

Министерство путей сообщения РФ
Департамент кадров и учебных заведений
Самарский институт инженеров железнодорожного транспорта
им. М.Т.Елизарова

АВТОМАТИЧЕСКИЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ
ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебно-методическое пособие для
студентов специальности 101800 –
Электроснабжение железных дорог

Составитель: В.Н.Яковлев

Самара 2002

УДК 621.311.4
621.316.542

Учебно-методическое пособие по дисциплинам “Тяговые и трансформаторные подстанции” и “Городской электрический транспорт” для студентов специальности 101800 -“Электроснабжение железных дорог”.- Самара: СамИИТ, 2001.- 43 с.

В учебно-методическом пособии рассматриваются особенности устройств и принципы действия автоматических быстродействующих выключателей постоянного тока: ВАБ-28, ВАТ-42, ВАБ-43 и ВАТ-43, а также перспективы их развития.

Составитель Вениамин Николаевич Яковлев

Рецензенты: Начальник службы Электроснабжения Самарского метрополитена

В.В.Ларкин

к.т.н., доцент кафедры “Электроснабжение железнодорожного транспорта СамИИТа” Н.А.Шергунова

Подписано в печать 20.04.02

Тираж 100 Заказ № 58

1. Назначение, основные параметры, классификация и требования, предъявляемые к быстродействующим выключателям постоянного тока

Основными аппаратами, предназначенными для включения и отключения преобразователей тяговых подстанций и фидеров контактной сети при нормальном режиме эксплуатации, а также для автоматического отключения их при пробое полупроводниковых вентилей, КЗ или недопустимых перегрузок, являются быстродействующие выключатели. Быстродействующие выключатели необходимы также для защиты мощных генераторов и двигателей постоянного тока, для обеспечения защиты вращающихся электрических машин от перегрузок или коротких замыканий при круговом огне на коллекторе или другом внутреннем повреждении. Таким образом, необходимость обеспечения надёжного и бесперебойного питания мощных установок постоянного тока и преобразовательных установок обусловили создание быстродействующих выключателей в разных исполнениях. При этом основным требованием, определяющим защитные свойства выключателя и эффективность его применения, является его максимальное быстродействие.

Быстродействующими называют выключатели, собственное время отключения которых не превышает пяти тысячных долей секунды. Собственное время отключения – время между моментом достижения током величины тока уставки и появлением напряжения на контактах выключателя. Под током уставки $I_{уст}$ понимается ток срабатывания выключателя, на который он отрегулирован.

Специфической особенностью работы выключателей в цепях постоянного тока является то, что ток КЗ, в отличие от цепей переменного тока, непрерывно возрастает, стремясь к установившемуся значению. Поэтому быстродействующие выключатели являются токоограничивающими и размыкают меньший ток КЗ, чем небыстродействующие.

Характеристика выключателей постоянного тока в отношении скорости отключения или токов КЗ представлена на рис.1. Характеристика работы быстродействующего выключателя с токоограничением показана здесь кривой i' , а небыстродействующего – кривой i'' .

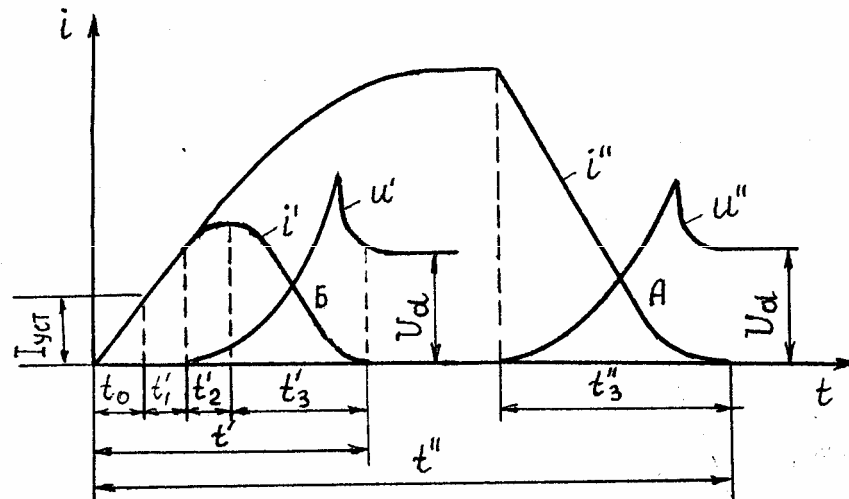


Рис.1.Кривые изменения тока и напряжения при отключении тока короткого замыкания выключателями постоянного тока: i', u' - быстродействующий выключатель; i'', u'' - небыстродействующий; U_d - напряжение выпрямленного тока

В полном времени отключения t' обычно различают три периода: продолжительность первого периода t_0 до достижения током уставки выключателя зависит от параметров цепи (R,L,C) и величины тока уставки и совершенно не характеризует качество применяемого выключателя. Это время будет одним и тем же для любых типов применяемых выключателей. Время t'_1 - собственное время отключения выключателя, является основным показателем, характеризующим быстродействие выключателя. В этот период крутизна нарастания тока обычно весьма значительна, и промедление всего в несколько миллисекунд сопровождается большим приростом тока в защищаемой цепи. Очевидно, для максимального ограничения тока КЗ, эта составляющая времени отключения должна быть возможно меньшей. Она определяется конструктивными особенностями выключателя, позволяющими быстро преодолевать механическую инерцию подвижных частей и запаздывание

нарастания магнитного потока от тока в цепи. Поэтому быстроте отключения подчинена конструкция быстродействующего выключателя любого типа. Для быстродействующих выключателей собственное время отключения измеряется тысячными долями секунды, а для небыстродействующих – десятками долей секунды.

Из рис.1 ясно, что быстродействующим выключателем ток КЗ отключается раньше, чем он достигает своего установившегося значения. Поэтому термин “быстродействующий” в последнее время часто заменяется термином “токоограничивающий”, более точно определяющим как скорость действия выключателя, так и получаемый в результате этого эффект.

С началом расхождения контактов сопротивление цепи увеличивается из-за сопротивления дуги, возникающей между контактами выключателя. Однако в течение некоторого времени (обычно нескольких миллисекунд) ток продолжает нарастать, хотя скорость нарастания его падает. Затем, когда сопротивление дуги значительно возрастает, величина тока начинает уменьшаться.

Время токоограничения характеризуется отрезком t'_2 на оси абсцисс (рис.1). Это время отсчитывается от момента расхождения контактов до момента достижения максимального тока в цепи. Время гашения дуги характеризуется временем t'_3 . За это время дуга удлиняется под воздействием магнитного дутья, попадая в пространство дугогасительной камеры ДУ выключателя. В течение времени t'_3 ток ограничивается непрерывно увеличивающимся сопротивлением дуги и при нормальной работе выключателя спадает до нуля.

Следует заметить, что при отключении больших токов быстродействующими выключателями значительная часть энергии магнитного поля, запасённая в индуктивности цепи, переходит в энергию электрического поля. Вследствие этого в конце процесса отключения при спадении тока наблюдаются перенапряжения, величина которых определяется по формуле

$u'_{\text{откл. max}} = i'_{\text{откл.}} \sqrt{L/C}$. Так как ёмкость размыкаемой цепи обычно незначительна, то перенапряжения могут достигать большой величины. Поэтому применение ДУ, активно снижающих время гашения дуги, должно производиться с учётом возможности возникновения перенапряжений, опасных для изоляции оборудования.

Соответствующие параметры, характеризующие работу небыстродействующего выключателя, обозначены на рис.1 двумя штрихами. Как видно из рассмотренных кривых (рис.1), на полное время отключения (t' ; t'') в основном влияет собственное время отключения выключателя (t'_1 ; t''_1), которое зависит от механизма отключения выключателя.

Выключатели небыстродействующие, как правило, имеют удерживающую защёлку, воздействие на которую требует значительного времени.

Весьма важным показателем выключателя является его способность отключать небольшие токи до $0,1 I_H$. Известно, что во всех выключателях дуга в камере перемещается под действием магнитного поля, которое зависит от значения тока в цепи. Чем меньше ток, тем слабее поле и хуже дугогашение. Хотя согласно стандарту на выключатели они могут не отключать токи до $0,1 I_H$. Однако на практике не представляется возможным выдержать это условие. Дело в том, что в оперативные требования по снятию напряжения с контактной сети не может быть включено условие о наличии определённой нагрузки, например, не менее 600 А для выключателей на 6000 А или 900 А для выключателей на 9000 А. Кроме того, выключатели, работающие в качестве катодных, имеют автоматическую уставку отключения 200-300 А. Тем не менее требования по наименьшим допустимым отключаемым токам не случайны, так как нежелательные последствия проявляются при снятии напряжения с контактной сети депо, а также когда на линии имеются поезда в отстое с включенными компрессорами и освещением вагонов. Отключение малых токов, как правило, приводит к появлению дуги, которая прижимается к одной

из стенок дугогасительной камеры и горит до полного снятия напряжения с шин подстанции, т.е. до отключения выпрямительных агрегатов. Ликвидация подобных явлений достигается исключением постановки в отстой поездов без отключения освещения и компрессоров или снятием напряжения с участков контактной сети, где возможны небольшие нагрузки.

Надёжность электропитания устройств электрифицированных железных дорог и тяговой сети 825 В метрополитенов, защита полупроводниковых выпрямителей во многом зависит от чёткости работы быстродействующих выключателей постоянного тока, которые можно классифицировать:

- по направлению действия – на поляризованные, срабатывающие автоматически в зависимости от направления и величины тока, и неполяризованные, срабатывающие только в зависимости от величины тока в защищаемой цепи;
- по нормальному положению контактов – на выключатели с нормально-разомкнутыми контактами, у которых пружина воздействует на подвижную часть, стремясь разомкнуть контакты; и выключатели с нормально-замкнутыми контактами, у которых усилие пружины направлено на замыкание контактов;
- по месту установки – на фидерные, служащие для защиты контактной сети при КЗ и перегрузках; катодные (обратного тока), предназначенные для отключения преобразовательных агрегатов; и анодные, устанавливаемые в цепях анодов преобразователей.

Особо высокие требования на метрополитенах предъявляют к линейным выключателям, в которых сконцентрированы защитные и коммутационные функции. Линейные выключатели должны обеспечить отключение сети при КЗ и вместе с тем не отключаться при наибольших рабочих нагрузках. Это условие выражается неравенством:

$$I_{КЗ} \succ I_{авт} \succ I_{max}, \quad (1)$$

где $I_{авт}$ - ток, при котором происходит автоматическое отключение выключателя; I_{max} - наибольший ток рабочей нагрузки.

Разница между $I_{кз}, I_{авт}$ и I_{max} в 300-400 А считается достаточной. Однако, как было сказано выше, подсчёт токов нагрузки, а особенно токов КЗ, с учётом крутизны их нарастания осложнён непостоянством значений сопротивлений тяговой сети, особенно индуктивных (из-за наличия в этой сети ферромагнитных элементов), а также из-за изменения падения напряжения в дуге в месте КЗ. Поэтому после расчёта токовой уставки линейного выключателя, как правило, выполняют её корректировку на основании практических измерений.

Главные требования к аппаратам токовой защиты: быстродействие, селективность и надёжность обеспечиваются соответствующим выбором защитных характеристик. К основным защитным характеристикам относятся: джоулев интеграл – интеграл квадрата тока, прошедшего через аппарат защиты при отключении аварии, и характеризующий её совокупное тепловое воздействие; время срабатывания (собственное время) аппарата – время от момента подачи команды на срабатывание до начала токоограничивающего воздействия; пропускаемый ток – максимальное мгновенное значение тока, проходящего через аппарат при отключении аварий; предельная коммутационная способность аппарата – наибольшее значение установившегося тока КЗ, который возник бы в цепи при отсутствии аппарата защиты. Эти и некоторые другие параметры рассматриваются ниже применительно к конкретным аппаратам защиты.

В настоящее время промышленностью выпускаются и находятся в эксплуатации на тяговых подстанциях линейные и катодные автоматические быстродействующие выключатели на следующие номинальные токи: 1500, 3000 и 6000 А и номинальные напряжения: 600, 825, 1650 и 3300 В; анодные выключатели – на выпрямлённое напряжение до 825 В и выпрямленные токи 4000 и 6000 А. Различные типы быстродействующих выключателей, широко

применяемых ранее на тяговых подстанциях, ВАБ-2, АБ-2/4, ВАБ-10, ВАБ-20 и др. в связи с моральным старением сняты с производства и заменены на более совершенные. В настоящее время изготавливают выключатели типа ВАТ-43, которые применяют для защиты от токов КЗ и перегрузки в линейных присоединениях 600 В, и типа ВАБ-43 – для защиты от токов обратного направления и устанавливаемые в катодных цепях преобразователей для селективного отключения последних в случае внутренних повреждений.

Практически все типы отечественных быстродействующих выключателей, не уступавших и не уступающих по своим основным показателям лучшим зарубежным образцам, разрабатывались под руководством и при участии конструкторов А.И.Голубева и А.М.Кусуля.

Рассмотрим конструкции и принцип действия наиболее распространённых выключателей. Технические характеристики выключателей постоянного тока приведены в табл.1 (выключатели ВАТ-42 и ВАТ-43 имеют аналогичные характеристики, как у ВАБ-42, за исключением собственного времени отключения).

Таблица 1

Технические характеристики быстродействующих
выключателей постоянного тока

Выключатели	Назначение	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Пределы регулировки и РДШ, А	Ток удержания ДК, А	Ток выключения, А	Число пар главных контактов	Наибольший отключающий ток, кА
ВАБ-28-3000/15К ВАБ-28-6000/15К	Отключение обратных токов	3000 6000	825 825	Не нормируется	1,1 1,1	55 55	1 2	30 30*
ВАБ-28-3000/15Ф ВАБ-28-6000/15Ф ВАБ-42-4000/10 ВАБ-42-6000/10 ВАБ-42-9000/10	Отключение КЗ и перегрузок	3000 6000 4000 6000 9000	825 825 1050 1050	2400-6000 6000-12000 4800-8200 8000-2400	1,1 1,1 2,5 5	55 55 60 1200	1 2 2 2	30* 30* 50 70
6ХВАБ-43/1-3000 6ХВАБ-43/1-6000	Защита выпрямителя от внутренних повреждений	3200 6300	1050	-	-	180	6	70

*В эксплуатации выключатели ВАБ-28 отключают токи до 55 кА.

Выключатели имеют условные обозначения, характеризующие их исполнение и назначение. Например, условное обозначение выключателя ВАБ-28-3000/30-Л расшифровывается следующим образом: В – выключатель; А – автоматический; Б – быстродействующий; порядковый номер конструкции 28; номинальный ток 3000 А; номинальное напряжение до 3000 В; Л – линейный. Место установки выключателей обозначается буквой: К – катодный; Ф – фидерный; Т – токоограничивающий; У – климатическое исполнение, а категория размещения - следующей за ней цифрой.

2. Выключатели типа ВАБ-28

Для защиты преобразовательных установок повышенной мощности при номинальном напряжении 3300 В применяют быстродействующие выключатели типа ВАБ-28, обладающие повышенной мощностью отключения.

Для повышения отключаемой мощности быстродействующий выключатель типа ВАБ-28 имеет две пары последовательно включённых контактов, которые разрывают защищаемую цепь одновременно в двух местах. Каждая пара контактов, неподвижный и подвижный, разрывает цепь тока в отдельной дугогасительной камере с магнитным дутьём. Обе дугогасительные камеры расположены рядом, над механизмом выключателя, общим для обеих контактных групп.

Выключатель ВАБ-28 (рис.2 и табл.1) в зависимости от назначения и номинального тока имеют восемь исполнений. По характеру отключаемых цепей быстродействующие выключатели типа ВАБ-28 делятся на линейные (фидерные) и катодные.

Линейные выключатели постоянного тока ВАБ-28 выпускают в комплекте с реле - дифференциальным шунтом РДШ, которое выполняет функции максимально-импульсного реле тока. Оно имеет два исполнения на номинальный ток: 3000 А (РДШ-1) и 6000 А (РДШ-2). При значительных нагрузках на фидере для повышения номинального тока выключателя ВАБ-28-3000/30-Л силовые контакты могут быть соединены параллельно и номинальный ток увеличен до 6000 А. В этом случае для сохранения прежней отключающей способности необходимо включать последовательно два выключателя, приводимых в действие одним вспомогательным реле РДШ-2.

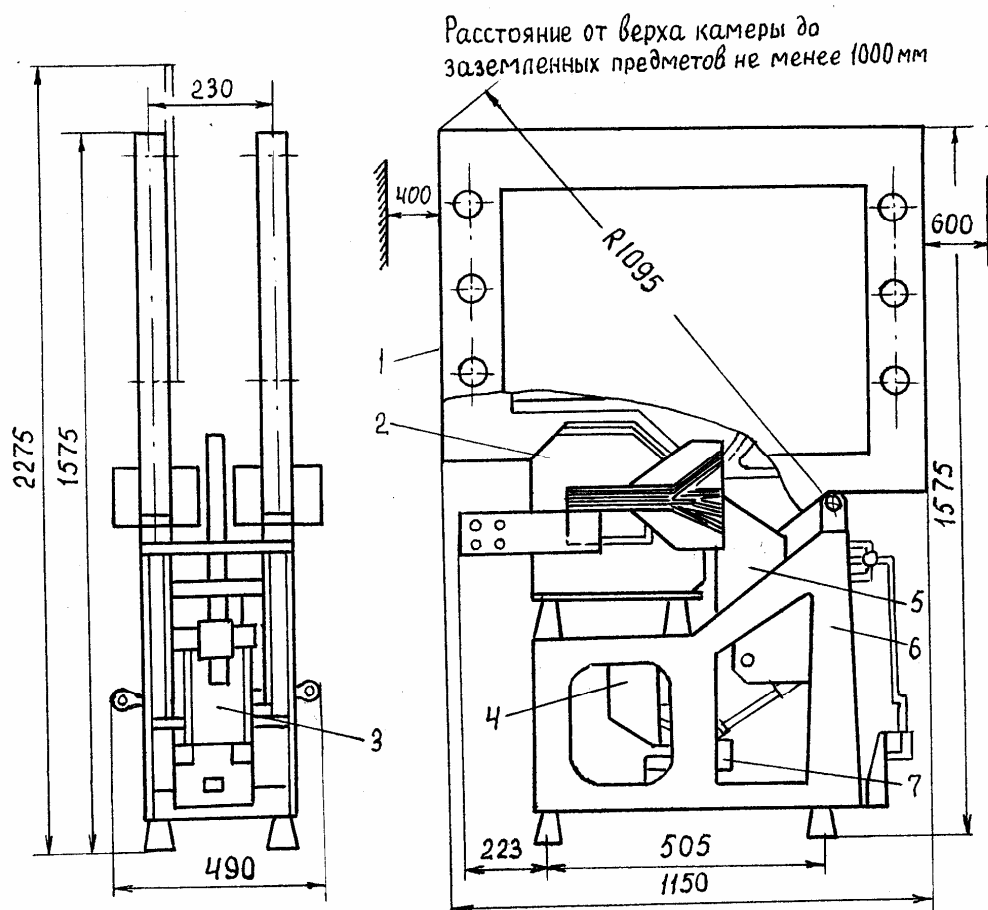


Рис.2. Общий вид быстродействующего выключателя типа ВАБ-28: 1 – камера дугогашения; 2 – неподвижный контакт; 3 – магнитопровод; 4 – якорь; 5 – подвижный контакт; 6 – корпус; 7 – удерживающая катушка

Катодный выключатель ВАБ-28-3000/30-К отличается от ВАБ-28-3000/30-Л наличием шины, проходящей через отверстие в магнитопроводе выключателя.

Из существующих конструкций наиболее универсальны быстродействующие выключатели типа ВАБ-28 на номинальные токи от 1,5 до 6 кА и номинальные напряжения от 825 до 3300 В. Общий вид выключателя типа ВАБ-28 и основные установочные размеры приведены на рис.2.

Отключение выключателя осуществляется мощными пружинами, воздействующими на контактные рычаги при размыкании цепи удерживающей катушки или при размагничивании сердечника выключателя витком главного тока. Размыкание цепи удерживающей катушки при автоматическом

отключении выключателя производится контактами специального быстродействующего реле типа РДШ (рис.3).

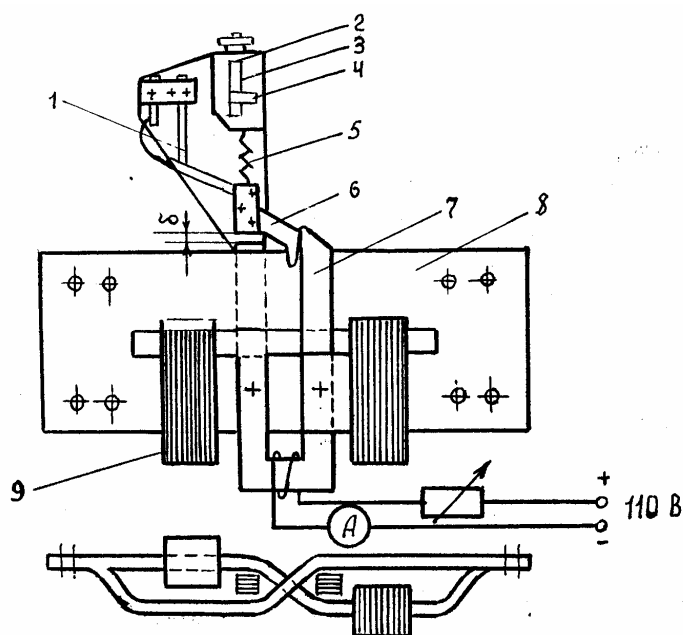


Рис.3. Общий вид реле типа РДШ: 1 – контакты; 2 – скоба; 3 – шкала; 4 – стрелка; 5 – пружина; 6 – якорь; 7 – магнитопровод; 8 – шина; 9 – пакеты электротехнической стали

Основным элементом максимального токового реле с дифференциальным шунтом типа РДШ является выполненный из шихтованной стали П-образный магнитопровод, шарнирно связанный с якорем. Обмоткой реле служит дифференциальный шунт – два параллельно соединённых отрезка шин, по которым проходит ток защищаемой цепи. Каждый из этих отрезков образует вокруг магнитопровода два полувитка, при прохождении тока по которым в сердечнике реле возникают магнитные потоки, направленные встречно. На одном из отрезков шин установлены два пакета, изготовленные из листов трансформаторной стали. Индуктивность этого участка шин значительно больше индуктивности параллельно включенного отрезка и зависит от количества стальных листов в пакете. Так как сечение шин, образующих полувитки, одинаково, то суммарный магнитный поток в магнитопроводе реле при прохождении постоянного по величине или медленно изменяющегося тока близок к нулю и не может вызвать срабатывание реле. При возникновении КЗ

ток нарастает по экспоненте и в нижнем шинном отрезке возникает ЭДС $Ldi_{ниж.}/dt$, препятствующая прохождению тока в нём. В результате большая часть тока течёт по верхнему шинному отрезку, появляется МДС, которая вызывает срабатывание реле, и якорь притягивается к полюсу, размыкая контакты.

Чем больше скорость нарастания тока, тем быстрее срабатывает реле, т.к. срабатывает оно значительно раньше, чем ток достигает статической уставки. Изменяя натяжение пружины винтом, можно регулировать ток статической уставки, которая указывается стрелкой на шкале.

Принцип действия быстродействующего выключателя типа ВАБ-28 проиллюстрируем схемой, приведённой на рис.4.

Основу электромагнитного механизма выключателя составляет С-образный электромагнит постоянного тока с удерживающей катушкой и якорь. Якорь может поворачиваться вокруг оси O_1 от положения “Включено” до упора в положение “Отключено”. В положении “Включено” якорь удерживается усилиями электромагнитного притяжения, создаваемого катушкой, по которому проходит постоянный ток. Магнитная система электромагнита замкнута, когда выключатель находится в положении “Включено”, и поэтому для удержания якоря требуется незначительная Н.С. (намагничивающая сила). Чтобы включить выключатель, необходимо значительно повысить ток в катушке, что может быть осуществлено контактом K , контакты которого в этот момент шунтируют дополнительное сопротивление $R1$. Когда якорь притянут к полюсам электромагнита, то пружины стянуты, причём, пружина 6 осуществляет необходимое нажатие между контактами 7 и 8, а пружина 5 предназначена для обеспечения достаточного ускорения подвижного контакта 7 и в момент отключения. Тяга, связывающая вспомогательный якорь с контактом 7, позволяет осуществлять свободное расцепление в выключателе, сущность

которого сводится к тому, чтобы не дать сомкнуться контактам 7 и 8 ранее, чем будет снята блокировка с катушки 2.

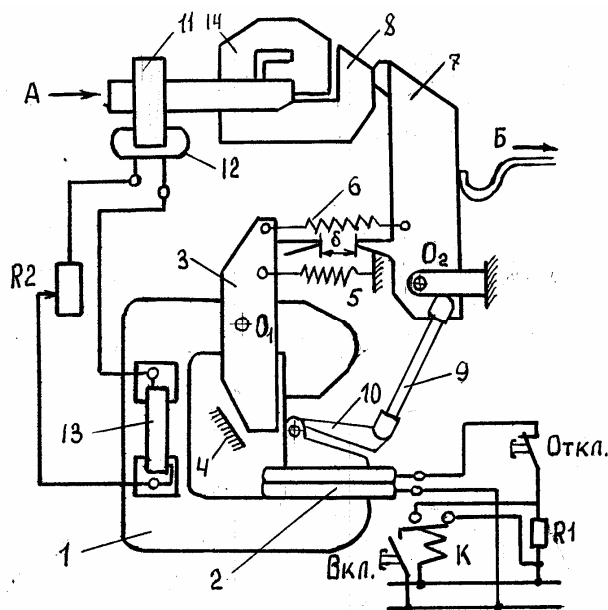


Рис.4. Электромагнитный механизм выключателя типа ВАБ-28: 1 – электромагнит; 2 – удерживающая катушка; 3 – якорь; 4 – упор; 5,6 – пружина; 7,8 – контакты; 9 – тяга; 10 – вспомогательный якорь; 11 – сердечник; 12 – обмотка; 13 – отключающая катушка; 14 – катушка магнитного дутья

Ток защищаемой выключателем цепи входит в шину А, а выходит через шину Б. На одной из выходных шин выключателя, например на шине А, размещается сердечник (из электротехнической стали), на котором расположена обмотка, выводные концы которой через дополнительное сопротивление R_2 соединены с отключающей катушкой выключателя. Ось отключающей катушки расположена под углом 90° по отношению к направлению потока в магнитопроводе 1 и её витки проходят в окна, проделанные в магнитопроводе 1. Благодаря такому расположению отключающей катушки, выключатель отключается, как только ток в цепи этой катушки достигает некоторой величины, независимо от его направления.

При обратном направлении тока, протекающего через выключатель, происходит резкое падение его величины в цепи (ток переходит через нулевое значение), вызывая ЭДС в обмотке. Эта ЭДС вызывает появление тока в цепи отключающей катушки 13. Магнитный поток отключающей катушки насыщает

участки магнитопровода электромагнита, что приводит к резкому увеличению магнитного сопротивления на пути основного потока. Сила притяжения якоря уменьшается, и он начинает двигаться под действием пружин 5 и 6. Большая скорость размыкания подвижного контакта 7 достигается за счёт кинетической энергии якоря, полученной им при разгоне. После выбора зазора δ эта энергия ударом передаётся контакту 7. Регулирование тока срабатывания производится сопротивлением $R2$.

Гашение электрической дуги осуществляется в продольно-щелевой камере из асбестоцемента, имеющей три параллельные щели.

Принцип действия магнитной системы катодных выключателей БАОД-ов поясняется на рис.5. Выключатель ВАБ-28 в цепи катода не имеет реле РДШ. В этом случае для отключения выключателя при обратном токе используются шинки, проходящие через окна в магнитопроводе.

Магнитный поток Φ_2 отключающего витка при обратном (нерабочем) направлении тока (рис.5,а) в области подвижного якоря направлен навстречу основному магнитному потоку Φ_1 держащей катушки и стремится уменьшить его.

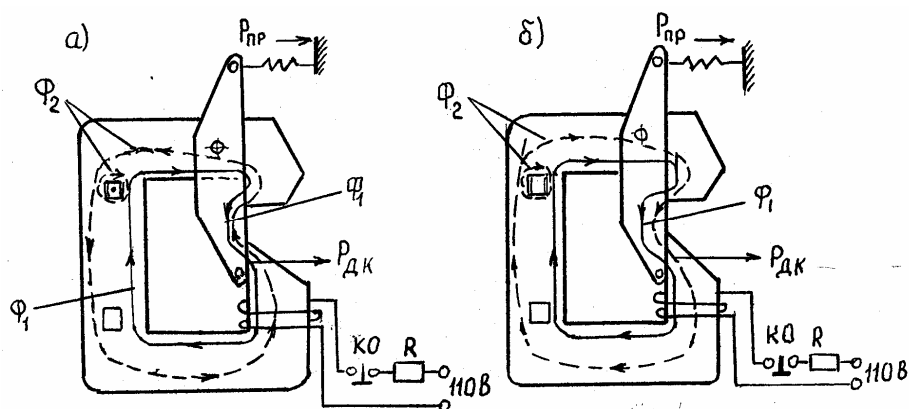


Рис.5. Направление магнитных потоков в электромагните выключателя ВАБ-28К при прохождении тока обратного направления (а) и прямого тока (б); Φ_1 – магнитный поток от тока держащей катушки (ДК); Φ_2 – магнитный поток от тока отключающего витка

В той части магнитопровода, где отключающий виток проходит через отверстие, в тот же момент создаётся сильное насыщение участка

магнитопровода, имеющего сравнительно небольшую площадь сечения. В результате при токе 200-300 А мгновенно прекращается действие удерживающего магнитного потока. Наступает преобладание отключающей силы $P_{ПР}$ над силой $P_{ДК}$, и выключатель отключается.

При прямом (рабочем) направлении тока (рис.5,б) магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 в области соприкосновения якоря с магнитопроводом имеют согласное направление, т.е. с увеличением тока увеличивается и результирующая удерживающая сила. При токе 2000-3000 А магнитный поток Φ_2 в состоянии удержать якорь во включенном положении при обесточенной держащей катушке (ДК). Это явление опасно тем, что при оперативном отключении выключатель будет удерживаться под действием тока основной цепи. Для исключения подобного явления схемы управления выключателями обратного тока предусматривают переполюсовку ДК при отключении. Практикуется также программное отключение выпрямителя, когда БАОД отключается после выключателя 6-10 кВ, т.е. без нагрузки.

Оперативное управление катодным выключателем ВАБ-28 производится на постоянном токе при помощи универсального переключателя SA1 (рис.6,а). Включение выключателя осуществляется поворотом SA1 в положение “Вкл” (-45^0), при этом контакт SA3 в цепи 1-2 остаётся замкнутым и замыкается SA2 в цепи 5-8, включая цепь катушки контактора КМ. Контакты контактора шунтируют добавочный резистор $R2$ в цепи держащей катушки YA1. В последний ток увеличивается с 1 до 50 А при 220 В или до 100 А при 110 В, и якорь притягивается. Однако механизм свободного расцепления удерживает контакты от включения, пока по катушке YA1 протекает большой ток. В результате притяжения якоря 3 (рис.4) блокировочные контакты QF (рис.6) в цепи 7-8 и QF в цепи 11-12 замыкаются, а блок-контакт QF в цепи 9-10 разрывается. Одновременно блок-контакт QF в цепи 5-8 разрывает цепь катушки контактора КМ. Контактор отключается, и поэтому его контакты в цепи 3-4 дешунтируют резистор $R2$ и ток в держащей катушке резко

уменьшается до 1 А, вследствие этого якорь механизма свободного расцепления отпадает от магнитопровода, и выключатель включается.

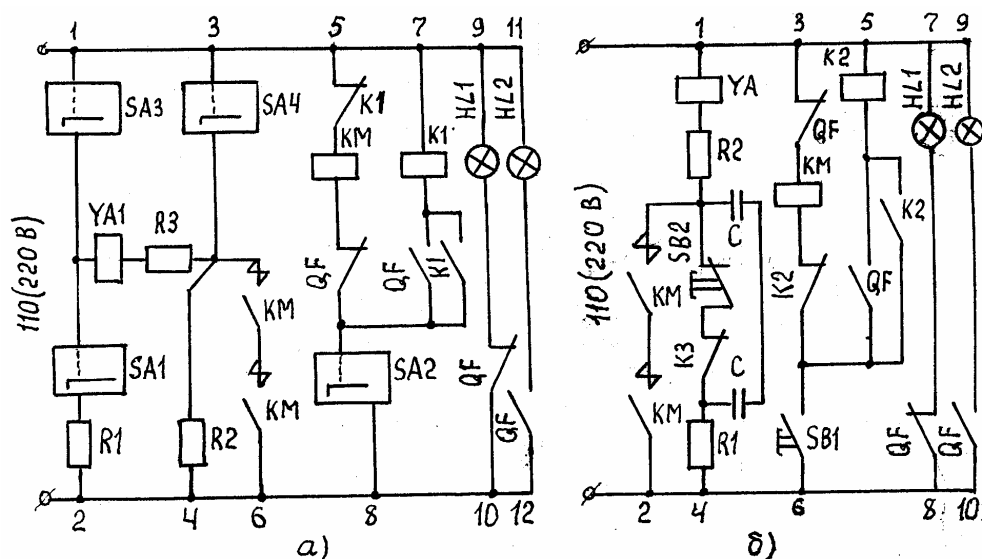


Рис.6. Принципиальные электрические схемы управления выключателями ВАБ-28 катодным (а); линейным (б)

Замыкаясь, контакты QF включают катушку реле $K1$, которое в свою очередь, размыкает контакты $K1$ в цепи 5-8 и замыкает контакт $K1$ в цепи 7-8. Контакт $K1$ предотвращает “звонковость” выключателя, возможную при включении выключателя на короткое замыкание. При отпускании рукоятки переключатель $SA1$ возвращается в нулевое положение. Контакт $SA2$ размыкается, и реле $K1$ возвращается в исходное положение. По державке катушки выключателя длительно протекает ток около 1 А.

Для оперативного отключения выключателя необходимо поменять направление тока в державке катушки для компенсации потока, создаваемого рабочим током. Это осуществляется поворотом $SA1$ в положение “Отк” ($+45^0$).

В схеме управления линейным выключателем (рис.6,б) автоматическое отключение выключателя осуществляется контактом $K3$ (реле РДШ). Параллельно с контактом $K3$ в цепь державки катушки YA включены последовательно два конденсатора ёмкостью 0,5 мкФ. При размыкании контакта РДШ в цепи возникает колебательный процесс спада тока. Вследствие отрицательной полуволны тока уничтожается остаточная намагниченность магнитопровода, что обеспечивает быстрдействие выключателя.

Технические нормы и требования по регулировке и испытанию быстродействующих выключателей:

Тип выключателя	ВАБ-28	ВАБ-42
Тяжение главных пружин, Н.....	1470-1764	-
Контактное нажатие, Н	225-245	343-392
Провал искрогасительных контактов, мм	2-3	2-2,5
Расстояние между контактами, мм	9-10	10-14
Зазор между осью тяги подвижного контакта и упором якоря, мм	-	1,5-2
Зазор между толкателями, мм	1,4-2	-
Ток держащей катушки, А	0,8-1,2	1-1,3
Сопротивление держащей катушки, Ом	$2 \pm 0,2$	-
Опробование выключателя трёхкратным включением при $U_{НОМ}$:		
125 В	x	x
88 В	x	x
Ток отпадания якоря, А, не менее	0,6	0,6
Проверка сопротивления изоляции мегомметром с $U=1000$ В, Ом	$30 \cdot 10^6$	$30 \cdot 10^6$
Испытание диэлектрической прочности, кВ	5	5

3. Выключатели типов ВАБ-42 и ВАТ-42

Быстродействующие автоматические выключатели ВАБ-42 и ВАТ-42 представляются по техническим условиям ТУ 16-520.160-75 и предназначены для защиты тиристорных преобразователей и других установок постоянного тока на номинальные напряжения 230, 460, 660 и 1050 В. Напряжение на дуге выключателя не превышает соответственно 540, 1060, 1400 и 2100 В. Собственное время срабатывания при максимальном значении аварийного тока и начальной крутизне его нарастания не менее $3 \cdot 10^6$ А/с для выключателя ВАТ-42 составляет 0,002 с, а для выключателя ВАБ-42 – 0,007 с. Выключатели выпускаются на номинальные токи 2; 4; 6,3 и 10 кА.

Ресурс выключателей по электрической износостойкости, определяемой количеством отключений тока до 45 кА без зачистки контактов и подрегулировки, составляют 15 циклов. Ресурс по механической

износостойкости, определяемый количеством выключений и отключений при отсутствии тока в главной цепи, для выключателей с $I_{НОМ}=2$ кА равен 5000, а для выключателей с $I_{НОМ}=4; 6,3$ и 10 кА – 10^4 циклов. Срок службы выключателей 20 лет.

Выключатели состоят из унифицированных конструктивных блоков. Выключатель ВАБ-42 состоит из дугогасительной камеры, индукционно-динамического привода, полюса, рукоятки, пластины заземления, тележки, панели, изоляционного экрана, контактной системы цепей управления, защёлки и упора на раме шкафа (рис.7). Дугогасительная камера и полюс показаны на рис.8. Контактный узел полюса включает в себя главный неподвижный контакт и главный подвижный контакт. Неподвижный контакт одновременно исполняет роль катушки магнитного дутья. Главные контакты выключателя защищаются

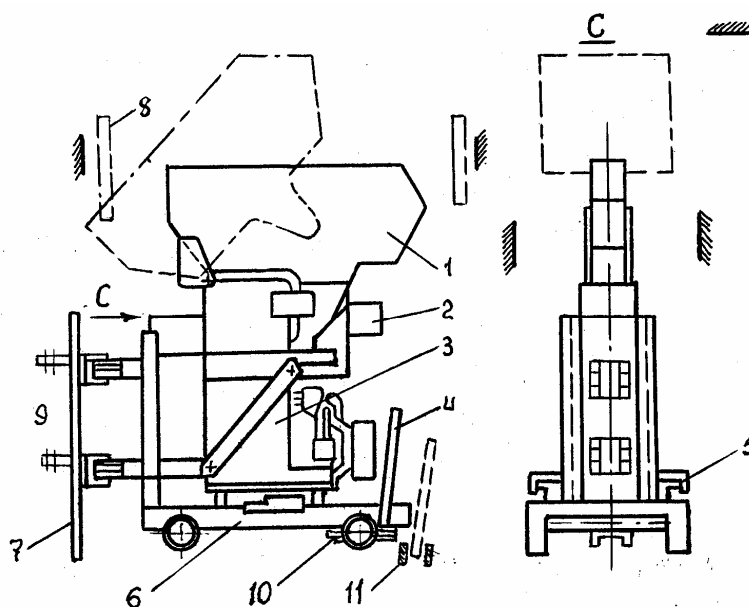


Рис.7.Конструкция выключателя ВАТ-42: 1 – дугогасительная камера; 2 – индукционно-динамический привод; 3 – полюс; 4 – рукоятка; 5 – пластина заземления; 6 – тележка; 7 – панель; 8 – изоляционный экран; 9 – контактная система цепей управления; 10 – защёлка; 11 – упор

от обгорания дугогасительным контактом. Вблизи главных контактов расположены электроды, по которым перемещается дуга, образующаяся при отключении главных контактов.Механизм свободного расцепления включает в себя магнитопроводящую скобу, защёлку, пружину, рычаг и якорь.

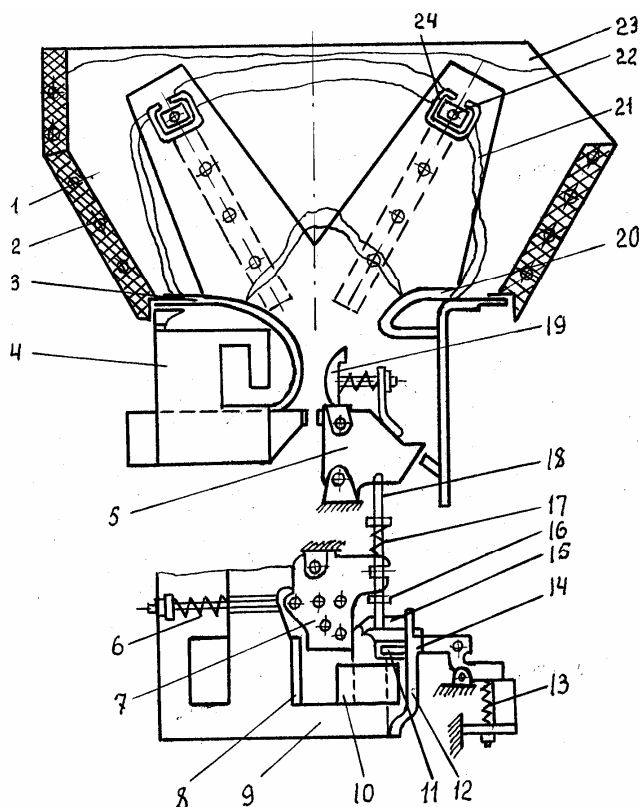


Рис.8.Дополнительная камера выключателя ВАТ-42: 1 –дугогасительная камера; 2 – торцовые вставки; 3,20,24 – электроды (рога); 4 – главный неподвижный контакт; 5 – главный подвижный контакт; 6 – отключающая пружина; 7,11 – якорь; 8,15 – упор; 9 – магнитопровод; 10 – катушка; 12 – магнитопроводящая скоба; 13 – пружина; 14 – защёлка; 16 – рычаг; 17 – возвратная пружина; 18 – тяга; 19 – дугогасительный контакт; 21 – перегородки; 22 – П-образный магнитопровод; 23 – щиты

Быстродействующий привод включает в себя электромагнит, состоящий из катушки, магнитопровода и якоря, отключающую пружину и упор. Быстродействующий привод связан с подвижным контактом с помощью тяги, возвратной пружины и упора. Тяга связана с рычагом.

Дугогасительная камера содержит асбоцементные наружные щиты, торцовые вставки, внутренние V-образные перегородки, П-образные магнитопроводы, на которых закреплены рогаобразные электроды.

Выключатель ВАБ-42 и ВАТ-42 снабжены реле РДШ-300 (рис.9) для подачи сигнала на отключение путём разрыва цепи удерживающей катушки.

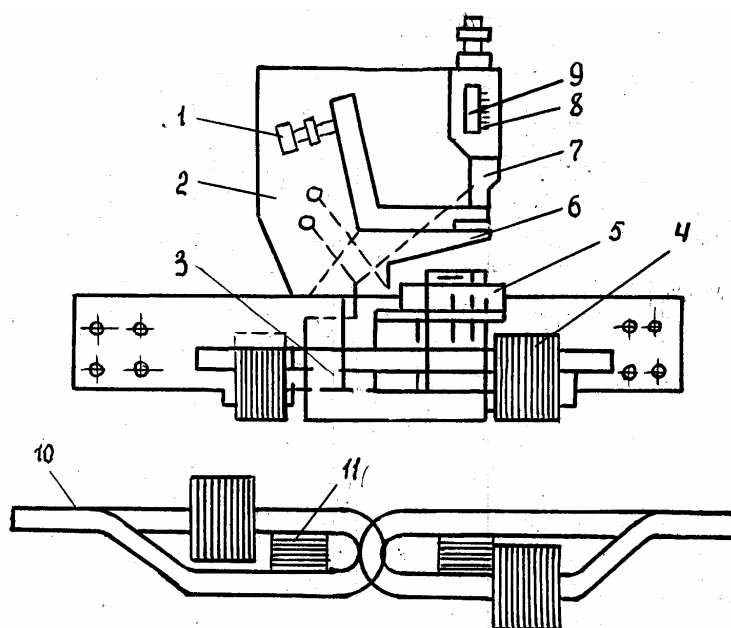


Рис.9. Реле РДШ-300: 1 –размыкающий контакт; 2 – панель; 3,11 – магнитопровод; 4 – пластины; 5 – катушка; 6 – якорь; 7 – пружина; 8 – шкала; 9 – стрелка; 10 – токоведущая шина

Токоведущая шина этого реле разделена на две параллельные ветви, на одну из которых насажены пластины из электротехнической стали. К шине прикреплены магнитопровод с панелью, на которой расположены стрелка и шкала со значением уставки и размыкающим контактом. Уставка регулируется натяжением пружины при определённом зазоре между якорем и магнитопроводом.

С помощью катушки осуществляется проверка уставки реле. При быстром нарастании тока КЗ значение уставки реле снижается. Это вызвано тем, что проходящие через магнитопровод токи двух ветвей шины направлены навстречу друг другу.

П р и н ц и п р а б о т ы в ы к л ю ч а т е л я. Во включённом положении ток защищаемой цепи проходит через замкнутые главные контакты (рис.8). Якорь удерживается в притянутом положении при помощи магнитного потока, создаваемого постоянным током в катушке, которая выполняет функции и удерживающей, и включающей катушки. Сила магнитного притяжения якоря превышает противодействующие усилия, создаваемые пружинами. Возвратная пружина стремится переместить тягу вверх и таким

путём создаёт контактное давление. Во включенном положении выключателя одновременно с притяжением якоря притягивается также и якорь, который взводит пружину в механизм свободного расцепления. Однако под действием магнитного потока рассеяния катушки якорь не может удерживаться в притянutom положении и под действием пружины возвращается в исходное состояние, ударяет по защёлке и освобождает тягу, обеспечивающую замыкание главных контактов.

При возникновении аварийного тока команда на отключение выключателя подаётся с помощью реле РДШ-300. Если аварийный ток возрастает быстро, например, при КЗ, то соотношение между токами, протекающими в двух ветвях шины (рис.9), будет определяться их индуктивным сопротивлением. Поскольку на ветвь меньшего сечения насажены стальные пластины, её индуктивное сопротивление велико. Это приводит к возрастанию разности токов и срабатыванию реле раньше, чем ток цепи достигает значения уставки. Если аварийный ток нарастает медленно, то разность токов в ветвях шины будет определяться соотношением активных сопротивлений этих ветвей. Действующая в этом случае небольшая разность токов создаёт магнитный поток, который при появлении в защищаемой цепи тока, равного току уставки, обеспечивает притяжение якоря к магнитопроводу и, значит, размыкание отключающего контакта, включенного в цепь удерживающей катушки (рис.8) выключателя. Параллельно контактам реле в цепи удерживающей катушки выключателя включены конденсаторы. Благодаря их наличию при размыкании контактов возникает колебательный процесс, устраняющий остаточную намагниченность магнитопровода и обеспечивающий быстрое действие выключателя. При размыкании удерживающей катушки (рис.9) якорь отходит от сердечника и ударяет по упору тяги. Это приводит к размыканию сначала главных контактов, а затем дугогасительных. Возникающая на дугогасительных контактах дуга выдувается вверх по электродам под действием магнитного поля П-образных магнитопроводов. Внутренние V-образные перегородки дугогасительной

камеры имеют суживающиеся к верху концы и удлинённое основание. Эти перегородки образуют узкую продольную щель, в которой дуга растягивается и гаснет.

Для управления выключателем используется специальная контактно-полупроводниковая схема, построенная на стандартных элементах. Существенное повышение быстродействия выключателей типа ВАТ-42 по сравнению с выключателями ВАБ-42 достигнуто за счёт специального индукционно-динамического привода (ИДП) (рис.10).

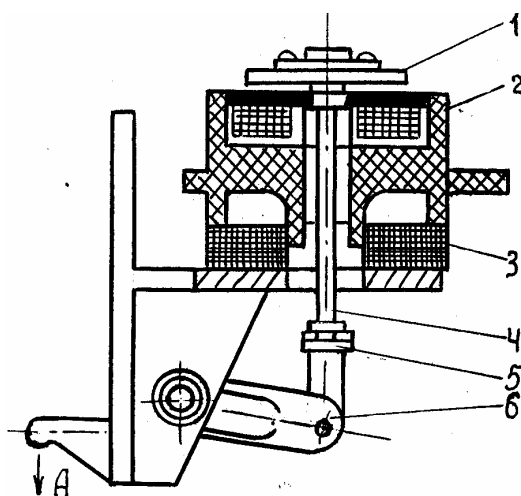


Рис.10. Индукционно-динамический привод выключателя ВАТ-42: 1 – диск; 2 – катушка; 3 – прокладки; 4 – тяга; 5 – гайки; 6 – рычаг

В серийных быстродействующих выключателях ВАТ-42 используется ИДП, позволяющая снизить собственное время срабатывания до 0,002 с и значительно повысить быстродействие аппарата. В быстродействующих выключателях ВАБ-42 без ИДП собственное время срабатывания достигает 0,007 с.

ИДП состоит из медного диска, катушки, прокладки, тяги, гайки и рычага. При достижении аварийным током определённого уровня от системы управления в катушку ИДП поступает импульс тока от предварительно заряженной батареи конденсаторов. При этом в диске индуктируются токи обратного направления. Взаимодействие этих токов с полем катушки приводит

к тому, что диск отталкивается от неё и через тягу и рычаг воздействует на подвижный контакт выключателя в направлении, указанном стрелкой А.

Выключатели ВАБ-42, ВАТ-42 и ВАТ-43 имеют аналогичные взаимозаменяемые узлы-блоки и относятся к аппаратам, чьи пружины являются движущей силой контактов при отключении. В процессе эксплуатации на тяговых подстанциях метрополитена и испытаний выключатели отличаются высокой надёжностью в работе при отключении аварийных токов до 70 кА.

Выключатель ВАБ-42-9000/10 (табл.1) скомплектован из двух полюсов ВАБ-42-6000/10, смонтированных на общем изоляционном основании. Линейные выключатели не поляризованы и снабжены датчиками отключения – реле РДШ. Катодные и анодные выключатели поляризованы и их отключение обеспечивается при взаимодействии потоков главной цепи и держащего магнита.

Защитные характеристики выключателя ВАТ-42 для режима сквозного прорыва инвертора силового полупроводникового преобразователя исследованы в контурах постоянного тока с параметрами: $U_K=660$ и 850 В, $I_{Kmax}=108$ кА, $L=0,07\div 1$ мГн. Диапазон уставок срабатывания находился в пределах 4-25 кА. На рис.11 показаны осциллограммы тока и напряжения в выключателе на номинальный ток 6,3 кА. Быстродействие выключателя определяется суммой следующих составляющих:

- $\Delta t_{дин}$ - время между моментами прохождения тока через значения динамической $I_{дин}$ (по скорости нарастания аварийного тока dI/dt) и статической и $I_{ст}$ (по значению аварийного тока I) уставок срабатывания РДШ;
- Δt_C - собственное время срабатывания выключателя – время от момента прохождения тока через значение динамической уставки до начала расхождения контактов;

- $\Delta t_{зд}$ - время задержки дуги – время от момента появления дуги на контактах до начала нарастания напряжения на дуге по линейному закону.

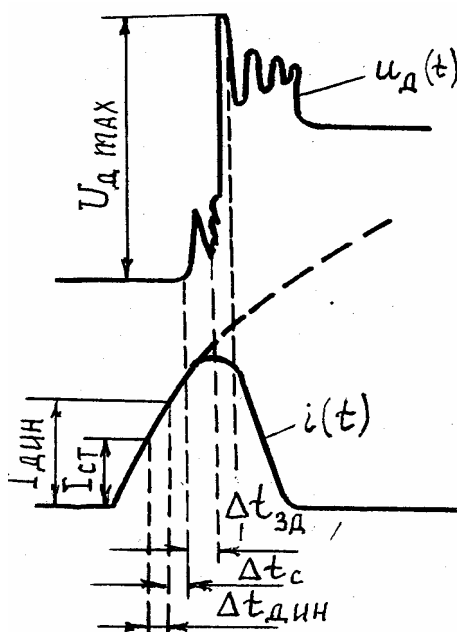


Рис.11. Осциллограммы тока и напряжения выключателя типа ВАТ-42, $I_{НОМ} = 6300$ А

Установлено, что время $\Delta t_{дин}$ изменяется в пределах $(0,1-2) \cdot 10^{-3}$ с при скорости изменения тока $1,0-9$ кА/мс и не зависит от значения индуктивности. Время Δt_c определяется, в основном, инерционностью ИДП, от параметров цепи нагрузки не зависит и находится в пределах $(0,6-1,8) \cdot 10^{-3}$ с. Время $\Delta t_{зд}$ зависит как от конструктивных параметров выключателя (расположения контактов, скорости их расхождения, интенсивности магнитного дутья), так и от особенностей вероятностного характера дуги (повторные пробои и т.п.). Предлагается рассматривать $\Delta t_{зд}$ как случайную величину, которая может принимать любые значения в диапазоне $(1-3) \cdot 10^{-3}$ с при среднем значении $0,00189$ с и среднеквадратичном отклонении) $0,000454$ с.

Джоулев интеграл для выключателя ВАТ-42 техническими условиями не регламентируется. Из практики для выключателя на номинальный ток 6300 А при уставке $2I_{НОМ}$ он находится в пределах $(2 \div 5) \cdot 10^6$ А²·с при токах до 100 кА

и постоянной времени до 0,05 с. С увеличением постоянной времени свыше 0,03-0,05 с или с уменьшением её ниже 5-12 мс интеграл Джоуля существенно возрастает. У автоматических выключателей ВАБ-42 интеграл Джоуля и собственное время срабатывания заметно больше за счёт отсутствия ИДП.

2. Быстродействующие выключатели ВАБ-43 и ВАТ-43

Выключатель ВАБ-43 предназначен для защиты преобразователей от токов обратного направления, а выключатель ВАТ-43 – для защиты питающих линий от токов КЗ и перегрузки. Существенной особенностью этих выключателей по сравнению с другими является замена держашей катушки постоянным магнитом. В результате выключатель не требует постоянного тока питания оперативным током и не происходит его произвольного отключения при кратковременном исчезновении или посадке напряжения на шинах при КЗ.

Конструкция выключателя ВАТ-43 аналогична ВАБ-42. Выключатели ВАБ-43 и ВАТ-43 являются наиболее современными быстродействующими выключателями. В настоящее время они получили преимущественное распространение на тяговых подстанциях метрополитенов и электрифицированных железных дорог. Технические данные, дополняющие характеристики быстродействующих выключателей ВАБ-43 и ВАТ-43 в таблице 1, следующие:

Номинальный ток, А	2000 или 4000
Номинальное напряжение главной цепи, В	1050
Род тока цепей управления	постоянный
Номинальное напряжение цепей управления, В	110 или 220
Кратковременно потребляемый ток цепей управления при оперативном включении, А, при $U=110$ В, не более	73
То же при оперативном отключении, А	5/30
Наибольшее значение тока, отключаемого выключателями в безиндуктивной цепи, кА	50
Собственное время отключения, с, при наибольшем аварийном токе и при начальной крутизне его нарастания $3 \cdot 10^6$ А/с	0,005
Полное время отключения в безиндуктивной цепи, с, не более	0,02
Диапазон токовых уставок, А	1000-2000 или 2000-4000
Главные контакты	замыкающие
Исполнение выключателей	поляризованное
Масса, кг, не более	190

Выключатель имеет систему автоматического магнитного дутья. При этом катушка магнитного дутья, создающего магнитное поле в зоне горения дуги, включена в цепь отключаемого тока последовательно с главными контактами. При малых токах такое дутьё действует неэффективно, поэтому отключение выключателем тока менее 80 А не гарантируется. Выключатель имеет продольно-щелевую камеру. Ширина щели у входа в неё рассчитана на ввод дуги с током 12-15 кА (диаметр дуги, примерно, 1,2 см), поэтому в безиндуктивной цепи, когда в момент входа дуги в камеру ток и диаметр дуги превышают указанные выше значения, отключение выключателем тока также не гарантируется.

Основными элементами выключателя ВАБ-43-4000/30-К (рис.12) являются: дугогасительная камера с деионной решёткой, контактный блок, электромагнитный механизм, блок сигнализации, блок быстродействующего привода и тележка (или рама).

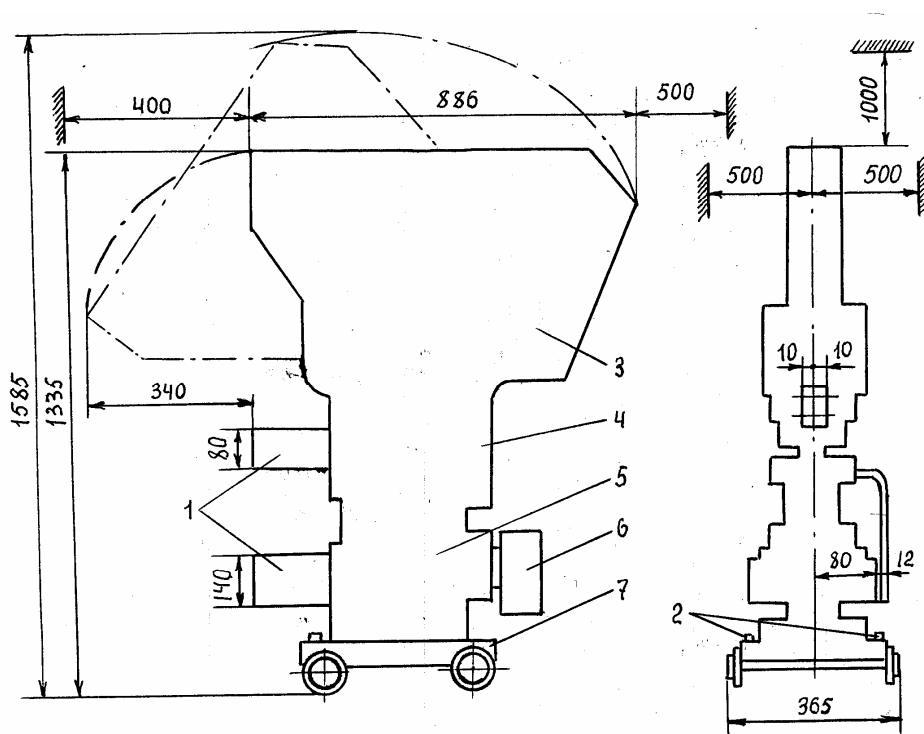


Рис.12. Выключатель автоматический быстродействующий катодный ВАБ-43-4000/10-К: 1 – выводные шины; 2 – болт заземления; 3 – дугогасительная камера; 4 – блок главных контактов; 5 – электромагнитный механизм; 6 – блокировочные контакты; 7 – тележка

Электромагнитный механизм (рис.13), приводящий в действие главные и блокировочные контакты, представляет собой магнитную систему. В неё входит подвижной якорь, набранный из стальных, изолированных одна от другой пластин, которые скреплены боковинами. Вместе с боковинами якорь может поворачиваться вокруг оси, занимая одно из двух крайних положений внутри П-образного магнитопровода. Магнитопровод состоит из стальных изолированных пластин и закреплён на стальном литом бруске, служащем основанием всей магнитной системы. На левом стержне магнитопровода размещена катушка управления, создающая в системе магнитный поток, включающий выключатель. На бруске укреплен сердечник, на котором размещена держащая катушка, служащая для создания в магнитной системе потока, которым выключатель удерживается во включенном состоянии.

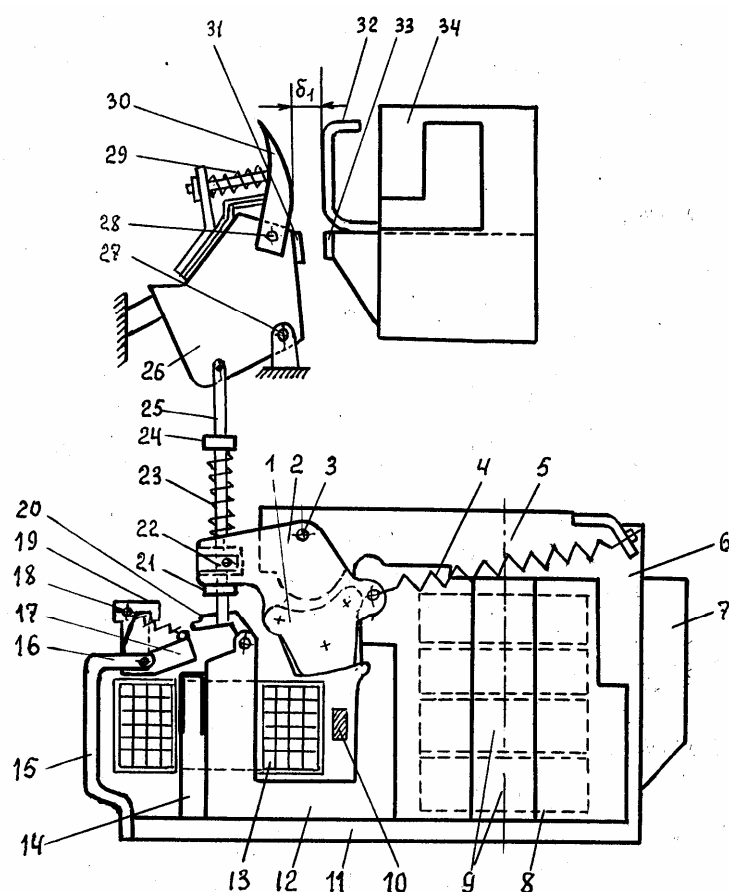


Рис.13. Электромагнитный механизм и блок главных контактов выключателя ВАБ-43: 1 – подвижный якорь; 2 – боковины; 3,16,22,27,28 – оси; 4 – отключающая пружина; 5 – верхний брус; 6 – основание; 7 – регулировочная планка; 8 – сердечник; 9 – держащая катушка; 10 – шина; 11 – нижний брус; 12 – магнитопровод; 13 – катушка управления; 14 – сердечник механизма свободного расцепления; 15 – скоба; 17 – якорь; 18,29 – пружина; 19 – защёлка; 20 – рычаг; 21,24 – упор; 23 – пружина поджатия; 25 – тяга; 26 – подвижный контакт; 29,30,32 – дугогасительные контакты; 31,33 – серебряные наконечники контактов; 34 – неподвижный контакт

К сердечнику примыкает верхний стальной литой брус. Конфигурация бруса такова, что между ним и якорем при его вращении вокруг оси сохраняется неизменный воздушный зазор δ_0 , обеспечивающий стабилизацию магнитного потока держащей катушки. Внутри магнитопровода проходит шина, предназначенная для создания магнитного потока, направленного встречно потоку держащей катушки и вызывающего отключение выключателя. Верхний и нижний брусы магнитной системы перекрываются магнитным шунтом, состоящим из основания и регулировочной планки. Магнитный шунт служит для регулировки уставки выключателя.

Рассмотрим принцип работы магнитной системы выключателя. В отключенном положении выключателя (рис.14,а) обесточены держащая катушка и катушка управления. Якорь отключающей пружины прижат к правому стержню магнитопровода. Между якорем и левым стержнем магнитопровода образуется зазор δ_B . При подаче напряжения на держащую катушку (рис.14,б) возникший ток i_1 возбуждает в сердечнике поток Φ_1 , который разветвляется на два потока: через якорь Φ_1' и через магнитный шунт Φ_1'' . Поток через левый стержень магнитопровода пренебрегаем вследствие его малости (велико магнитное сопротивление зазора δ_B).

Состояние магнитной системы (рис.14,б) соответствует отключённому положению выключателя (держащая катушка постоянно обтекается током).

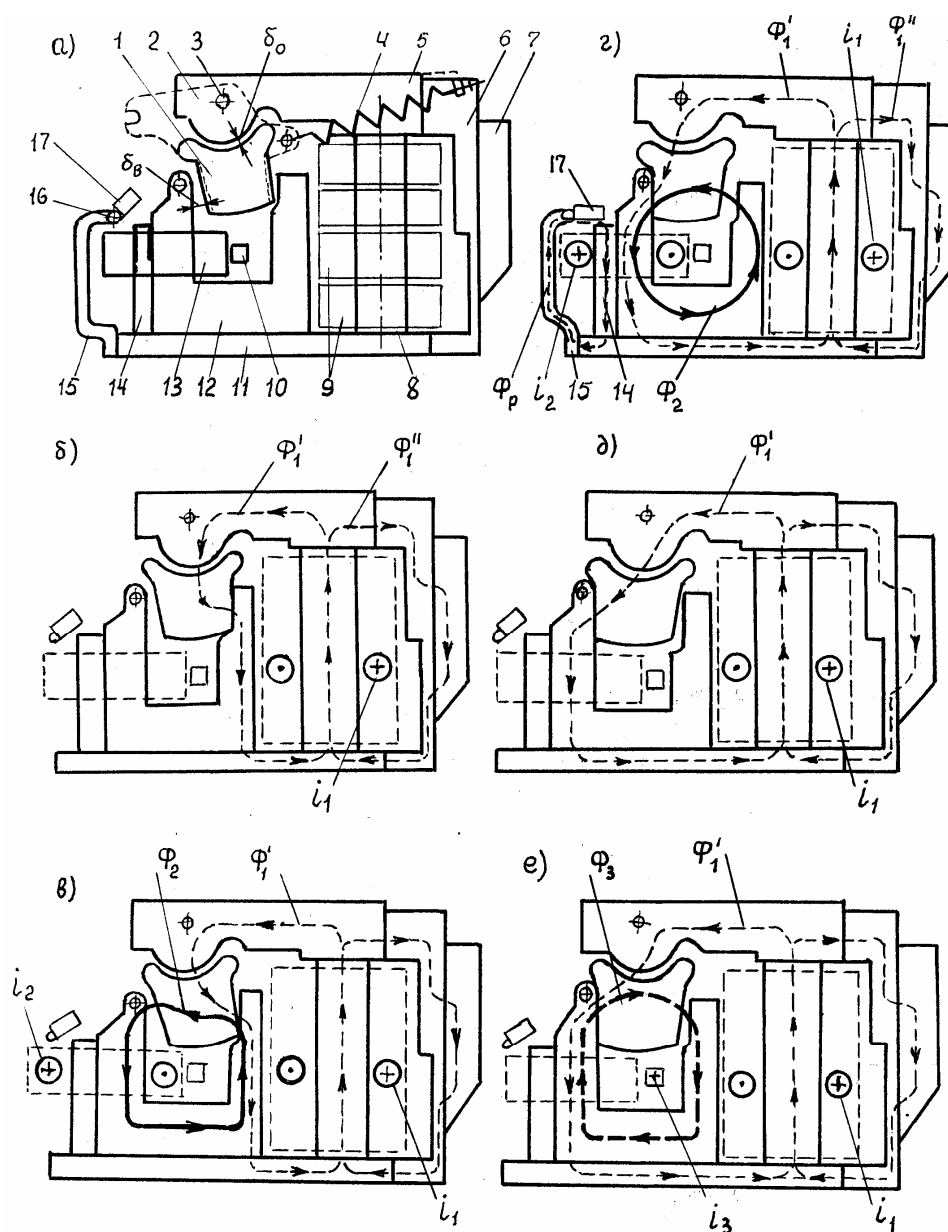


Рис.14. Взаимодействие частей магнитной системы выключателя ВАБ-43 в положениях "Отключено" (а,б,в), "Предвключено" (г) и "Включено" (д,е): а - все катушки обесточены; б - по держашей катушке протекает ток; в - подано напряжение на включающую катушку; г - включающая катушка ещё не обесточена; д - нет тока в защищаемом фидере; е - по защищаемому фидеру протекает ток

При этом главные контакты выключателя – подвижный и неподвижный (рис.13) с серебряными наконечниками и дугогасительные контакты, служащие для образования дуги при отключении выключателя, отключены. В отключённом положении их удерживает сила $F_{ПР}$ пружины и дополнительная сила магнитного притяжения F_M якоря к правому стержню магнитопровода

$$F_M = \frac{(\Phi_1')^2}{S_{II}}, \quad (1)$$

где S_{II} - площадь прилегания якоря к правому стержню магнитопровода.

Ось, размещённая в вырезах боковин, свободно скользит по тяге, однако нижнее её положение ограничено упором. Сверху на ось действует сила пружины поджатия. Якорь, находясь в крайнем правом положении, через боковины, ось 22 и упор удерживает тягу в нижнем положении. Тяга, в свою очередь, удерживает подвижный контакт максимально повернутым вокруг оси 27 против часовой стрелки, так что между подвижным и неподвижным контактами выключателя образуется достаточный зазор δ_1 .

Чтобы включить выключатель, необходимо перебросить якорь вправо и зафиксировать его в этом положении. Это выполняется следующим образом. Подают напряжение на катушку управления, причём такой полярности, чтобы ток i_2 имел направление, при котором создаваемый им поток Φ_2 был встречным по отношению к потоку Φ_1' в месте прилегания якоря к правому стержню магнитопровода. Ток управления i_2 (рис.14,в) и поток Φ_2 нарастают относительно медленно. Суммарный поток через якорь и правый стержень магнитопровода уменьшается, однако увеличивается поток, проходящий через якорь и левый стержень. Взаимодействие потоков Φ_1 и Φ_2 во времени можно рассматривать как процесс магнитной коммутации, в результате которой поток Φ_1' как бы переключается из правого в левый стержень магнитопровода. Благодаря этому уменьшается сила магнитного притяжения якоря к правому и увеличивается к левому стержню магнитопровода. Когда результирующая сила, действующая на якорь, возрастает до значения $F_{II} + F_M$, якорь мгновенно переключится из правого в крайнее левое положение (рис.14,г). Как видим, в этот момент сила притяжения якоря к правому стержню определяется разностью сил, создаваемых суммарным потоком $\Phi_2 + \Phi_1'$ и пружиной. Нормально якорь удерживается только силой, пропорциональной потоку Φ_1'

(катушка управления рассчитана на кратковременное действие и сразу же после включения должна быть отключена), т.е. отключению выключателя всегда должно предшествовать состояние системы, показанное на рис.14,д.

Отключение выключателя происходит аналогично, однако в этом случае в левом стержне магнитопровода взаимодействуют поток Φ_3 (рис.14,е), создаваемый в шине током i_3 , который является частью тока защищаемой цепи, и поток Φ'_1 держащей катушки. По этой причине главные контакты выключателя не должны замкнуться до тех пор, пока не отключена катушка управления и не затух её поток Φ_2 . Иначе поток, увеличенный против нормального Φ'_1 , вызовет соответствующее увеличение уставки выключателя, что в случае повторного включения его на КЗ может привести к затяжке отключения (при далёком КЗ) или же даже к неотключению КЗ и повреждению выключателя (при близком КЗ).

Элемент электромагнитного механизма выключателя, который обеспечивает автоматическое замыкание главных контактов только после отключения катушки управления и затухания её потока Φ_2 , называют механизмом свободного расцепления. Этот механизм состоит из сердечника, укрепленного на левом стержне магнитопровода, скобы, рычага (рис.13), который шарнирно связан с тягой, а также защёлки с пружиной, прикрепленной к левому концу якоря 17. Защёлка 19 и якорь 17 посажены на ось 16.

Механизм свободного расцепления работает следующим образом. При подаче напряжения на катушку управления одновременно с потоком Φ_2 появляется и поток рассеяния Φ_p (рис.14,г и рис.13). Последний замыкается по сердечнику, скобе и якорю механизма свободного расцепления и заставляет якорь 17, преодолевая силу пружины, притянуться к сердечнику, поворачиваясь вокруг оси. В начальной стадии движения он увлекает за собой защёлку, которая своим зубом стопорит движение рычага, связанного с тягой. Одновременно при подаче напряжения на катушку управления якорь 1 магнитной системы также начинает двигаться к правому сердечнику

магнитопровода. Он воздействует на тягу, начинает поворачивать подвижный контакт по часовой стрелке вокруг оси 27. Но едва только расстояние между дугогасящими контактами уменьшится до 4-5 мм, движение подвижного контакта прекратится в результате действия механизма свободного расцепления. При этом, однако, не прекращается движение якоря 1, который доходит до крайнего левого положения и, поднимая ось 22, сжимает пружину 23.

Процесс включения происходит следующим образом. Положение якоря фиксируется блок-контактами (на рис.13 и 14,г не показаны). Замыкающий контакт при этом замыкается и шунтирует катушку контактора, через силовые контакты которого подаётся напряжение в цепь катушки управления 13. Катушка управления обесточивается, вызванный ею поток Φ_p затухает. При значении потока Φ_p , близком к нулю, пружина преодолевает вызываемое им притягивающее усилие, действующее на якорь 17; последний резко отрывается от сердечника 14, разгоняется под действием пружины и сбивает зуб защёлки с рычага. В результате освобождается тяга и под действием сжатой пружины замыкает контакты: сначала дугогасительные 30 и 32, затем главные 26 и 34. Включённому положению выключателя соответствует рис.14, д и е.

Замыкание главных контактов после дугогасительных обеспечивается тем, что контакт 30 выполнен подвижным относительно главного подвижного контакта 26. Для этого он насажен на ось 28 и соединён с пружиной 29. Такое выполнение подвижного контакта даёт возможность при операции отключения раньше разомкнуть главные и передать ток на дугогасительные контакты, вследствие чего дуга загорается только на них.

Рассмотрим принцип автоматического отключения выключателя при КЗ. Будем считать, что до момента КЗ ток фидера равен нулю. Тогда состояние магнитной системы выключателя до момента КЗ определяется рис.14,д (положение “Включено”). В этом положении якорь 1 удерживается силой, определяемой разностью двух сил – электромагнитной, пропорциональной

потоку Φ'_1 , и приведённой силой натяжения пружины $F_{\text{ПР}}$. При КЗ появляется ток в фидере, и часть его течёт через шину 10. Если выключатель включен правильно, т.е. правильно выбрано направление тока в шине 10, то этот ток вызывает в правом стержне магнитопровода поток $\Phi_3(t)$, направленный встречно потоку Φ'_1 . По мере роста тока КЗ растёт поток $\Phi_3(t)$ и уменьшается результирующий поток через поверхность прилегания $S_{\text{Л}}$ якоря 1 к левому стержню магнитопровода, поэтому сила притяжения якоря влево стремительно уменьшается

$$F_{\text{ОЛ}} = \frac{[\Phi'_1 - \Phi_3(t)]^2}{S_{\text{Л}}}. \quad (2)$$

С другой стороны поток $\Phi_3(t)$ замыкается через зазор $\delta_{\text{В}}$ и, значит, появляется сила притяжения якоря к правому стержню магнитопровода, которая, наоборот, стремительно растёт

$$F_{\text{ОП}} = \frac{\Phi_3(t)^2}{S_{\text{П}} \kappa_{\text{Р}}}, \quad (3)$$

где $\kappa_{\text{Р}}$ - коэффициент рассеяния магнитного потока.

В результате якорь магнитной системы оказывается под воздействием силы $F_{\text{Я}} = (F_{\text{ОЛ}} - F_{\text{ОП}}) - F_{\text{ПР}}$. Из выражений (2) и (3) видно, что при малом значении $\Phi_3(t)$ составляющая $F_{\text{ОЛ}} \succ F_{\text{ОП}}$, значение в скобках продолжает оставаться больше $F_{\text{ПР}}$. При этом $F_{\text{Я}} \succ 0$, и якорь неподвижен. По мере роста $\Phi_3(t)$ суммарная сила, действующая на якорь, уменьшается до нуля, а затем меняет знак на обратный, т.е. становится отрицательной. С этого момента начинается движение якоря вправо. По мере дальнейшего роста $\Phi_3(t)$ сила $F_{\text{ОЛ}}$ уменьшается по сравнению с $F_{\text{ОП}}$, его значение в скобках становится отрицательным, стремительно растёт и действует согласно с $F_{\text{ПР}}$. Благодаря этому удаётся при относительно небольшом натяжении пружины 4 обеспечить высокое быстродействие электромагнитного механизма, т.е. быстрое размыкание главных контактов.

Электромагнитные механизмы подобного типа, в которых быстрота отключения обеспечивается не только силой пружины, но также и разностью сил магнитного притяжения якоря $F_{ОЛ} - F_{ОП}$, называются пружинно-магнитными, а выключатели, использующие такие механизмы, - выключателями с пружинно-магнитным отключением.

Из сказанного следует, что уставка выключателя существенно зависит от потока Φ'_1 , вызываемого током i_1 . Таким образом, чтобы изменить уставку выключателя, следует изменить величину Φ'_1 . В рассматриваемом выключателе для этой цели имеется магнитный шунт, образованный основанием шунта 6 и регулировочной планкой 7. Меняя положение планки, можно регулировать магнитное сопротивление шунта и, тем самым, менять в известных пределах поток Φ'_1 . Чтобы отрегулированная шунтом уставка выключателя оставалась неизменной во времени, ток держащей катушки стабилизирован.

После разведения дугогасительных контактов на них появляется дуга, которая действием магнитного поля, создаваемого катушкой магнитного дутья, выдувается в камеру и гасится. В результате этого исчезает ток в шине, якорь переключен в крайнее положение и магнитная система возвращается в исходное положение "Отключено" (рис.14,б).

Камера выключателя ВАБ-43 (рис.15) продольно-щелевая, имеет две секции, размещённые параллельно, благодаря чему при ограниченных размерах камеры удаётся растянуть в ней электрическую дугу до двойной длины. Перегородка делит камеру на две равные части (секции). Штриховыми линиями показаны детали, находящиеся за перегородкой. Слева и справа симметрично расположены разгонные рога, а в центре – размножающий рог с усами влево 7' и попадает на электрически связанные с ними разгонные рога (положение II), затем разворачивается и в положении III касается размножающего рога. После этого в камере образуется две дуги: горящая в первой секции IV' (перед перегородкой) и во второй секции IV'' (за перегородкой) между разгонным и размножающим рогами. Вследствие магнитного взаимодействия дуги в секциях

притягиваются друг к другу (см. направления токов, показанные на рис.15,а стрелками). Начиная с положения IV, их траектории практически одинаковы. Растягиваясь и двигаясь вверх, дуги “лижут” стенки перегородки. Это способствует интенсивному отводу тепла из каналов дуг и активной деионизации остаточных ионизированных частичек воздуха.

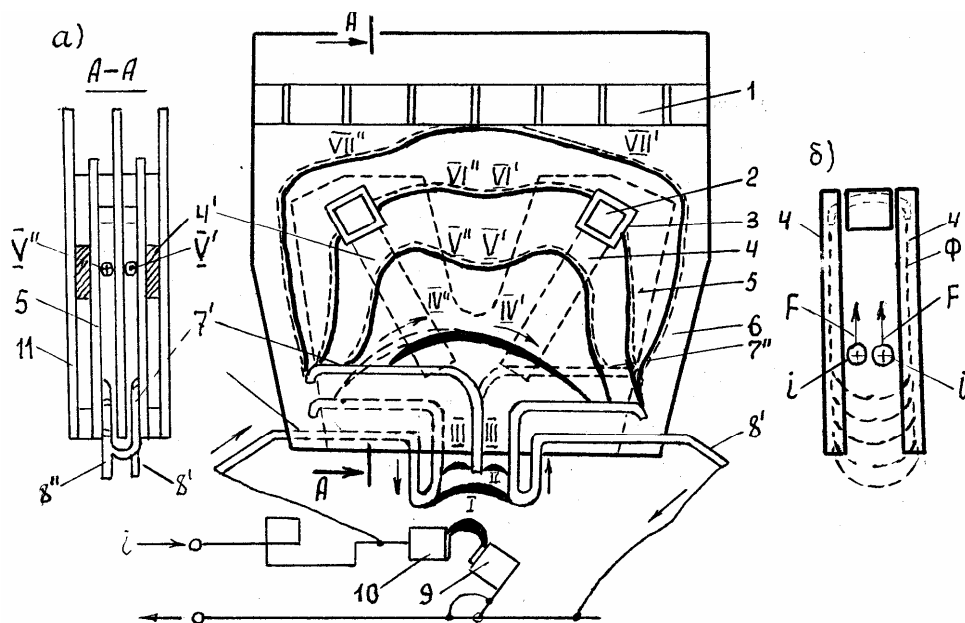


Рис.15. Принципиальная схема дугогасительной камеры к выключателю ВАБ-43

Движение дуг вверх происходит очень интенсивно: они втягиваются в устья специальных магнитопроводов, вмонтированных в камеру между внешней стенкой и У-образной перегородкой. Между перегородками 5 и 6 магнитопровод имеет стальные перемычки (на рис.15 штриховыми линиями показан магнитопровод 4, находящийся за перегородкой 6). Механизм движения дуги поясняется на рис. 15,б. Силы F , действующие на дугу, возникают вследствие разности плотностей потока Φ ниже и выше положения дуг с суммарным током $2i$. В положении VI дуги касаются (рис.15,а) медных защитных колец, размещённых на перемычках, после чего, сходя с них, оказываются в свободной верхней полости камеры, где и горят в положении VII до погасания. В этой последней стадии дуг их длина, а следовательно, и падение напряжения на них стабилизируются, остаются неизменными и практически не зависят от отключаемого тока и индуктивности цепи.

Зависимость напряжения на контактах выключателя от времени примерно эквивалентна показанной на рис.15,б. В верхней части камеры ряд деионных решёток выполнен в виде пучков металлических параллельных пластин. Назначение деионных решёток – способствовать деионизации остаточного канала дуги. Металлические пластины решёток, между которыми проходят ионизированные частички, служат центрами рекомбинации. Благодаря этому выброшенные за пределы камеры остатки горящего воздуха практически не проводят ток, т.е. исключено перекрытие выключателей сверху по пути выхлопа. Для гарантии выхлоп воздуха из двух половин камеры осуществляется в разные стороны.

Включение выключателя осуществляется нажатием кнопки SB1 (рис.16).

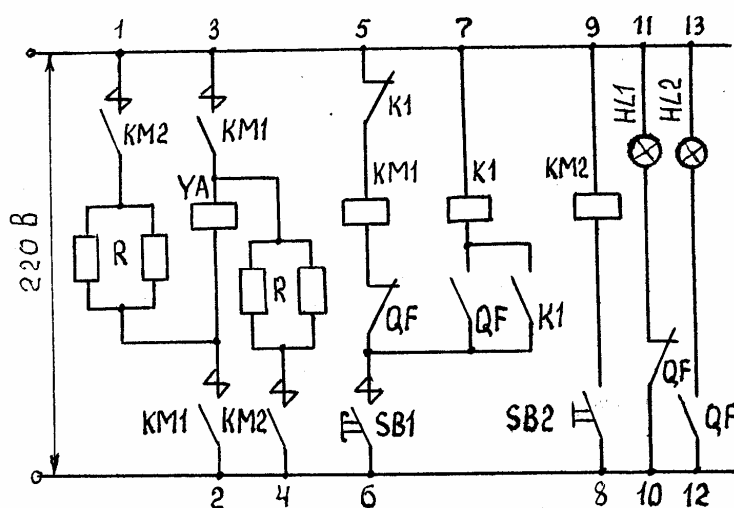


Рис.16. Принципиальная электрическая схема управления выключателем ВАБ-43

При этом включается контактор KM1, замыкающий своими контактами цепь катушки управления YA. Связанные с главным якорем выключателя блок-контакты QF замыкаются в цепи реле блокировки K1 и размыкаются в цепи катушки KM1 (цепь 5-6). Реле K1, включаясь, дополнительно разрывает своим размыкающим контактом цепь KM1 и остаётся включённым на всё время замкнутого положения кнопки SB1. Реле K1 обеспечивает только один короткий импульс тока в катушке управления, достаточный для включения

выключателя. Если в цепи, включаемой выключателем, окажется КЗ, он беспрепятственно выключится и, несмотря на то, что кнопка SB1 ещё нажата, повторного включения не произойдёт. Для того, чтобы включить повторно ВАБ-43, необходимо отпустить и вновь нажать кнопку SB1. Таким образом, при помощи реле К1 осуществляется защита выключателя от “звонковости” при включении на короткозамкнутую линию.

Для отключения выключателя нажимается кнопка SB2, замыкающая цепь контактора КМ2. Последний своими контактами замыкает цепь катушки управления через добавочные резисторы R, ограничивающие ток в катушке. По катушке протекает ток, имеющий направление, обратное включающему.

Катодные выключатели ВАБ-43 и анодные 6ХВАБ-43 (ВАТ-43, табл.1) принципиально отличаются от ВАБ-42 блоком быстродействующего привода. Выключатели поляризованы и отличаются принципом действия только при протекании обратного тока. Держащая катушка у ВАБ-43 отсутствует и её роль выполняет постоянный магнит. Датчиком отключения служит шина первичного тока. Конструкция выключателя ВАТ-43 аналогична ВАБ-42.

Выключатель 6ХВАБ-43 состоит из шести независимых одинаковых по устройству полюсов, смонтированных на общей раме. Каждый полюс установлен на изоляционном основании и отделён от соседних изоляционными экранами. Обычно выключатели 6ХВАБ-43 устанавливаются на одной площадке с выпрямителями.

Линейные и катодные выключатели размещают в отдельных ячейках, которые представляют собой сборные конструкции со стальным каркасом и асбоцементными перегородками. Шины 825 В и разъединители монтируют в верхней части РУ. Камеры со стороны коридора ограждают сетчатыми дверями. Ручные приводы разъединителей устанавливают на передней стенке ячеек. В отдельном отсеке размещают аппаратуру управления и электродвигатели приводов обходных разъединителей.

5. Перспективы развития быстродействующих

автоматических выключателей

Появление автоматических выключателей относится к 20-ым годам XX века. Оно было вызвано, в значительной степени, развитием системы электропривода, в частности, появлением индивидуальных электроприводов. Совершенствование первых моделей автоматических выключателей, основанных на использовании биметаллических элементов, привело к появлению механических защёлок в выключателях (1928 г.), дугогасительных камер и контактных накладок из серебросодержащих материалов (1936 г.). В середине 30-х годов появляются трехфазные конструкции и быстродействующие электромагнитные расцепители для защиты КЗ. В послевоенный период, благодаря интенсивному развитию новых искусственных материалов, появились малогабаритные выключатели в пластмассовом корпусе, отличающиеся большой коммутационной способностью. Современные автоматические выключатели, примерно, в 4-5 раз меньше выключателей образца 30-40-ых годов по габаритным размерам и во много раз превосходят их по коммутационной способности, быстродействию, селективности, характеристикам токоограничения и надёжности. Постоянное ужесточение требований к указанным параметрам, требования снижения материалоемкости, трудоёмкости и энергопотребления при изготовлении и эксплуатации выключателей диктуют необходимость совершенствования известных и поиск новых технических решений. При этом необходимо совершенствование методов расчёта и проектирования, которые не всегда удовлетворяют современным требованиям.

Основные конструктивные принципы быстродействующих электромагнитных автоматических выключателей на протяжении последних трёх десятилетий остаются без радикальных изменений, и улучшение их характеристик достигается, в основном, за счёт совершенствования контактных и дугогасительных систем и привода. Практика показывает, что электромагнитные автоматические выключатели с учётом дальнейшего

совершенствования конструкций и создания новых материалов в течение длительного времени будут оставаться эффективными защитными аппаратами.

Для выполнения аппаратами защиты силовых полупроводниковых устройств своих функций необходимо, чтобы их характеристики не менялись в течение срока службы. Статистические и вероятностные характеристики надёжности отдельных аппаратов защиты в настоящее время уже не удовлетворяют в полной мере современным требованиям. Например, для ВАТ-42, ВАБ-42 и др. характеристики надёжности в технической документации вообще не нормируются. Для выключателей ВАТ-42 и ВАБ-42 лишь гарантируется ресурс электрической износостойкости, соответствующий 15-ти отключениям токов до 45кА без зачистки и регулировки. Ресурс по механической износостойкости тех же выключателей составляет 5-10 тыс. циклов при сроке службы 20 лет. Разбросы по времени срабатывания 2 мс и по потерям мощности на контактах выключателя ВАТ-42, ВАБ-42 удовлетворяют требованиям эксплуатации, хотя также не гарантируются техническими условиями.

В настоящее время особое внимание уделяется развитию исследовательских работ, базирующихся на анализе топографии металлической поверхности контактов и учёте их физических свойств, в частности, упрочнения металла при деформации в микрообластях контактов. Оптимизация состава композиции материала контактов, их геометрической формы и размеров, разработка новых материалов, устойчивых к воздействию эрозии при аварийных токах, поиск путей более эффективного использования уже имеющихся материалов – приоритетные направления совершенствования быстродействующих электромагнитных выключателей. Совершенствование аппаратуры для исследования электрической дуги, в частности, аппаратуры для высокоскоростной киносъёмки с разрешающей способностью порядка 10^{-7} с, фотометрической оценки снимков, датчиков с применением световодов будут способствовать созданию отвечающих современным требованиям дугогасительных систем.

Перспективны направления разработки устройств, обеспечивающих искусственное инициирование дуги в деионной решётке автоматических выключателей. В этом случае также промежуточные элементы, как рогообразные участки, в наибольшей мере ухудшающие быстродействие выключателя, полностью исключаются из конструкции. В принципе, при этом возможны характеристики токоограничения, близкие к идеальным, хотя конструкция аппарата несколько усложняется без увеличения габаритов.

Совершенствование электромагнитных расцепителей привело к созданию биметаллических магнитострикционных элементов, компонентами которых служат материалы с противоположными знаками магнитострикции. Деформации изгиба таких элементов превосходят линейные магнитострикционные деформации однородных материалов.

Качественным скачком в развитии систем управления электромагнитными автоматическими выключателями является внедрение автоматического регулирования характеристик в зависимости от условий работы, осуществляемого с помощью встроенных микро-ЭВМ. Широкое распространение получит применение ЭВМ как для моделирования дуговых тепловых процессов с целью оптимизации конструкции автоматических выключателей, так и для обработки регистрации экспериментальных данных. Фиксация и расчёт джоулева интеграла отключения, времени отключения, времени горения дуги, действующих значений тока и напряжения, мгновенного и действующего значений симметричной составляющей и содержания периодической составляющей в момент размыкания контактов, полного тока через выключатель, среднего и максимального значений напряжения на дуге и других параметров непосредственно в ходе испытаний значительно повысят точность получаемых данных и эффективность разработки и проектирования.

Оснащение выключателей микро-ЭВМ при высокоэффективных алгоритмах и соответствующих первичных преобразователях может обеспечить практически любые виды и характеристики защиты. В ближайшее время принципиально возможно создание трёхфазных электромагнитных

автоматических выключателей переменного тока с высоким быстродействием (собственное время срабатывания порядка 1 мс), достигаемым, например, с помощью разряда конденсатора через тиристор на катушку исполнительного элемента, воздействующего на контакты, или с помощью непосредственного электромагнитного, индукционного или электродинамического воздействия разрядного импульса на контакты. И в этих аппаратах применение микро-ЭВМ сулит большие возможности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции.-М.: Транспорт,1986.- 319 с.
2. Справочник по электроснабжению электрифицированных железных дорог. Т.2./ Под ред. К.Г.Маркварда.-М.: Транспорт,1980.- 392 с.
3. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. –М.: Транспорт,1983.- 496 с.
4. Электроснабжение метрополитенов./ Под ред. Е.Н.Быкова. –М.: Транспорт, 1978.- 431 с.
5. Яковлев В.Н. Электрические железные дороги. Тяговые подстанции./ Под ред. Г.С.Артёменко. –Ашгабад: Ылым, 1995.-212 с.

Оглавление

- | | |
|--|----|
| 1. Назначение, основные параметры, классификация и требования, предъявляемые к быстродействующим выключателям постоянного тока | 3 |
| 2. Выключатели типа ВАБ-28 | 10 |
| 3. Выключатели типов ВАБ-42 и ВАТ-42 | 19 |
| 4. Быстродействующие выключатели ВАБ-43 и ВАТ-43 | 26 |
| 5. Перспективы развития быстродействующих | |

автоматических выключателей	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	42