

## **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 дугогасительные 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).

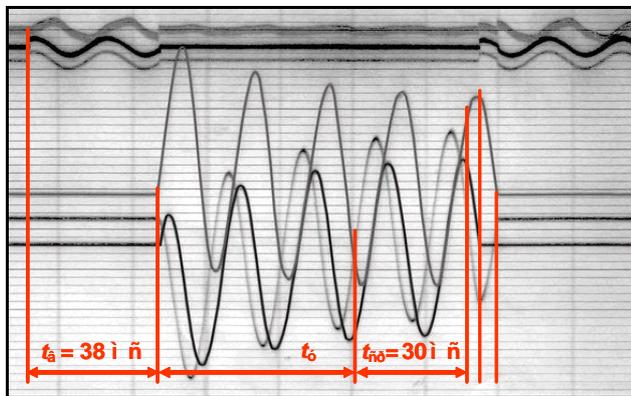


Рис. 1. Осциллограмма результатов испытаний вакуумного выключателя ВВ-4Е (цикл ВО)

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.

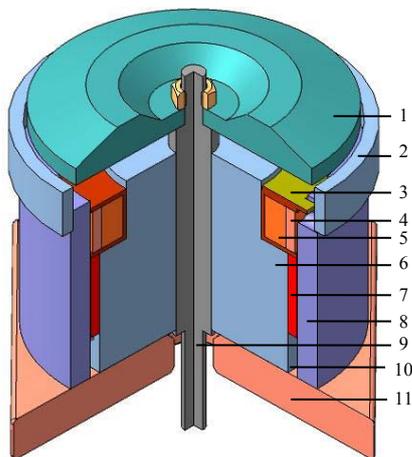


Рис. 2. Эскиз электромагнитного привода с однопозиционной магнитной защелкой:

- 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 якоре 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.

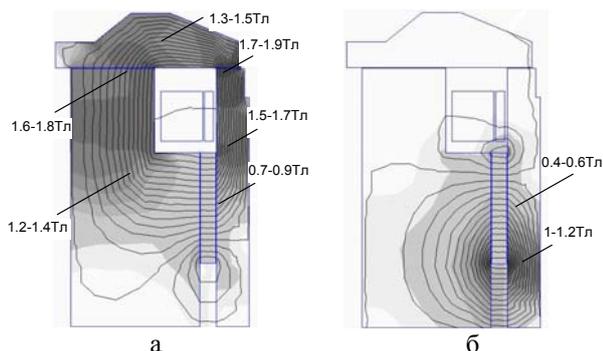


Рис. 3. Распределение магнитного поля в электромагните при притяннутом положении якоря: а - обмотки обесточены; б - при подаче импульса тока на отключающую обмотку

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.

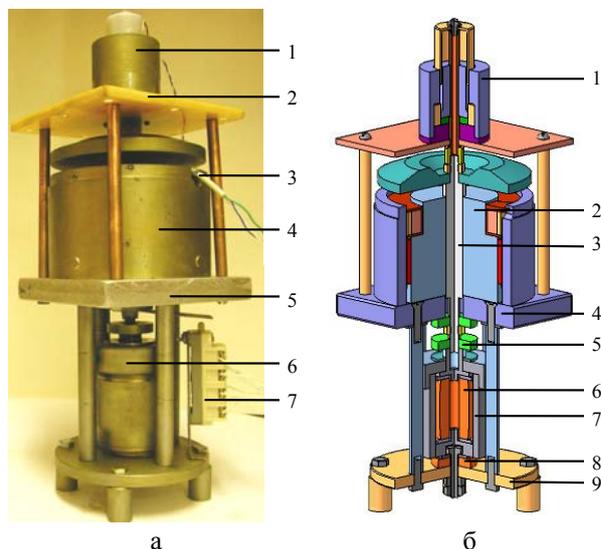


Рис. 4. Внешний вид (а) и эскиз опытной установки (б) для проведения экспериментальных исследований привода

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.

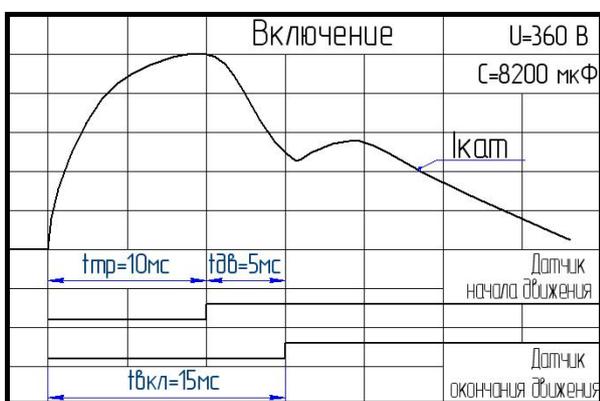


Рис. 5. Осциллограмма включения привода

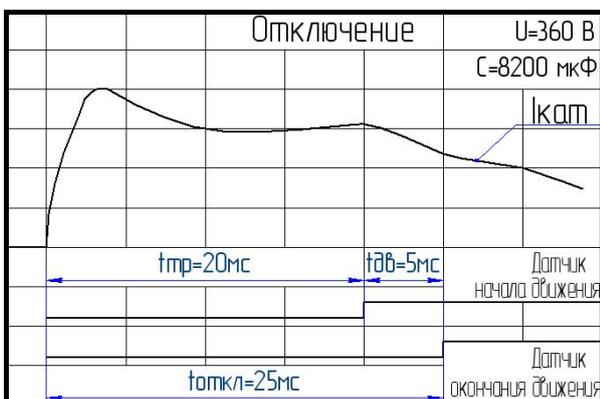


Рис. 6. Осциллограмма отключения привода

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