

## БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Лупиков В.С., д.т.н., проф., Серeda А.Г., к.т.н., доц., Литвиненко В.В.  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электрические аппараты"  
тел. (0572) 707-68-64, E-mail: lupikov@kpi.kharkov.ua.

*Розглянута модернізація швидкодіючого автоматичного вимикача постійного струму високої напруги призначеного для захисту електрообладнання електроозів в аварійних режимах роботи.*

*Рассмотрена модернизация быстродействующего автоматического выключателя постоянного тока высокого напряжения предназначенного для защиты электрооборудования электроозов в аварийных режимах работы.*

В быстродействующих автоматических выключателях, применяемых на железнодорожном транспорте [1] уменьшение времени размыкания контактов и ускорение их движения с целью повышения напряжения на дуге и, следовательно, токоограничивающей способности применены электромагнитные приводы удерживающего типа с размагничивающей шиной и отключающей пружиной. Недостатком этих выключателей является ограниченное время размыкания и движения контактов, вследствие большой инерции отключающей пружины. Кроме того, поляризованное исполнение не позволяет использовать выключатели в реверсивных силовых цепях (схемы рекуперации).

В выключателях ВАТ-48 на напряжение 1 кВ повышение токоограничивающей способности при аварийном отключении достигается применением индукционно-динамических приводов [2]. Недостатками этих выключателей являются: сложная кинематическая структура с защёлками, снижающая надежность, и однократный разрыв цепи главными контактами, ухудшающий токоограничивающую способность и затрудняющий их доработку для коммутации номинального напряжения электроозов – 3 кВ.

В наибольшей степени техническим требованиям рассматриваемых цепей отвечает выключатель, описанный в [3, 4]. В отличие от [2] выключатель имеет двойной разрыв цепи за счет применения контактной системы мостикового типа и надежную кинематическую структуру без защелок. Подвижный контакт мостикового типа обеспечивает два разрыва главной цепи, повышение напряжения на дуге и облегченные условия дугогашения. Электромагнитный привод оперативной коммутации удерживает главные контакты во включенном положении и позволяет исключить ненадежные механические защелки и блокировки. Индукционно-динамический привод аварийной коммутации, установленный на одной оси с электромагнитным приводом обеспечивает ускоренное движение подвижного контакта и эффективное токоограничение. Питание обмоток приводов осуществляется блоком управления, содержащим быстродействующие электронные ключи (тиристоры), подключающие обмотку электромагнитного либо индукционно-динамического привода к источнику питания. Быстродействующие ключи управляются датчиками максимального тока, установленными на вводной шине.

Недостатками этого выключателя являются:

- невозможность применения для коммутации напряжения 3кВ из-за пробоя воздушного промежутка между неподвижными контактодержателями через шток якоря индукционно-динамического привода. Увеличение же длины мостикового контакта значительно повышает габариты аппарата;
- якоря приводов находятся под напряжением, что снижает надежность и электробезопасность;
- отсутствие системы магнитного дутья для гашения дуги снижает токоограничивающую способность выключателя, а увеличение скорости расхождения контактов при отключении требует повышения энергии емкостного накопителя для питания приводов;
- низкий КПД индукционно-динамического привода приводит к необходимости применения повышенной энергии импульсных конденсаторов и, соответственно, габаритов, массы и стоимости аппарата;
- отсутствие защиты от перенапряжений, возникающих при отключении индуктивных цепей, снижает надежность защиты. При возникновении повышенных перенапряжений возможны повторные пробои между расходящимися контактами и затягивание горения дуги.

Преодоление указанных недостатков позволило бы использовать автоматический выключатель [3] для защиты электроозов постоянного тока в аварийных режимах работы. Повышение уровня изоляции между токоведущими частями традиционно достигается применением мостикового подвижного контакта поворотного типа [4]. В этом случае шток привода подвижного контакта выводится из области горения дуги. Применение системы магнитного дутья и введение блока ограничения перенапряжений позволяет увеличить токоограничивающую способность выключателя. Индукционно-динамические привода с магнитной системой обладают большим КПД, позволяющим снизить энергию емкостного накопителя, а, следовательно, его габариты, массу и стоимость.

Решение поставленных задач позволяет уменьшить габариты и массу выключателя, а также повысить надежность его работы и эксплуатации.

Проведем модернизацию базовой конструкции выключателя [3]. Усовершенствованная часть выглядит следующим образом (рис. 1):

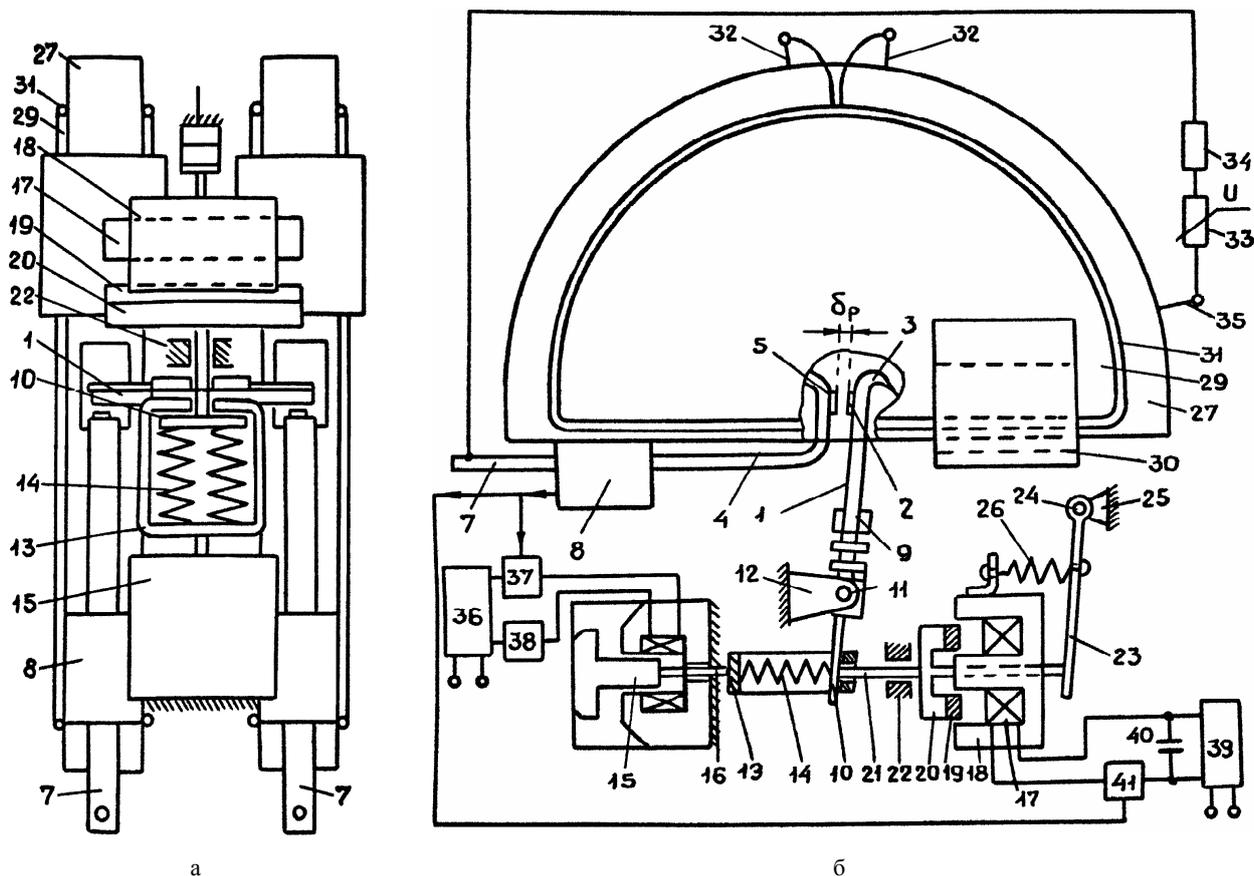


Рис. 1. Конструкция выключателя в отключенном состоянии

- контактная система содержит подвижный мостиковый контакт 1, неподвижные контакты 4 с выводными шинами 7, обойму 13, внутрь которой помещены пружины контактного нажатия 14;
- электромагнитный привод 15 служит для оперативной коммутации. Шток привода прижат к внешней поверхности обоймы 13;
- индукционно-динамический привод 18 аварийной коммутации установлен на одной оси с электромагнитным приводом 15 со стороны обоймы 13, противоположной расположению электромагнитного привода. Подвижная часть 20 индукционно-динамического привода жёстко связана со штоком 21, проходящим по оси симметрии приводов. Один конец штока жестко связан с рычагом 23 отключающей пружины 26;
- блок управления содержит датчик тока 8 и электронные ключи 37, 38, подключающие катушку электромагнитного привода к источнику питания 36. Ключ 37 выполнен быстродействующим с управлением от датчика 8, установленного на вводной шине 7 выключателя. Ключ 38 выполнен с дистанционным оперативным управлением. Электронный ключ 41 также управляется датчиком 8 и подключает катушку 17 индукционно-динамического привода к емкостному накопителю энергии 40;
- дугогасительные камеры 27 с деионными пластинами увеличивают падение напряжения на дуге;
- блок ограничения перенапряжений выполнен на элементах 33, 34.

Контактная система содержит подвижный мостиковый контакт 1, на концах которого установлены контактные напайки 2 и дугогасительные рога 3. Два неподвижных контактодержателя 4 с контактными напайками 5 жёстко связаны с выводными шинами 7. Подвижный контактодержатель 1 выполнен U-образной формы (рис. 2).

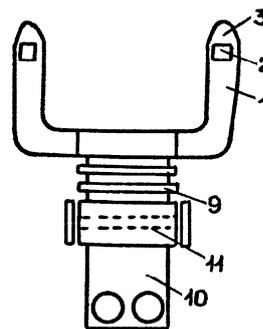


Рис. 2. Конструкция подвижной контактной системы

Изоляционная колодка 9 жёстко соединена с подвижным мостиковым контактом 1 и стальной пластиной 10. Колодка 9 выполнена с возможностью вращения на оси 11, укрепленной в неподвижных опорах 12. На шинах 7 установлены датчики тока 8. Внутри обоймы 13 установлены пружины контактного нажатия 14. Средняя часть мостикового контакта жёстко соединена с колодкой 9 с одной стороны, а пластина 10 жёстко крепится с другой стороны колодки. Колодка крепится на неподвижной оси 11,

перпендикулярной оси симметрии приводов и параллельной средней части мостикового контакта. Вторым концом пластины 10 заходит внутрь обоймы 13 и прижимается пружинами контактного нажатия к внутренней части обоймы. За счёт того, что подвижная контактная система выполнена мостикового типа U-образной формы и жёстко связана с пластиной 10 через изоляционную колодку 9, обеспечивается повышение прочности электрической изоляции между контактной системой и приводом.

Дугогасительные камеры (рис. 3) устроены по принципу деионной решетки. Внутри изоляционного корпуса 27 радиально расположены деионные пластины 28. Применение радиального расположения пластин позволяет ускорить движение дуги за счёт равномерного входа дуги в пластины и эффекта расширения сечения камеры. По бокам корпуса крепятся ферромагнитные пластины 29 системы магнитного дутья (рис. 4), соединённые между собой магнитопроводом 30. Катушки магнитного дутья 31 охватывают пластины 29. Для ускорения гашения путем равномерного распределения напряжения на дуге между обеими камерами одна катушка магнитного дутья присоединена к выводам двух деионных пластин 32 расположенных посредине своей камеры, а вторая к пластинам 32 посредине соседней камеры (рис. 5). Применение системы магнитного дутья позволяет

ускорить движение дуги, увеличить напряжение на ней и достичь существенного токоограничивающего эффекта при меньших габаритах камер, а также сохранить работоспособность при повреждении катушек и пластин. Расположение двух камер параллельно существенно снижает габариты выключателя.

При аварийном отключении индуктивных нагрузок в процессе интенсивного дугогашения могут возникнуть перенапряжения. При этом изоляция самого аппарата и отключаемой цепи подвергается опасным перегрузкам. Блок ограничения перенапряжений (рис. 3) традиционно состоит из последовательно включенного варистора 33 и резистора 34, присоединённых в каждой камере к выводной шине 7 и внешнему выводу деионной пластины 35. Пластина 35 расположена в части камеры, охваченной магнитопроводом 30. Применение варисторов позволяет устранить перенапряжения, возникающие в процессе гашения дуги. Включение резистора 34 повышает надёжность работы за счёт исключения полного перехода тока в цепь варисторов. Исключение постоянного нахождения варисторов под напряжением в отключённом и включённом состоянии выключателя обеспечивается присоединением их к пластинам 35.

Привод оперативной коммутации 15 выполнен в виде прямоходового электромагнита, якорь которого через шток 16 жёстко связан с обоймой 13.

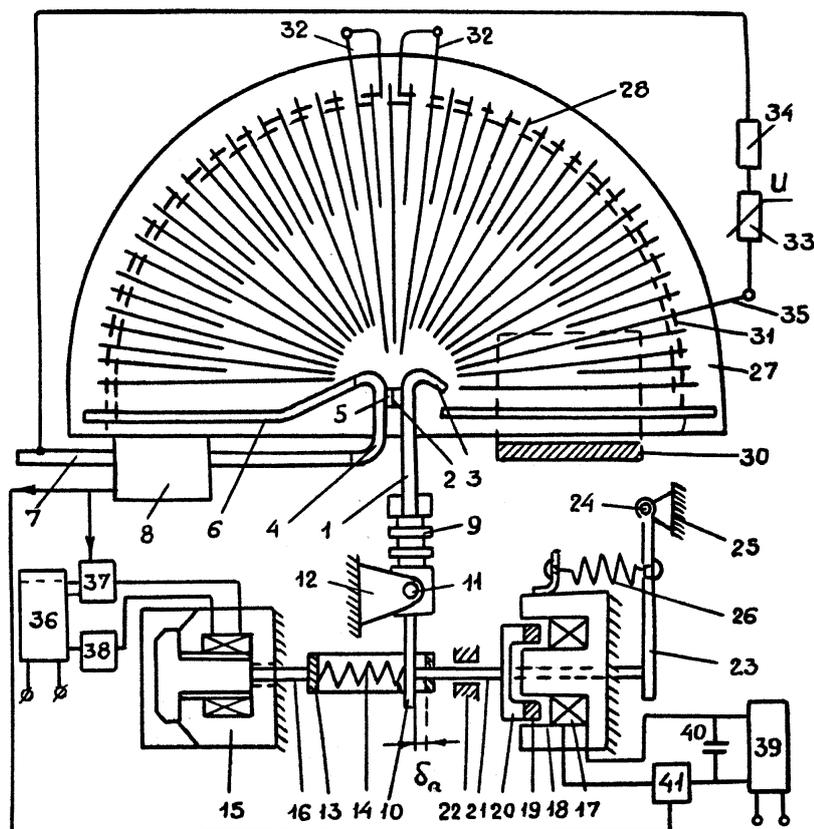


Рис. 3. Конструкция выключателя во включенном состоянии

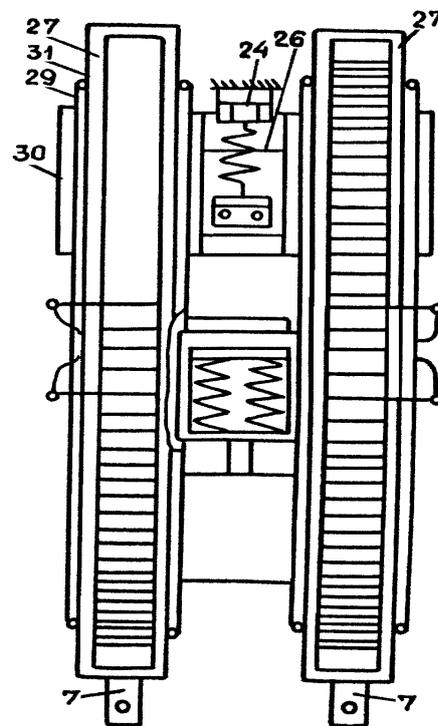


Рис. 4. Конструкция дугогасительных камер

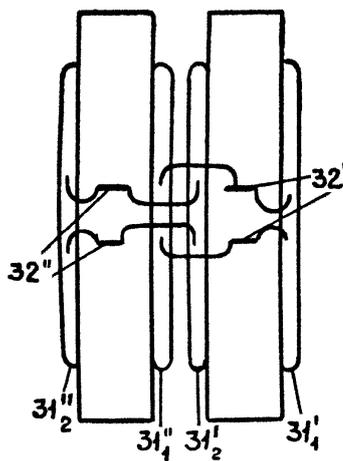


Рис. 5. Подключение катушек магнитного дутья

Привод аварийной коммутации выполнен индукционно-динамического типа. Катушка 17 располагается на среднем полюсе неподвижной шихтованной Ш-образной магнитной системы 18. Короткозамкнутый диск 19 охватывает средний полюс магнитной системы. Стальной якорь 20 жёстко скреплен с диском 19 и штоком 21. Шток проходит через отверстие в среднем полюсе, отверстие в неподвижной втулке 22 и отверстие в обойме 13. Рычаг 23, укрепленный на оси 24 может вращаться в неподвижных опорах 25. Пружина растяжения 26 связана с рычагом 23 и магнитной системой 18. Применение магнитной системы позволяет увеличить коэффициент взаимной индукции между катушкой и диском и, следовательно, увеличить электродинамическую силу, отбрасывающую диск. При заданном быстродействии это позволяет снизить энергию конденсаторов (ёмкость при заданном напряжении) и, следовательно, уменьшить габариты, массу и стоимость.

Блок управления состоит из двух источников питания. Источник 36 через электронные ключи 37 и 38 питает катушку электромагнитного привода. Источник 39 заряжает импульсные конденсаторы 40, которые через ключ 41 питают катушку 17 индукционно-динамического привода. Ключи 37, 41 выполнены в виде быстродействующих полупроводниковых коммутаторов, управляемых быстродействующим датчиком тока 8. Ключ 38 предназначен для дистанционного оперативного управления выключателем.

Выключатель работает следующим образом.

В отключенном состоянии (рис. 1) и подключенной внешней сети ключи 38 и 41 разомкнуты, а ключ 37 замкнут. Конденсатор 40 заряжен до напряжения источника 39. Катушки приводов обесточены. Пластина 10 прижата пружинами 14 к правой внутренней поверхности обоймы 13. Система из последовательных кинематически связанных узлов: рычаг 23, короткозамкнутый диск 19, якорь 20, шток 21, пластина 10, обойма 13 с пружинами 14, шток 16 и якорь электромагнитного привода 15 – смещена влево до упора якоря во внутреннюю стенку привода 15. Подвижный контакт повернут по часовой стрелке и контактные напайки 2 и 5 обоих полюсов разомкнуты. Величина контактного раствора  $\delta_p$  определяется из условия гашения малых токов.

Включение выключателя происходит при подаче напряжения управления на ключ 38. Срабатывает электромагнитный привод, якорь которого, преодолевая действие пружины 26, через шток 16 перемещает обойму 13 вправо вместе с пластиной 10 и подвижным контактом. После замыкания контактов движение пластины 10 прекращается. Движение продолжают якорь привода 15, шток 16 и обойма 13 до упора якоря в ядро. Между пластиной 10 и правой внутренней поверхностью обоймы 13 образуется зазор  $\delta_n$  (рис. 3), величина которого выбирается, исходя из необходимого провала контактов. Равномерное распределение усилия контактных пружин 14 на контактные напайки обоих полюсов обеспечивается исполнением оси 11 бочкообразной формы. При этом возможен поворот изоляционной колодки 9 вокруг оси симметрии. Во включенном состоянии по катушке электромагнитного привода 15 постоянно проходит ток от источника питания 36 через ключи 37 и 38.

Оперативное отключение выключателя осуществляется при снятии сигнала управления с ключа 38. Прекращается протекания тока через катушку электромагнитного привода 15. Вначале отходит якорь привода вместе со штоком 16 и обоймой 13 влево под действием пружин 14 (выбор провала) до соприкосновения пластины 10 с обоймой 13. Далее движение всей подвижной системы происходит под действием пружины 26 до упора якоря привода 15.

Аварийное отключение выключателя осуществляется при превышении током, протекающим через шины 7, значения тока уставки датчика 8. Датчик выдает сигналы управления на запаривание ключа 37 и включение ключа 41. Конденсаторы 40 разряжаются на катушку 17. В короткозамкнутом диске 19 наводится ток, противоположного направления току в катушке 17. Сила отталкивания между диском 19 и катушкой 17 приводит в движение якорь 20 со штоком 21 влево. Происходит ускоренный поворот пластины 10 вместе с контактной системой (колодка 9 и мостиковый контакт 1) по часовой стрелке и размыкание контактных напайки 2 и 5 в обоих полюсах. Вначале поворот контактной системы происходит без движения обоймы 13 с преодолением сил контактного нажатия. Далее при снижении тока в катушке привода 15 ниже тока отпускания якоря и после выбора провала вся подвижная система перемещается влево под действием пружины 26. Ток отпускания якоря привода 15 уменьшается с ростом контактного нажатия. После снижения тока в катушке привода 15 до нуля запирается ключ 38. Скорость поворота подвижной контактной системы определяется силой отталкивания между диском 19 и катушкой 17. Сила отталкивания определяется коэффициентом взаимной индукции между диском и катушкой. Применение магнитной системы 18 позволяет повысить коэффициент взаимной индукции и увеличить силу. Это обеспечивает возможность при заданном быстродействии уменьшить энергию разрядных конденсаторов 40.

Возникающая между контактами дуга вначале перемещается внутрь обеих камер под действием магнитного поля прилегающих контактодержателей и электродинамических сил втягивания дуги в магнит-

ную систему 30. Далее при достижении дугой пластин 32 в катушках 31 под действием напряжения дуги между пластинами 32 начинает увеличиваться ток. Этот ток вызывает магнитный поток  $\Phi$ , проходящий между пластинами 29 и замыкающийся через магнитопроводы 30 в каждой камере (рис. 6).

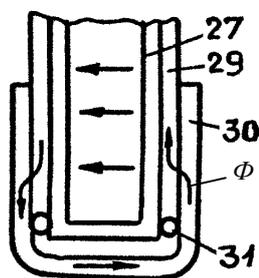


Рис. 6. Система магнитного дутья

Сила взаимодействия тока в дуге с магнитным потоком ускоряет движение дуги в камеру и разделение её на короткие дуги между деионными пластинами 28. За счёт суммы околоэлектродных падений напряжений коротких дуг и охлаждения дуги пластинами 28 общее напряжение на дугах внутри камер становится больше напряжения сети, что приводит к ограничению тока короткого замыкания и отключению цепи. Направление сил, действующих на дугу, определяется выбором направления намотки катушки 31, и не зависит от направления тока в сети, т.е. выключатель имеет неполяризованное исполнение.

Время включения катушек 31 магнитного дутья различно вследствие различного времени схода дуг с контактных напаяк. Это объясняется неоднородностью материалов и технологии изготовления контактов, а также различной скоростью движения катодных и анодных оснований дуг, в особенности при переходе с рога подвижного контакта на неподвижный рог внутри камеры. Это приводит к неравномерному росту напряжения на дуге в обеих камерах. Чтобы устранить этот недостаток, катушки магнитного дутья 31 включаются по схеме рис. 5. При таком включении при запаздывании, например, в возникновении напряжения на пластинах 32'' левой камеры её катушка 31<sub>1</sub>'', подключенная к пластинам 32' правой камеры, будет ускорять движение дуги в левой камере. Вместе с тем, катушка 31<sub>2</sub>'' будет создавать магнитное поле в своей камере. После появления напряжения на пластинах 32'' левой камеры будут включены катушки 31<sub>2</sub>' и 31<sub>1</sub>' и обеспечится взаимная "поддержка" в ускорении движения дуг. Таким образом, повышается надежность работы выключателя при обрыве одной катушки или при обгорании пластины 32 в одной из камер. Магнитное поле будет создаваться за счёт питания катушки от соседней камеры.

После уменьшения тока в сети датчик 8 прекращает выдачу сигнала. Это приводит к включению ключа 37. Так как ключ 38 заперт ранее, привод 15 повторно не срабатывает. После снижения тока в катушке 17 индукционно-динамического привода происходит запираание ключа 41 ("естественное" запира-

ние тиристора) с последующим повторным зарядом конденсаторов 40. В схеме выключателя предусмотрена блокировка, не позволяющая включить ключ 37 до полного заряда конденсаторов.

При возникновении перенапряжений, обусловленных индуктивностью отключаемой цепи, превышающих напряжение отпирания варистора 33, через него проходит часть тока главной цепи, ограничивая напряжение на дуге в каждой камере. Величина напряжения отпирания варистора выбирается по уровню допустимых кратковременных перенапряжений в сети и нагрузке. Резистор 34 предназначен для исключения полного перехода тока из цепи дуги в варистор. Это позволяет уменьшить рассеиваемую в варисторе мощность и уменьшить его габариты.

Включение варисторов непосредственно между выводными шинами или между контактами выключателя привело бы к постоянному росту тока утечки. Это снижает надежность работы и может вызвать тепловой пробой. Включение варистора в каждую камеру между выводной шиной и деионной пластиной, расположенной в камере со стороны подвижного контакта, позволяет устранить приложение напряжения сети к варистору после гашения дуги. При этом обеспечивается электробезопасность обслуживающего персонала за счет отсутствия гальванической связи между сетью и нагрузкой через ток утечки варистора.

#### ВЫВОДЫ:

1. Применение подвижной контактной системы мостикового типа U-образной формы с жестко связанной изоляционной колодкой обеспечивает повышение электрической изоляции между контактной системой и приводом и позволяет применять автоматический выключатель для защиты сетей номинального напряжения 3кВ.
2. Применение индукционно-динамического привода аварийного отключения позволяет уменьшить время размыкания главных контактов и повысить токоограничивающую способность автоматического выключателя.
3. Применение Ш-образной магнитной системы позволило повысить КПД индукционно-динамического привода и уменьшить габариты и стоимость емкостного накопителя энергии.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Голубев А.И. Быстродействующие автоматические выключатели. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 240 с.
- [2] Намитокон К.К., Ильина Н.А., Шкловский И.Г. Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
- [3] Могилевский Г.В. Привод быстродействующих автоматических выключателей // ИВУЗ Электромеханика. – 1994. – №3. – С. 36-40.
- [4] Литвиненко В.В., Луников В.С., Серeda А.Г. Повышение электрической изоляции межконтактного промежутка в быстродействующем автоматическом выключателе постоянного тока // Вісник НТУ "ХПІ". Тем. вип.: "Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – №36. – С. 65-68.

Поступила 31.08.2007