

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПРИВОД С ВЫТЕСНЕНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Клименко Б.В., д.т.н., проф., Гречко А.М., Выровец С.В.  
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, grechko@kpi.kharkov.ua, vsv@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.

*Розглянуто дослідний зразок швидкодіючого електромагнітного приводу вакуумного вимикача середньої напруги із застосуванням принципу витіснення магнітного поля. Описано принцип роботи запропонованої конструкції електромагнітного приводу. Створена мікропроцесорна система керування з використанням комп'ютеризованого стенду, що дозволяє отримувати динамічні характеристики електромагніта.*

*Рассмотрен опытный образец быстродействующего электромагнитного привода вакуумного выключателя среднего напряжения с применением принципа вытеснения магнитного поля. Описан принцип работы предложенной конструкции электромагнитного привода. Создана микропроцессорная система управления с использованием компьютеризованного стенда, позволяющая получать динамические характеристики электромагнита.*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы мировая практика электроаппаратостроения ориентируется на применение новых нетрадиционных видов изоляции. В частности, в области создания коммутационных аппаратов для электрических сетей напряжением 6-35 кВ в настоящее время стали доминирующими вакуумные выключатели, широкое применение которых вызвано их умеренной стоимостью и высокими эксплуатационными качествами, прежде всего, - большой коммутационной и механической износостойкостью, высокой надежностью и низкими эксплуатационными затратами. Вакуум как дугогасительная и изолирующая среда благодаря своим уникальным свойствам позволяет создавать коммутационные аппараты в простейшем с конструктивной точки зрения виде.

Также одним из главных достоинств вакуума как дугогасящей среды является то, что горение дуги в вакуумной камере при отключении токов основывается на проводящей среде паров металла контактов, которая еще до полного расхождения контактов конденсируется в течение нескольких микросекунд и диэлектрическая прочность вакуума восстанавливается полностью. Это явление в значительной мере обеспечивается тем, что энергия горения дуги паров металла из специально подобранных сплавов контактных материалов, в вакууме гораздо меньше, чем энергия горения дуги в плазме элегаза в дугогасительной камере элегазового выключателя. Следовательно, используя вакуумный принцип гашения дуги, является возможным создание выключателей со значительно меньшими габаритными размерами. При этом вакуумная дугогасительная камера имеет только две подвижные части, в то время как современные элегазовые дугогасящие камеры представляют собой сложную конструкцию, состоящую более чем из 20 подвижных механических частей [1].

Необходимо отметить, что первые образцы вакуумных выключателей создавали значительные токи среза (порядка 20–30 А). Это было вызвано тем, что для изготовления контактов использовался такой тугоплавкий материал как вольфрам – разработчики считали, что его применение позволит снизить износ контактов. В результате это приводило к пробое изоляции и к огромным убыткам энергетических предприятий. Как показал опыт немецкого концерна "Siemens", применение в качестве контактного материала такого сплава как СиСг позволяет решить данную проблему, причем этот сплав пригоден почти для всех коммутационных задач [1].

Также существует мнение, что только вакуумные выключатели создают перенапряжения. Однако многочисленные эксперименты и научные публикации [2, 3] опровергают это утверждение. Из приведенных в них характеристик видно, что с точки зрения величины тока среза и создаваемых при этом перенапряжений масляные, воздушные и элегазовые выключатели существенно уступают вакуумным. Использование же таких современных защитных аппаратов, как ограничители перенапряжений, полностью решает проблему перенапряжений вне зависимости от типа используемого выключателя.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как уже отмечалось в [4, 5], благодаря сотрудничеству ЗАО "Кременчугская электротехническая компания "АМПЕР" и кафедры электрических аппаратов НТУ "ХПИ" был разработан и впоследствии изготовлен опытный образец вакуумного выключателя ВБ-4Е на напряжение 10 кВ с использованием двухпозиционного электромагнитного привода.

На производственных мощностях специализированного предприятия "ВИТ" (г. Запорожье) были про-

ведены предварительные испытания данного вакуумного выключателя. Испытания проводились на так называемой синтетической установке, в которой источниками большого напряжения и тока являются два различных элемента относительно небольшой мощности, определенным образом синхронизированные между собой [6]. Условия, аналогичные реальным при эксплуатации и испытаниях вакуумных выключателей, легче всего осуществить, применяя схему, составленную по методу наложения токов. Как показывает практика, электрооборудование, которое успешно прошло испытания по синтетической схеме, таким же образом ведет себя и при испытаниях на ударном генераторе большой мощности. В результате испытаний, которые проходили в т.н. цикле ВО, вакуумный выключатель зарекомендовал себя с положительной стороны, отключив ток величиной 28,5 кА при отсутствии повторных зажиганий дуги и опасных коммутационных перенапряжений, что иллюстрируют осциллограммы испытаний, приведенные на рис. 1.

Основным, относительным недостатком данной конструкции электромагнитного привода, являются величины времени включения (38 мс) и отключения (30 мс), которые, однако, вполне сопоставимы со значениями данных параметров у таких признанных лидеров в области электроаппаратостроения как: вакуумного выключателя VM1 концерна АВВ (Германия) – 50 и 33 мс; вакуумного выключателя серии ВВ/TEL фирмы "Таврида-Электрик" - 55 и 20 мс; вакуумного выключателя ВР1 производства РЗВА – 90 и 42 мс соответственно (данные взяты из информационных материалов указанных компаний).

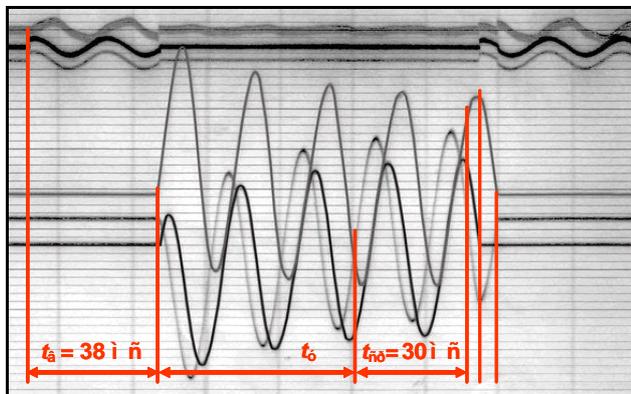


Рис. 1. Осциллограмма результатов испытаний вакуумного выключателя ВВ-4Е (цикл ВО)

В испытанной конструкции электромагнитного привода основными параметрами, оказывающими существенное влияние на величину собственного времени включения и отключения являлись значительная величина индуктивности магнитной системы и наличие вихревых токов в сердечнике. По этой причине при подаче тока в обмотку нарастание результирующего магнитного потока до значения, необходимого для начала движения привода, происходило относительно медленно.

Целью разработки новой конструкции электромагнитного привода является уменьшение собственного времени включения и отключения вакуумного

выключателя. Необходимость в реализации данной задачи объясняется следующим.

Большинство ведущих зарубежных предприятий с непрерывным характером производства имеют две независимые линии электропитания и автоматические системы переключения как гарантию против сбоев в подаче электроэнергии. Если происходит отказ основного источника питания, распределительная аппаратура производит переключение на резервный источник. Однако эти системы реагируют медленно и, как правило, не предотвращают падений напряжения и потенциальных угроз в перерыве подачи электроэнергии. Быстрота переключения на резервный источник питания очень важна, так как даже очень короткий перерыв в подаче питания при непрерывном производственном процессе может быть опасным и дорогостоящим. Из-за наличия большого количества электронных контроллеров и прецизионного оборудования на современных производственных линиях, даже кратковременные колебания напряжения в сети могут привести к полной потере произведенной продукции. Например, сбой компьютеризированных производственных систем может привести к остановке производственных линий и нарушению графика производства. Простой оборудования всегда обходится дорого, и последующее восстановление производственного процесса является тяжелым бременем для любой компании.

Управление в реальном времени и мониторинг качества двух источников электропитания обеспечивается с помощью специальных компьютерных программ и контроллеров, которые также управляют высоковольтными выключателями, которые осуществляют включение резервного источника питания в случае колебаний напряжения в сети или временного прекращения подачи электроэнергии. Ведущим западным производителям высоковольтной аппаратуры удалось обеспечить переключение на резервный источник питания менее чем за полтора периода (за 30 мс) [7], что недостижимо для большинства традиционных переключающих систем отечественного производства, известных как АВР. Благодаря малому времени переключения, сдвиг фаз между питающей шиной и сетью альтернативного источника питания при сбое изменяется незначительно и поэтому они остаются синхронизированными. Данный факт приобретает особую значимость, например, когда нагрузкой выступают синхронные электродвигатели. В этом случае необходимо управлять переключением таким образом, чтобы контролировались частота и фазовый сдвиг между двумя источниками, питающими нагрузку через переключатель. Если данное условие не будет выполнено, то при переключении на альтернативный источник питания будет происходить динамический токовый удар в обмотку коммутлируемого двигателя, что часто приводит к выходу его из строя.

В связи с этим была поставлена задача спроектировать быстродействующий электромагнитный исполнительный механизм, который был бы способен обеспечить достаточно быстрое переключение, сохранив при этом такую же высокую надежность, что и традиционные выключатели.

Поставленная задача была достигнута за счет создания новой конструкции быстродействующего электромагнитного привода с применением принципа вытеснения магнитного поля, а также использования микроконтроллерного управления.

### КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА С ОДНОПОЗИЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ЗАЩЕЛКОЙ

Предложенная конструкция электромагнитного привода показана на рис. 2.

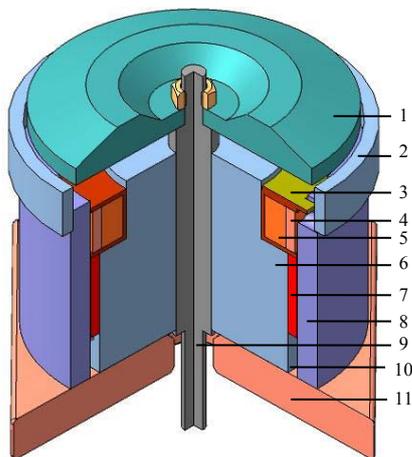


Рис. 2. Эскиз электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой:

- 1 - дискообразный якорь; 2 - ферромагнитный шунт;
- 3 - каркас катушки; 4 - отключающая обмотка;
- 5 - включающая обмотка; 6 - сердечник; 7 - постоянные магниты; 8 - корпус; 9 - немагнитный шток;
- 10 - воздушный шунт; 11 - немагнитный фланец

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии дискообразный якорь 1 за счет воздействия на него контактных (тарельчатых) и отключающих пружин надежно удерживается в отключенном положении. На кольцеобразном выступе сердечника (между сердечником 6 и корпусом 8) расположена катушка 3, состоящая из двух обмоток: включающей 5 и отключающей 4. Сердечник 6 и корпус 8 размещены в коаксиальном относительно друг друга положении и надежно зафиксированы на немагнитном фланце 11. Благодаря отсутствию немагнитных соединительных деталей в зазоре между сердечником и корпусом (по сравнению с предыдущей конструкцией электромагнитного привода) появилась возможность размещения дополнительного количества постоянных магнитов 7, что привело к увеличению силы удержания подвижной части магнитопровода (дискообразного якоря) при обесточенных обмотках с 7 кН до 8,5 кН. Также на столь значительное увеличение силы удержания электромагнита повлияло и конструктивное изменение привода, а именно то, что наружный диаметр дискообразного якоря 1 в новой конструкции стал меньше наружного диаметра цилиндрического корпуса 8. Это привело к увеличению значения магнитной индукции в рабочем зазоре между якорем и корпусом, а значит и к увеличению силы удержания при обесточенных обмотках.

Для проведения экспериментальных исследова-

ний была предусмотрена возможность установки на цилиндрический корпус 8 в области рабочего зазора между корпусом и якорем шунта 2, выполненного из магнитомягкого материала. Это позволило дополнительно снизить время включения электромагнитного привода, благодаря тому, что магнитный поток замыкается в области рабочего зазора не через воздух, имеющий высокое значение магнитного сопротивления, а через ферромагнитный шунт, магнитное сопротивление которого значительно ниже.

Электромагнитный привод работает следующим образом. Для приведения в движение привода необходимо пропустить ток определенной величины и направления через включающую обмотку 5 катушки 3 электромагнита. Магнитный поток, создаваемый данной обмоткой, через якорь 1, будет прибавляться к потоку, который создают постоянные магниты 7 (в исходном положении при отпущенном якоря величина этого потока незначительна), поэтому результирующий магнитный поток через этот якорь начнет увеличиваться. Это, в свою очередь, приведет к увеличению тяговой силы, под действием которой якорь 1 будет стремиться преодолеть усилия, создаваемые контактными и отключающими пружинами (в исходном положении усилие пружин незначительно). При достижении значения тяговой силы, большей, чем сила, создаваемая пружинами, якорь 1, благодаря немагнитному штоку 9, начнет перемещаться в сторону уменьшения немагнитного (рабочего) зазора. Следовательно, при этом начнет уменьшаться магнитное сопротивление данного зазора, что приведет к еще большему увеличению магнитного потока и, как следствие, тяговой силы. В результате под воздействием данной силы, а также инерции якорь достигнет своего конечного положения, притянувшись к неподвижной части магнитопровода, и будет надежно удерживаться и после отключения соответствующей обмотки благодаря магнитному потоку, который создают постоянные магниты (т.н. однопозиционная магнитная защелка). В этом положении контактные и отключающие пружины будут находиться в сжатом состоянии, однако их суммарной силы будет недостаточно для того, чтобы преодолеть тяговую силу электромагнита и оторвать якорь от неподвижной части магнитопровода. В качестве постоянных магнитов используются современные магнитотвердые материалы на основе редкоземельных металлов (типа NdFeB) с высокой удельной энергией и коэрцитивной силой, достигающей 1000 кА/м.

Для отключения электромагнита необходимо пропустить ток определенной величины и направления через отключающую обмотку 4 катушки 3 электромагнита. Величина отключающего импульса тока будет существенно меньше по сравнению с предыдущей конструкцией привода. Это объясняется тем фактом, что магнитный поток, создаваемый отключающим током будет вытеснять магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами из области рабочего зазора в область так называемого воздушного шунта 10 (рис. 2). Следовательно, тяговая сила, удерживающая якорь в притянutom положении резко снизится и под воздействием предварительно сжатых контакт-

ных и отключающих пружин якорь оторвется от неподвижной части магнитопровода и вернется в первоначальное положение.

Распределение магнитного поля (осесимметричная задача) в электромагните при притяннутом положении якоря (обмотки обесточены) и при пропускании импульса тока через отключающую обмотку показано на рис. 3. Расчет магнитных полей в данном случае производился методом конечных элементов.

Наличие в конструкции электромагнита воздушного шунта совместно с использованием двух обмоток в одной катушке позволяет осуществить более быстрое перераспределение магнитного поля, что приводит к значительному уменьшению времени переключения электромагнитного привода.

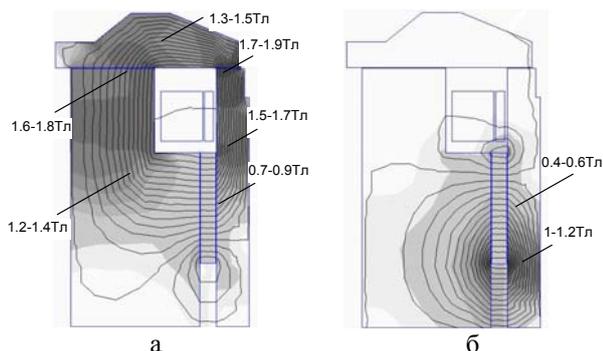


Рис. 3. Распределение магнитного поля в электромагните при притяннутом положении якоря: а - обмотки обесточены; б - при подаче импульса тока на отключающую обмотку

Как было сказано выше, в связи с отсутствием немагнитных соединительных деталей в зазоре между сердечником и корпусом появилась возможность размещения дополнительного количества постоянных магнитов, что привело к увеличению силы удержания якоря при обесточенной катушке. Как было показано в [4], этот факт позволяет уменьшить силу сваривания контактов вакуумной дугогасительной камеры, уменьшить разъединяющее усилие и компенсировать силу отброса контактов при протекании больших сквозных токов короткого замыкания, что существенно повышает электродинамическую стойкость и надежность работы вакуумного выключателя. Необходимость увеличения силы удержания также связана со следующим. Разработанный электромагнитный привод устанавливается в выключатели, в которых используются вакуумные дугогасительные камеры производства концерна АВВ. Согласно требованиям, предъявляемым к эксплуатации данных камер, для гарантированного отключения токов короткого замыкания необходимая величина силы нажатия на контакты должна быть следующей: 2 кН на один полюс для тока 20 кА; 2,5 кН на один полюс для тока 25 кА и т.д. в практически линейной зависимости. Т.е. для вакуумного выключателя с номинальным током отключения 20 кА величина силы нажатия должна быть 6 кН, а, учитывая силы отключающих пружин и необходимый коэффициент запаса, величина силы удержания привода должна увеличиться до 7,5-8 кН. Достижение такой величины силы нажатия на контакты вакуумной камеры в выключателях VM1 (ABB) обес-

печивается применением системы рычагов, передающих через вал усилие от привода на контакты с коэффициентом передачи 1,5:1. Разработанный же новый электромагнитный привод обеспечивает силу контактного нажатия в 8,5 кН, что позволяет использовать систему рычагов с коэффициентом передачи 1:1, и тем самым уменьшить габариты вакуумного выключателя.

#### ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА

В итоге, по результатам предварительных математических расчетов был изготовлен опытный образец электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой для вакуумных выключателей средних напряжений с применением принципа вытеснения магнитного поля. Следует отметить, что вышеописанная конструкция электромагнитного привода была запатентована [8].

Внешний вид изготовленного электромагнитного привода совместно с опытной установкой показан на рис. 4 а, б.

На рис. 4а обозначено: 1 – датчик измерения скорости; 2 – немагнитное основание для размещения датчика; 3 – выводы двухобмоточной катушки; 4 – электромагнитный привод; 5 – немагнитный фланец; 6 – противодействующий узел; 7 – конечный выключатель.

На рис. 4б обозначено: 1 – датчик измерения скорости; 2 – электромагнитный привод; 3 – немагнитный шток; 4 – немагнитный фланец; 5 – регулировочная гайка; 6 – отключающая трубка; 7 – корпус противодействующего узла; 8 – контактная трубка; 9 – основание установки.

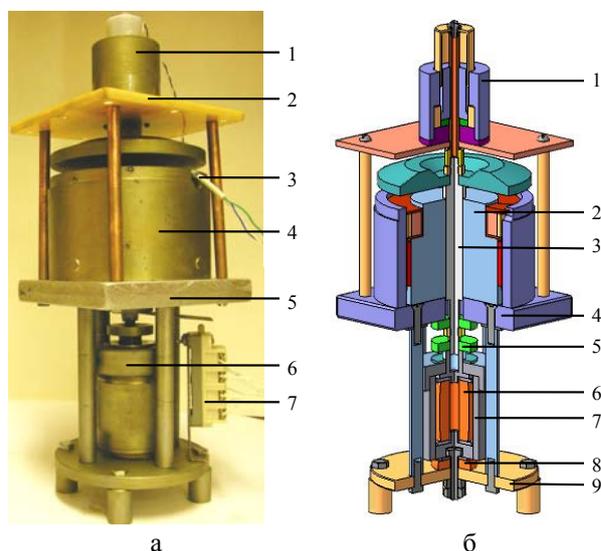


Рис. 4. Внешний вид (а) и эскиз опытной установки (б) для проведения экспериментальных исследований привода

Для проведения практических исследований была изготовлена опытная установка (рис. 4 а, б), имитирующая воздействие на электромагнитный привод контактных и отключающих пружин. Вместо реальных пружин были применены детали различной высоты, изготовленные из вакуумной резины (далее по тексту - трубки). Жесткость данных трубок оказалась

вполне достаточной для обеспечения противодействующей характеристики необходимого вида с возможностью различных корректировок. При проведении предварительных экспериментальных исследований на упругие деформации трубки из вакуумной резины зарекомендовали себя с положительной стороны, обеспечивая значительные усилия даже при малых значениях сжатия. Недостатком использования вместо тарельчатых пружин контактных трубок является существенная нелинейность противодействующей характеристики при значительных силах сжатия. В связи с этим планируется создание опытной установки с использованием реально применяемых в вакуумных выключателях тарельчатых пружин.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения предварительных испытаний была создана электромеханическая система управления электромагнитным приводом, позволяющая обеспечить простейшие операции включения и отключения. С целью повышения быстродействия электромагнита и создания "интеллектуального" выключателя, приближающегося по своим свойствам к автоматическому выключателю, была также разработана и применена микропроцессорная система управления с использованием компьютеризированного стенда, позволяющая получать динамические характеристики электромагнита в виде осциллограмм при различных значениях таких величин как напряжение (200–360 В) и емкость разрядного конденсатора (660–8200 мкФ). На рис. 5, 6 показаны осциллограммы, полученные при максимальных значениях напряжения и емкости разрядного конденсатора.

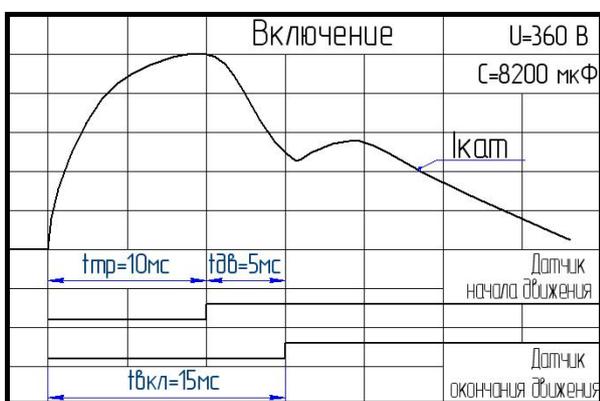


Рис. 5. Осциллограмма включения привода

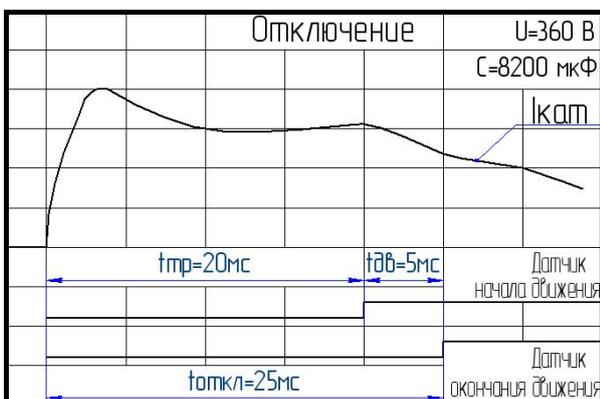


Рис. 6. Осциллограмма отключения привода

Предварительные испытания разработанного электромагнитного привода показали, что, благодаря предложенной конструкции удалось добиться значительного снижения времени включения – с 38 до 15 мс и времени отключения – с 30 до 25 мс, одновременно с этим увеличив силу удержания якоря при обесточенной катушке с 7 кН до 8,5 кН.

### ВЫВОДЫ

1. Рассмотренная конструкция электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой с применением принципа вытеснения магнитного поля в область воздушного шунта позволяет обеспечить уменьшение собственного времени включения и отключения, что в свою очередь позволяет применить данную конструкцию электромагнита в качестве привода в вакуумных выключателях средних напряжений в ячейках комплектных распределительных устройств для построения систем непрерывной подачи электроэнергии.

2. Существующие методы расчетов, реализуемые в специальных компьютерных программах, дают возможность построения математической модели и проведения оптимизации параметров новой конструкции электромагнита с целью дальнейшего улучшения его динамических характеристик, а именно снижения времени отключения выключателя.

3. Полученное значение силы удержания привода при обесточенной катушке в 8,5 кН позволяет уменьшить габариты вакуумного выключателя, применив в его конструкции систему рычагов с коэффициентом передачи 1:1.

4. По предварительным экспериментальным исследованиям можно сделать вывод о конкурентоспособности новой конструкции электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой по массогабаритным показателям, а также показателю собственного времени включения и отключения с выключателями отечественных и зарубежных производителей.

### 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] Working group paper: Interruption of small inductive currents (chapter 1,2) // Electra. - 1980. - №72. - pp.73-103.
- [3] Headley A. Meeting system requirements with modern switchgear // Proceedings IEEE Symp. on trends in modern switchgear design 3,3-150 kV. - Newcastle. - 1984. - pp.9.1-9.5.
- [4] 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.
- [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] Каплан В.В., Нашатырь В.М. Синтетические испытания высоковольтных выключателей. – Л.: Энергия. Ленингр. отделение, 1980. Синтетические испытания
- [7] K.Jantke, R. Krumm, R. Vieille: 30-ms-Schnellumschaltssystem für eine optimierte Energieversorgung. ETZ 22 (2001).
- [8] Патент України № 15210 Электромагнітний привод // авт. Клименко Б.В., Вировець С.В., Форкун Я.Б. Оpubл.15.06.2006 р., Бюл. №16.

Поступила 11.02.2006