических аппаратов НТУ "ХПИ" был разработан и впоследствии изготовлен опытный образец вакуум-

ного выключателя на напряжения 6 – 35 кВ с использованием запатентованной конструкции двухпозиционного электромагнитного привода [6]. Описание новой конструкции электромагнита подробным образом было изложено в предыдущей публикации [5]. В настоящей статье основное внимание будет уделено описанию принципа работы разработанного электромагнитного привода (рис. 2 и 3), а также конструкции опытного образца вакуумного выключателя.

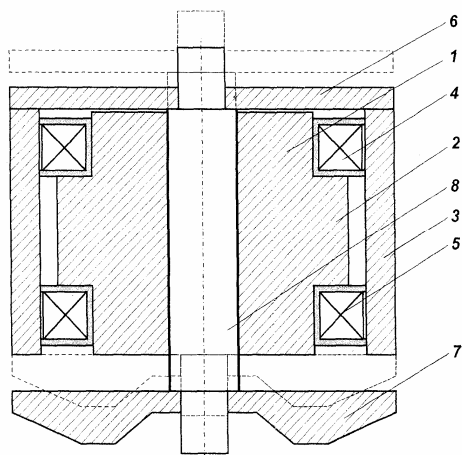


Рис. 2. Профильная проекция (осевое сечение) предлагаемого двухпозиционного электромагнита

На рис. 2 обозначено: 1 - сердечник; 2 – кольцеобразный выступ на сердечнике; 3 - корпус; 4, 5 - катушки; 6, 7 — дискообразные якоря; 8 — немагнитный шток.

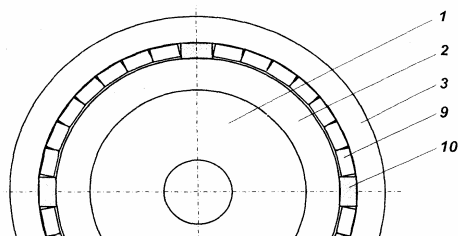


Рис. 3. Горизонтальная проекция (центральное сечение) предложенного двухпозиционного электромагнита

На рис. 3 обозначено: 1 - сердечник; 2 – кольцеобразный выступ на сердечнике; 3 - корпус; 9 - постоянный магнит; 10 - немагнитная деталь, которая соединяет сердечник с корпусом.

Целью разработки новой конструкции электромагнита являлось увеличение силы удержания подвижной части магнитопровода при обесточенных катушках. Решение поставленной задачи было достигнуто за счет создания удерживающей силы не в одном, а в двух зазорах.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТА

Устройство работает следующим образом. Когда один из якорей, например, 6 притянут к неподвижной части магнитопровода, которая состоит из сердечника 1 с кольцеобразным выступом 2 и кольцеобразного корпуса 3, причем корпус с сердечником соединены с помощью немагнитных деталей 10, которые только частично заполняют зазор между выступом сердечника и корпусом, соответствующий якорь надежно

удерживается в этом положении при обесточенных катушках 4 та 5, благодаря магнитному потоку, который создается постоянными магнитами 9, которые располагаются в незанятой немагнитными деталями части зазора между кольцеобразным выступом сердечника и корпусом. Этот магнитный поток значительно превышает поток через противоположный якорь 7, так как между этим якорем и неподвижной частью магнитопровода существует относительно большой немагнитный зазор, который приблизительно вдвое больше, чем рабочий ход якоря. На рис. 4 приведен расчет магнитного поля электромагнита (осесимметричная задача) с использованием специализированной комплексной программы FEMM, размещенной на сайте <http://femm.berlios.de>.

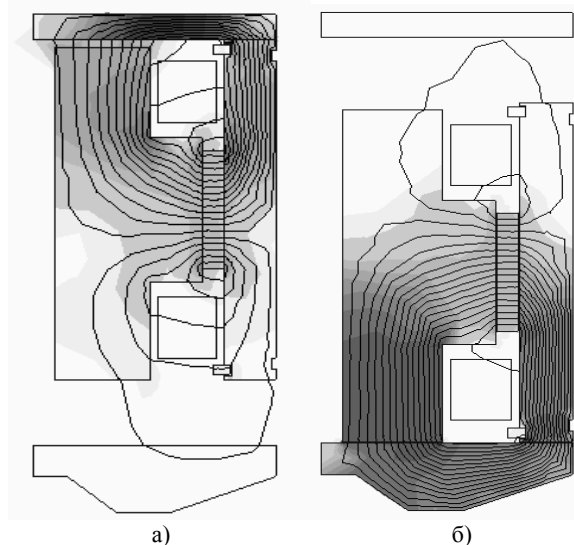


Рис. 4. Распределение магнитного поля в электромагните в положении отключено (а) и включено (б)

Если пропустить ток соответствующей величины и направления через расположенную со стороны этого зазора катушку 5, магнитный поток, созданный током катушки 5, через якорь 6, прижатый к неподвижной части магнитопровода, будет вычитаться от потока, созданного постоянными магнитами 9, поэтому результирующий магнитный поток через этот якорь уменьшится. Магнитный поток, созданный током катушки, через противоположный якорь 7 будет прибавляться к потоку, который создает постоянный магнит, поэтому результирующий магнитный поток через этот якорь, наоборот, увеличится и якоря 6 и 7, благодаря штоку 8, который их соединяет, начнут перемещаться таким образом, что немагнитный зазор со стороны катушки, через которую течет ток, начнет уменьшаться, а зазор со стороны обесточенной катушки, начнет увеличиваться. Когда якорь 7 упрется в неподвижную часть магнитопровода, он останется в этом положении и после отключения соответствующей катушки благодаря магнитному потоку, который создают постоянные магниты, который перетекает в сторону меньшего зазора (рис. 4 б).

Переключение электромагнита в исходное положение обеспечивается пропусканием тока соответствующей величины и направления через катушку 4. Данный электромагнит является двухпозиционным,

так как имеет два установившихся положения при обесточенных катушках.

Благодаря тому, что сила, которая прижимает якорь к неподвижной части магнитопровода в предлагаемой конструкции электромагнита создается в двух зазорах - между якорем и сердечником и между якорем и корпусом - результирующая сила удержания подвижной части магнитопровода при обесточенных катушках увеличивается приблизительно вдвое по сравнению с силой удержания в электромагните, где сила удержания создается только в одном зазоре, при той же самой величине магнитного потока, то есть при той же самой массе постоянных магнитов, и при том же самом поперечном сечении магнитопровода.

Эффективность предлагаемого устройства подтверждается сравнительными испытаниями электромагнита выключателя VM1 [7], конструкция которого является наиболее близкой к оптимальному решению с точки зрения силы удержания подвижной части магнитопровода при обесточенных катушках и предложенного электромагнита, который при меньших габаритных размерах, меньшей общей массе и меньшей массе постоянных магнитов обеспечивал силу удержания приблизительно 7 кН, в то время, как электромагнит выключателя VM1 обеспечивал силу удержания приблизительно 4 кН.

Сравнительные характеристики электромагнита выключателя VM1 концерна АВВ и разработанного электромагнита (ЭМ2) приведены в таблице 1. Испытания проводились в лаборатории ЗАО «Кременчугская электротехническая компания "АМПЕР"».

Таблица 1

Показатели электромагнита	VM1	ЭМ2
Общие габариты электромагнита, дм ³	5, 2	2, 8
Объем активного материала якоря, см ³	675	242
Объем постоянных магнитов, см ³	100	72
Сила удержания подвижной части магнитопровода при обесточенных катушках, кН	4	7
Время включения, мс	50	48
Время отключения, мс	33	40

Здесь может возникнуть вопрос: действительно ли необходимо столь значительное увеличение силы удержания (и как следствие, силы контактного нажатия) и каковы причины такой необходимости? Ответ на этот вопрос заключается в следующем.

СИЛА КОНТАКТНОГО НАЖАТИЯ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Одной из причин отказов в работе коммутационных аппаратов является сваривание контактов. Сваривание характеризуется усилием, которое необходимо приложить к контактам для их размыкания. В замкнутых контактах сваривание происходит вследствие выделения большого количества тепла в зоне контактных площадок при перегрузках или сквозных токах короткого замыкания. При протекании таких токов через контакты они могут свариваться настолько прочно, что отключающий механизм будет не в

состоянии их разомкнуть, что приведет к возникновению аварийных ситуаций в сетях электроснабжения жилых районов и промышленных предприятий.

Применительно к сильноточным коммутационным аппаратам сваривание в большей или меньшей степени происходит практически всегда. Значит, если невозможно полностью избежать этого негативного явления, то необходимо свести его влияние к минимуму. Одним из основных направлений решения проблемы сваривания контактов является разработка коммутационных аппаратов, имеющих такие параметры контактной системы (форма и размер контактов, контактное нажатие и др.), которые бы обеспечили надежную работу контактов [8].

Эффективным средством борьбы со свариванием является увеличение силы контактного нажатия. На основе анализа результатов испытаний в [9] приводятся зависимости усилий приваривания контактов при сквозных токах короткого замыкания. Кривые построены для постоянного отношения разъединяющего усилия Q_0 к нажатию на контактах Q_K (рис. 6). Приведем краткие пояснения к полученным зависимостям. Например, при сквозном токе короткого замыкания в 20 кА и при нажатии на контактах $Q_K = 400$ Н разъединяющее усилие Q_0 будет равно 4000 Н; при нажатии на контактах в 1000 Н разъединяющее усилие равно также 1000 Н; а уже при нажатии на контактах приблизительно в 2500 Н разъединяющее усилие приблизительно равно всего 250 Н.

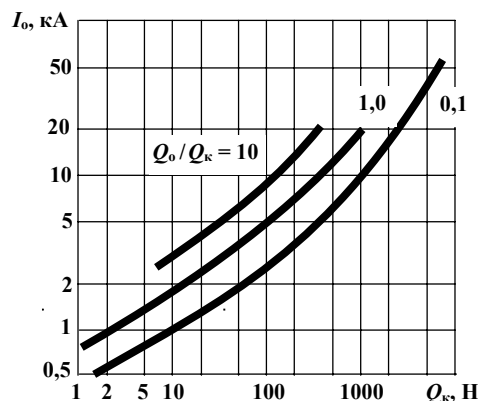


Рис. 6. Графики для определения усилия приваривания контактов Q_0 в зависимости от сквозных токов короткого замыкания I_0 и нажатий на контактах Q_K

При протекании токов короткого замыкания возникают электродинамические силы, которые стремятся отбросить подвижные контакты от неподвижных. Этот эффект обусловлен взаимодействием токов, стягивающихся к маленьким площадкам на контактной поверхности, через которые ток переходит из одного контакта в другой. Произвести точный расчет отбрасывающих усилий довольно затруднительно вследствие того, что размеры и число этих площадок неизвестно. Приближенно значение силы отброса вычисляется по формуле [9]:

$$Q_0 = k \cdot i^2, \quad (1)$$

где Q_0 – сила отброса, Н; k – коэффициент, определяемый по результатам испытаний, Н/кА²; i – величина тока, кА.

Разные источники приводят различные значения для коэффициента k . Обобщив их, можно сделать заключение, что $k = 0.2 \div 1.5 \text{ Н/кА}^2$. Тогда, например, при значении номинального отключаемого тока $I_{\text{НОМ.ОТКЛ}}$ в 20 кА ударный ток будет приблизительно равен $2.5 \cdot I_{\text{НОМ.ОТКЛ}} = 50 \text{ кА}$, а значение силы отброса $Q_0 = 500 \dots 3750 \text{ Н}$.

Такая значительная величина силы отброса может привести к самопроизвольному размыканию контактов при больших сквозных токах короткого замыкания, что для большинства конструкций сильноточных аппаратов является недопустимым, т.к. помимо значительного выгорания контактов и потери провала может иметь место вторичное сваривание контактов [8].

Подводя итог вышесказанному, отметим, что обеспечение достаточно большого значения силы контактного нажатия и силы удержания подвижной части магнитопровода при обесточенных катушках позволяет значительно уменьшить силу сваривания контактов, уменьшить разъединяющее усилие и компенсировать силу отброса контактов при больших токах, что существенно повышает электродинамическую стойкость и надежность работы вакуумного выключателя.

ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Внешний вид изготовленного вакуумного выключателя показан на рис. 7 (а, б).

На рис. 7а обозначено: 1 – верхний ввод; 2 – изоляционный каркас полюса; 3 – нижний ввод; 4 – корпус выключателя; 5 – подшипник рычага.

На рис. 7б обозначено: 1 – корпус выключателя; 2 – двухпозиционный электромагнит; 3 – рычаг; 4 – опытная плата управления (предварительное месторасположение).

Характеризуя конструктивные особенности представленного вакуумного выключателя, следует подробнее остановиться на особенностях его основных узлов.

ПОЛЮС

В полюсах установлены вакуумные дугогасительные камеры последнего поколения с максимальным коммутационным ресурсом и минимальным током среза. Гашение дуги происходит в вакуумной камере. Коммутационная камера находится между двумя керамическими изоляторами. Неподвижный и подвижный контакты подключаются к внешним токовым вводам, при этом неподвижный контакт жестко прикрепляется к корпусу выключателя, а подвижный контакт – к приводу выключателя, который может перемещаться в вакуумной камере без нарушения вакуума только на несколько миллиметров за счет наличия металлического сильфона. Тарельчатые пружины поджаты встроены в изолирующую тягу. Внутреннее давление вакуумной камеры составляет меньше, чем 10^{-7} бар. Характеристики контактного материала и сама геометрия контактов соответствует техническим требованиям выключателя. Так как при коммутациях в вакуумной камере гашение дуги происходит без каких-либо продуктов разложения, ваку-

ум не ухудшает своих диэлектрических свойств. Благодаря отсутствию в вакууме окисления, поверхности контактов остаются чистыми. При этом в течение всего срока эксплуатации сохраняется очень низкое переходное сопротивление контактов.

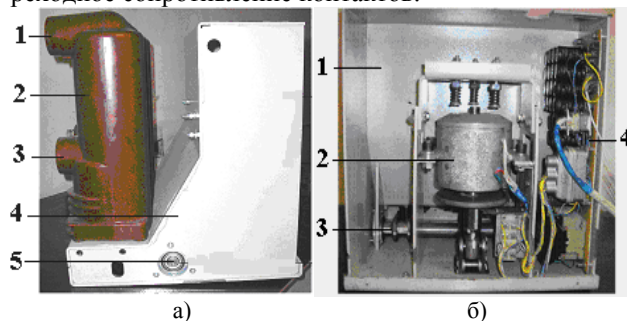


Рис. 7. Опытный образец вакуумного выключателя

Обобщая все вышесказанное, можно сделать вывод, что в отношении надежности принцип вакуумного дугогашения превосходит все остальные.

ПЛАТА УПРАВЛЕНИЯ

Плата управления опытного образца вакуумного выключателя размещается в корпусе выключателя. Предварительное месторасположение платы управления выбрано сбоку от электромагнита, как показано на рис. 7б. Такой выбор был обусловлен достаточно свободным доступом ко всем основным элементам платы управления. Необходимо отметить, что данное месторасположение платы управления является предварительным на период проведения испытаний на механический ресурс ВО, коммутационный ресурс ВО (при номинальном токе и номинальном токе отключения), собственное время включения и отключения и пр.

В перспективе планируется использовать в плате новые электронные компоненты, которые будут гарантировать высокую надежность работы схемы. Применение микроконтроллерного управления повысит быстрдействие выключателя и расширит его функциональные возможности.

ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Разработанный электромагнит, установленный непосредственно внутри корпуса вакуумного выключателя, показан на рис. 8.

Это двухпозиционный электромагнит, т.е. электромагнит с двумя устойчивыми состояниями при обесточенных обмотках в положениях ВКЛЮЧЕНО и ОТКЛЮЧЕНО выключателя. В двухпозиционном электромагните перемещающиеся верхний и нижний якоря, жестко закрепленные с помощью немагнитного штока, удерживаются с большими усилиями в крайних положениях, благодаря встроенным в магнитную цепь высококоэрцитивным постоянным магнитам. Перемещение якорей осуществляется двумя катушками и начинается, когда тяговое усилие соответствующей катушки с учетом действия контактных (тарельчатых), возвратных и амортизирующих пружин превысит усилие магнитной защелки.

Амортизирующие пружины 1 обеспечивают дополнительное нажатие на верхний якорь 2 в положении ОТКЛЮЧЕНО, и смягчают удар нижнего якоря

14 на конечном участке его движения. Начало момента соприкосновения якоря 2 с наконечниками 9 амортизирующих пружин 1 регулируется с помощью соответствующих гаек 8.

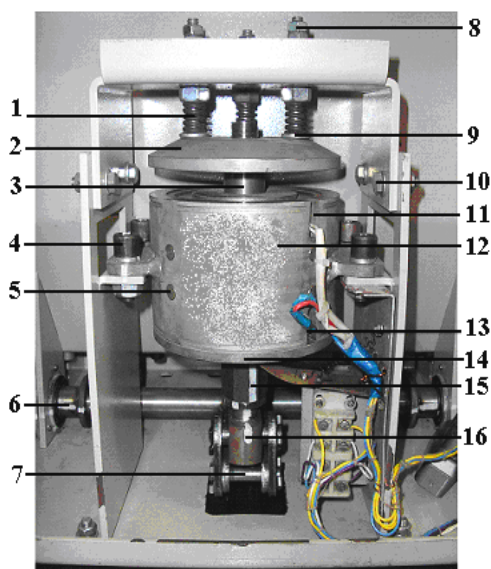


Рис. 8. Внешний вид конструкции опытного образца электромагнитного привода

На рис. 8 обозначено: 1 – амортизирующие пружины; 2 – верхний якорь; 3 – немагнитный шток; 4 – разъемное соединение корпусов электромагнита и выключателя; 5 – немагнитные штифты, соединяющие сердечник с корпусом; 6 – рычаг; 7 – штифт, соединяющий основание немагнитного штока с валом электромагнита; 8 – гайки, регулирующие момент удара верхнего якоря по наконечникам тарельчатых пружин; 9 – наконечники амортизирующих пружин; 10 – разъемное соединение крышки с тарельчатыми пружинами и корпуса выключателя; 11 – конструктивный вырез в корпусе электромагнита для выводов включающей катушки; 12 – корпус электромагнита; 13 – конструктивный вырез в корпусе электромагнита для выводов отключающей катушки; 14 – нижний якорь; 15 – гайка, регулирующая провал контактов; 16 – деталь, соединяющая основание немагнитного штока с валом электромагнита.

В качестве постоянных магнитов используются современные магнитотвердые материалы на основе редкоземельных металлов типа Nd-Fe-B с высокой удельной энергией и коэрцитивной силой, достигающей 1000 кА/м. Современные магнитные технологии позволяют обеспечить необходимые временные и силовые характеристики для вакуумных коммутационных аппаратов.

Исследовательские испытания разработанного электромагнита показали, что, благодаря данной конструкции привода, удалось достичь необходимых операционных механических функций выключателя, а именно:

- обеспечить надежное и стабильное включение и отключение с нормированными параметрами;
- надежно фиксировать выключатель с помощью "магнитных защелок" в обоих крайних положениях ОТКЛЮЧЕНО и ВКЛЮЧЕНО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанная конструкция двухпозиционного поляризованного электромагнита за счет применения высококоэрцитивных постоянных магнитов и создания удерживающего усилия в двух зазорах позволяет обеспечить значительные контактные нажатия (свыше 20 кН) в вакуумных камерах, что в свою очередь обеспечивает неприваривание контактов выключателя при коммутации токов 20 кА и более.

2. Существующие методы расчетов, реализуемые в современных компьютерных программах, дают возможность построения математической модели и проведения оптимизации параметров новой конструкции электромагнита с целью улучшения его основных статических (усилие удержания во включенном положении) и динамических (быстродействие) характеристик, в первую очередь, при отключении выключателя.

3. Результаты предварительных исследовательских испытаний позволяют говорить о перспективности применения описанной конструкции электромагнита в качестве привода в вакуумных выключателях средних напряжений и конкурентоспособности выключателей с электромагнитным приводом по показателю отключаемого тока с выключателями, оснащенными пружинно-моторными приводами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Евдокунин Г.А., Тилер Г. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения. – СПб: Издательство Сизова М.П., 2000. – 114 с., с илл.
- [2] Гилев А. А. Сравнительная характеристика приводов вакуумных выключателей. //Электротехника і електро-механіка. - 2002. - №3. - С. 28-29.
- [3] Рывкин А. М., Козлов В. Б. Сравнение вакуумного выключателя ВВ-10 с выключателями других видов.//Электротехническая промышленность. Серия «Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы». – 1981. – Вып. №1.-С. 6-9.
- [4] Белкин Г.С., Вариводов В.Н. Состояние и перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения. // Электричество. – 2001. - №9. – С. 24 – 29.
- [5] Клименко Б.В., Бугайчук В.М., Гречко А.М. Электромагнитные приводы вакуумных выключателей средних напряжений. // Вестник НТУ «ХПИ». – 2004. - № 42. – С. 73 – 80.
- [6] Патент України № 70574А Двопозиційний електромагніт // авт. Бугайчук В.М., Клименко Б.В. Опубл.15.10.2004 р., Бюл. №10.
- [7] VMI. Vakuum - Leistungsschalter mit Magnetantrieb / Каталог ABB Calor Emag Mittelspannung GmbH - ABB Sace T.M.S. S.p.A.
- [8] Дашкевич А.С. Сваривание металлокерамических контактов при больших сквозных токах: дисс. канд техн. наук. – Харьков, 1981. – 151 с.
- [9] Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 В. – М.: Энергия, 1970. – 544 с.

Поступила 1.12.2004