УДК 621.301.438.002.284

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЗРЫВНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Сивков А.А., Сайгаш А.С., Климова Г.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, e-mail: SivkovAA@mail.ru

Основными недостатками применяемых в настоящее время устройств АВР являются их относительно низкое быстродействие и большое время перерыва электроснабжения и, как следствие, неэффективность действия на подстанциях, питающих СД. В статье приводится описание взрывных размыкателя (предохранителя) типа ВР-10 и замыкателя типа В3-10, которые в сочетании с быстродействующим синфазным АВР позволяют осуществить быстрый перевод аварийной секции шин подстанции с двигательной нагрузкой на резервный источник питания без выхода из синхронизма синхронных двигателей мощностью 1600 кВт и более и с обеспечением их устойчивого самозапуска. Эффективность действия разработанных устройств доказана их промышленными и лабораторными испытаниями и опытной эксплуатацией. Наибольший эффект можно получить при использовании взрывных коммутационных аппаратов в системах электроснабжения с жесткими условиями технологического режима работы двигателей, требующих обеспечения устойчивого самозапуска.

Ключевые слова: надежность, взрывные размыкатели, взрывные предохранители

USE OF EXPLOSIVE ULTRAFAST SWITCHING DEVICES FOR IMPROVING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Sivkov A.A., Sajgash A.S., Klimova G.N.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: SivkovAA@mail.ru

The main disadvantages of current AVR (automatic load transfer) devices is their relatively slow speed and long interruption of electricity supply and, as a consequence, the ineffectiveness of the substations that feed the SD (synchronous motor). The article describes the explosive breaker (fuse) type BP-10 and the contactor type B3-10, which, combined with a fast-phase AVR allows rapid transfer of emergency substation bus section with motor load the backup power source without leaving the synchronism of synchronous motors in 1600 kW or more and ensuring their sustainable self. The efficiency of the developed devices proved their industrial and laboratory testing and trial operation. The greatest effect can be obtained with the use of explosive devices in the switching power supply systems with the harsh process conditions of the engine, requiring self-sustainable.

Keywords: reliability, explosive breakers, explosive fuse

При оценке надежности работы систем электроснабжения (СЭС) необходимо учитывать не только их структурную надежность, но и надежность функционирования, отражающую условия устойчивой работы электродвигателей, в том числе их самозапуска после перерывов электроснабжения. В этой связи перевод на резервный источник питания в случае возникновения аварии за счет использования устройства автоматического ввода резерва (АВР) является одним из основных средств повышения надежности и бесперебойности электроснабжения потребителей, особенно в цепях с большим количеством мощных синхронных (СД) и асинхронных двигателей, работающих в жестком технологическом режиме. При этом успешное действие АВР определяется тем, насколько быстро после подачи резервного питания будут достигнуты нормальные параметры производственного процесса. Время достижения этих параметров зависит от длительности перерыва электроснабжения и от того, произойдет ли после перерыва успешный самозапуск электродвигателей.

Существующие самые быстродействующие коммутационные аппараты на номинальные напряжения 6–10 кВ и устройства релейной защиты и автоматики обеспечивают АВР за время не менее 0,3 с. При таком перерыве электроснабжения возможно включение СД в наиболее неблагоприятные моменты для их самозапуска, когда ток несинхронного включения может вызвать разрушение обмотки статора динамическими усилиями [2]. Таким образом, основными недостатками применяемых в настоящее время устройств АВР являются их относительно низкое быстродействие и большое время перерыва электроснабжения и, как следствие, неэффективность действия на подстанциях, питающих СД. Эти причины не всегда позволяют использовать устройства АВР в СЭС 6–10 кВ.

Отмеченные недостатки можно устранить, если на порядок повысить быстродействие коммутационных аппаратов и устройств релейной защиты и автоматики. Однако современные аппараты не только не позволяют повысить быстродействие, но и ограничены в своем применении существующими на подстанциях уровнями

токов коротких замыканий, для снижения которых принимаются специальные меры. С целью повышения эффективности перевода аварийной секции подстанции с СД на резервное питание предложен способ синфазного АВР с использованием синфазного быстродействующего пускового устройства и коммутационной аппаратуры повышенного быстродействия [3]. Однако эти меры не всегда оказываются достаточными для обеспечения успешного АВР из-за недостаточного быстродействия и низкой отключающей способности даже самых современных выключателей.

Одним из путей решения этой проблемы является использование сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов с пиротехническим (взрывным) приводом на номинальные напряжения до 10 кВ и токи до 10 кА, разработанных и выпускаемых более 40 лет зарубежными фирмами Calor Emag (Германия), Fuji (Япония), Ferraz (Франция) [8], G&W Electric Company (США). Они хорошо зарекомендовали себя как аппараты защиты от токов к.з. мощных полупроводниковых преобразователей, в качестве секционных выключателей, аппаратов шунтирования токоограничивающих реакторов и т.п. Заложенный в их основу общий принцип двухступенчатой коммутации (параллельно подключенные сильноточный взрывной размыкатель с разрушаемым тоководом и специальный плавкий предохранитель с плавкой вставкой на небольшой ток) позволяет увеличить номинальный ток до 10 кА и существенно повысить токоограничивающую и отключающую способность при допустимом уровне коммутационных перенапряжений. Однако они не лишены недостатков: громоздкость и сложность конструкции, потерю преимущества сверхбыстрого срабатывания и токоограничения при отключении небольших токов и обратных токов при выходе из строя защищаемых полупроводниковых приборов и агрегатов.

Максимальное использование преимуществ взрывного отключения заложено в конструкциях и принципе действия взрывных коммутационных аппаратов, разработанных в Томском политехническом университете. Всесторонние исследования процессов при отключении тока взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ) позволили создать как отключающие аппараты, обеспечивающие предельно высокое токоограничение и сверхбыстрое отключение при заданном уровне коммутационных перенапряжений, так и замыкающие аппараты, очень простые по своему устройству, не имеющие аналогов в мировой практике и в первую очередь необходимые для реализации сверхбыстрого АВР. Некоторые типы таких взрывных коммутационных аппаратов, их устройство и принцип действия представлены на рис. 1, 3, 5.

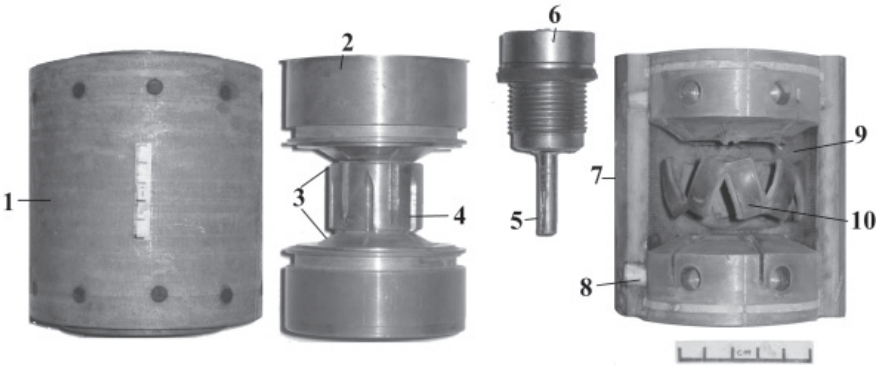


Рис. 1. Взрывной предохранитель ВП-1 на $U_н$ = 0,4–1,0 кВ и $I_н$ = 1–3 кА

Низковольтные взрывные предохранители ВП-1 (см. рис. 1) могут использоваться в электрических установках и распределительных цепях постоянного и переменного токов напряжением до 1000 В в качестве аппаратов защиты от токов к.з., для защитного отключения и в системах сверхбыстрого ввода резервного питания [4]. Они достаточно просты по конструктивному исполнению. Основным элементом взрывного предохранителя (ВП) является цельнометаллический медный или алюминиевый токовод 2, выполненный в виде катушки. Его средняя часть меньшего диаметра (разрушаемый участок) выделена кольцевыми ослабляющими проточками 3. На внешней цилиндрической поверхности разрушаемого участка сделаны продольные ослабляющие проточки 4 (см. рис. 1). Токовод устанавливается внутри стеклопластикового цилиндрического корпуса 1 и 7 с герметизацией цилиндрических сопрягающихся поверхностей и укрепляется стеклопластиковыми шпильками 8. По оси токовода выполнено глухое отверстие – внутренняя полость. Пространство между внутренней поверхностью корпуса и разрушаемым участком токовода является дугогасительной камерой 9

и заполняется трансформаторным маслом. Этим же дугогасительным наполнителем заполняется внутренняя полость токовода. Заряд ВВ 5 (электродетонатор) устанавливается по оси разрушаемого участка токовода с помощью пробки 6, которая является герметизирующей заглушкой внутренней полости токовода. Такая конструкция обеспечивает герметичность корпуса как в длительном номинальном режиме, так и при срабатывании. Предотвращается не только выброс трансформаторного масла, газов и плазмы, но и шумовой эффект. Торцевые поверхности токовода 2 являются контактными поверхностями. Электрические изолированные проводники цепи инициирования электродетонатора выводятся наружу через осевое отверстие в пробке, загерметизированное эпоксидным компаундом.

На рис. 2 приведена фотограмма высокоскоростной кадрированной фотосъемки процесса разрушения взрывом осевого заряда ВВ массой 1,5 г выделенного участка токовода, образования двух межконтактных промежутков и гашения образовавшихся на них электрических дуг отключения [5]. Съемка производилась с помощью высокоскоростной фотоустановки ВФУ-1 в реальных условиях отключения тока КЗ.

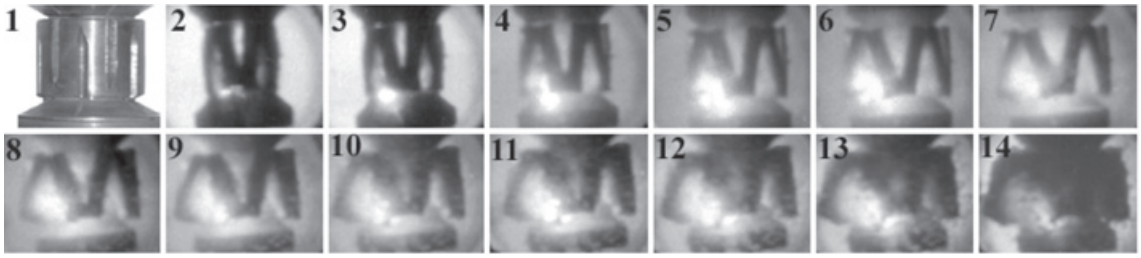
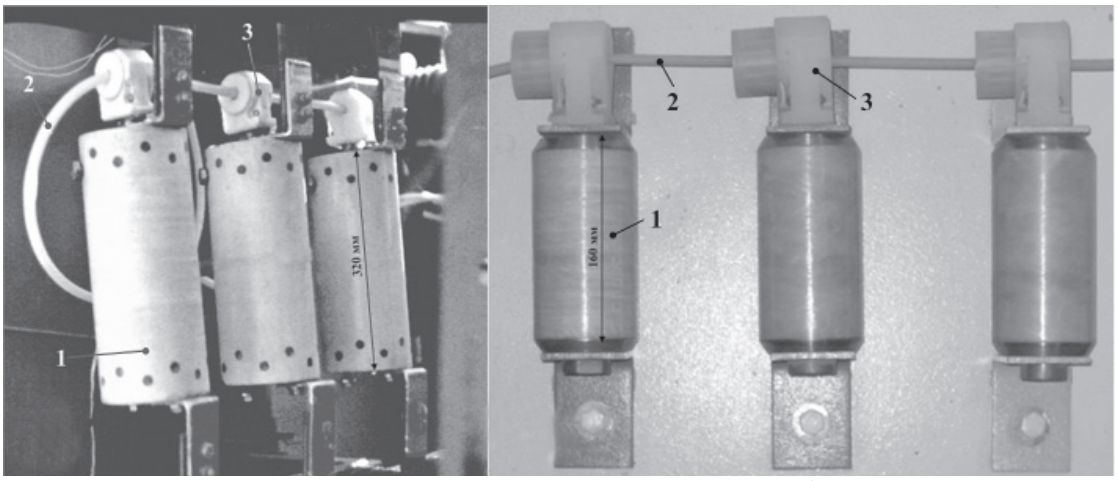


Рис. 2. Фотограмма высокоскоростной съемки процесса разрушения взрывом участка токовода во взрывном размыкателе. Время между кадрами 50 мкс

Взрывные размыкатели ВР-10 и замыкатели ВЗ-10 (рис. 3) [6] устанавливаются в ячейку комплектного распределительного устройства трехфазной цепи переменного тока 6-10 кВ, 50 Гц [4]. Отличительной особенностью конструкции ВР-10 является то, что токоведущий элемент имеет два последовательных разрушаемых участка и один общий заряд ВВ массой до 10 г. При трехфазном исполнении предусмотрена система одновременного инициирования трех зарядов ВВ. Гальваническая развязка узлов инициирования обеспечивается за счет использования одного импульсного трансформатора с тремя индивидуальными вторичными обмотками 3, имеющего одну общую одновитковую первичную обмотку – петлю 2, подключаемую к выходным клеммам блока управления. Большой запас по изоляции общей первичной обмотки и индивидуальных вторичных, к клеммам которых подсоединены выводы электродетонаторов ЭД-8, исключает междуфазные КЗ по цепям инициирования.



а б

Рис. 3. Взрывные коммутационные аппараты на 6-10 кВ:
а – взрывной размыкатель ВР-10; б – взрывной замыкатель ВЗ-10;
1 – ВР-10 и ВЗ-10; 2 – первичная обмотка (общая петля) импульсного трансформатора;
3 – вторичная (индивидуальная) обмотка импульсного трансформатора

Сравнительные характеристики аппаратов защиты представлены в таблице.

Характеристики	Тип аппарата		
	ВР-10	ВП-1	ВЗ-10
Номинальное напряжение, кВ	6–10	0,4–1,0	0,4; 6–10
Номинальный ток, кА	1,0–3,0	1,0–3,0	1,0–3,0
Собственное время срабатывания, не более с	$3\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-4}$
Диаметр, мм	130	120	80
Высота, мм	320	150	160

Принцип действия взрывного размыкателя–предохранителя заключается в следующем. В момент возникновения аварийной ситуации на вход его электронного блока управления поступает сигнал от электронного устройства защиты (момент t_0 на стилизованной диаграмме рис. 4). Спустя 10 мкс, в момент t_1, блок управления выдает импульс на подрыв заряда ВВ. При использовании электродетонатора ЭД-8 заряд детонирует в течение времени не более 200 мкс [7]. Высокое импульсное давление расширяющихся в полости разрушаемого участка токовода продуктов детонации через слой трансформаторного масла воздействует на внутреннюю стенку токовода. Разрушаемый участок токовода начинает увеличиваться в диаметре (см. рис. 2). Спустя 20–50 мкс, в зависимости от сечения и массы, в момент времени t_2 (рис. 4) разрушаемый участок отрывается от фланцев токовода по двум ослабляющим кольцевым проточкам 3 (см. рис. 1).

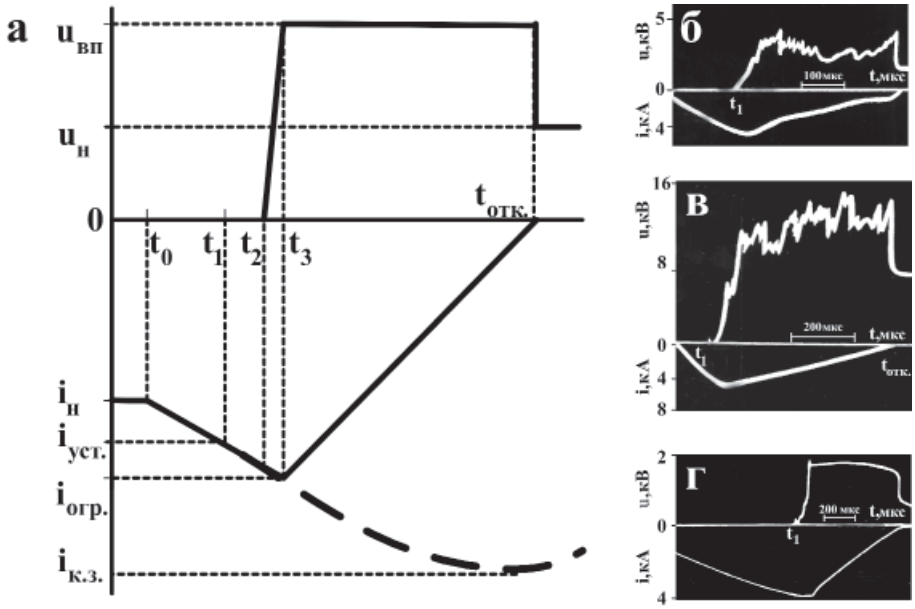
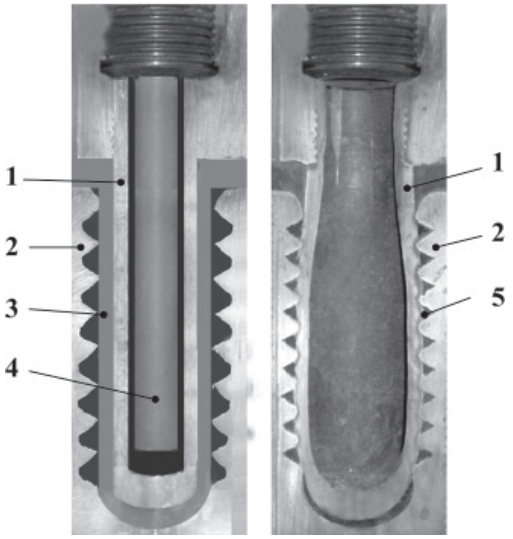


Рис. 4. Коммутационные характеристики взрывных размыкателей при отключении тока КЗ: а – стилизованные диаграммы напряжения на контактах и отключаемого тока: t_0 – момент возникновения КЗ; t_1 – момент срабатывания электронного УРЗА и выдачи импульса на подрыв заряда ВВ; t_2 – момент разрыва металлического контакта и возникновения дуги отключения; t_3 – момент ограничения тока КЗ; $t_{отк}$ – момент отключения тока КЗ. $U_н$, $i_н$ - номинальные напряжение и ток цепи; $i_{уст}$, $i_{огр}$, $i_{к.з}$ – токи уставки, ограничения и КЗ соответственно; $U_{вр}$ – напряжение на контактах взрывного размыкателя; б, в, г – осциллограммы напряжения и тока отключения при напряжении сети 1000 В(б), 10000 В(в), 1000 В(г) с использованием параллельного варисторного ограничителя перенапряжения

Суммарное время с момента поступления сигнала защиты до момента разрыва металлического контакта в предохранителе t_2 не превышает 250–300 мкс. На образовавшихся зазорах возникают электрические дуги отключения. Они горят в среде трансформаторного масла в условиях воздействия высокого давления и высокоскоростного потока (~200 м/с) жидкости, истекающего через кольцевые зазоры. Все это обеспечивает быстрое охлаждение дуги, рост ее сопротивления и напряжения на контактах ВП с крутизной порядка 100 В/мкс до момента времени t_3. Крутизна нарастания напряжения и его средний уровень в течение последующего времени отключения до момента $t_{откл}$ задаются конструктивными параметрами ВП и зависят от индуктивности отклю-

чаемой цепи. Ограничение аварийного тока происходит при достижении напряжения на контактах ВП примерно уровня $U_н$. Превышение тока ограничения уровня уставки даже при очень высокой скорости роста аварийного тока составит не более 2–3 кА. Прекращение роста напряжения в момент t_3 обусловлено прекращением действия на дуги отключения высокоскоростного потока при вытеснении из полости разрушаемого участка всей жидкости и попаданием газообразных продуктов детонации в парогазовую полость дугового разряда. Далее разрушаемый участок токовода продолжает увеличиваться в диаметре, разрываясь по продольным ослаблениям и принимая форму короны. Его симметричное расширение обеспечивается за счет размещения по периметру дугогасительной камеры кольцевой газовой подушки, выполненной из вспененного полиуретана. При максимальном расширении разрушаемый токовод фиксируется у стенки камеры за счет сохранения своей целостности и жесткости образовавшейся короны, как это видно на фотографиях разрезанного сработавшего ВП (см. рис. 1). Осциллограммы отключения тока при номинальном напряжении 1,0 и 10 кВ, представлены на рис. 4, б, в. В отличие от стилизованной кривой на реальном ВП напряжение нестабильно, что является характерным для напряжения на дуговом разряде в трансформаторном масле. Для исключения этого недостатка, а также предотвращения возможного превышения коммутационными перенапряжениями допустимого уровня предложено использование оксидно-цинковых варисторов [1]. Подключение параллельно ВП варисторного блока дает возможность стабилизировать напряжение на строго заданном уровне. При этом, как видно из приведенных на рис. 4,г осциллограмм, характеристики отключения практически приближаются к характеристикам «идеального» токоограничивающего выключателя. ВП при срабатывании обеспечивает быстрый, практически линейный рост напряжения и ограничение аварийного тока, переключая его в варисторный блок с соответствующим классификационным напряжением и рассчитанным по своей энергоемкости на рассеивание энергии отключения. Далее, после погасания дуги на контактах взрывного размыкателя, ток в варисторах линейно снижается до нуля при практически постоянном напряжении в силу его высоконелинейной вольтамперной характеристики в диапазоне изменения тока от 10^{-3} до 10^{3} А.

На рис. 5 приведены фотографии разрезов контактной системы взрывного замыкателя до и после срабатывания. Его основными элементами являются коаксиально размещенные цилиндрические внутренний электрод 1 (отожженная медь) и наружный электрод 2 с зубцеобразными кольцевыми проточками на внутренней поверхности. В исходном состоянии они разъединены и изолированы друг от друга изолятором 3 из полимерного материала. В осевом глухом отверстии внутреннего электрода установлен заряд ВВ 4 с помощью резьбовой заглушки, через отверстие в которой выведены проводники цепи инициирования. При взрыве заряда ВВ внутренний электрод без разрывов увеличивается в диаметре за счет пластической деформации мягкой медной стенки. При этом стенка изолятора 3 режется на острых кромках выступов внешнего электрода и его материал впрессовывается в кольцевые проточки. Внутренний электрод также врезается в острие кромки выступов и прочно фиксируется в таком положении (рис. 5,б), обеспечивая контактное переходное сопротивление на уровне 10^{-6} Ом. Величина сопротивления перехода не изменяется при нагружении расчетным длительным током и в циклическом режиме работы. Время срабатывания ВЗ с момента поступления инициирующего импульса до момента замыкания контактов не превышает 250-300 мкс.



а б

Рис. 5. Устройство и принцип действия взрывного замыкателя:
а – исходное состояние; б – состояние после срабатывания; 1 – внутренний контактный элемент; 2 – внешний контактный элемент; 3 – межконтактная изоляция; 4 – заряд ВВ; 5 – изоляционный материал

Опытные образцы взрывных размыкателей–предохранителей на различные номинальные напряжения (до 10 кВ) и но-

минальные токи (до 10 кА) неоднократно испытывались в лабораторных и промышленных условиях [6]. Возможность реализации АВР с их использованием была показана результатами промышленных испытаний в СЭС нефтепромысла «Оленье» (НГДУ «Васюганнефть»). СЭС таких объектов, как показано на рис. 6, построена по двухступенчатым радиальным схемам с применением РУ 6–10 кВ. Вся коммутационная аппаратура устанавливается на РУ, а питаемые от них мощные СД имеют преимущественно глухое присоединение. РУ – 6 кВ питаются по двум радиальным линиям, каждая из которых подключена к своей секции распределительной подстанции (РП). Во всех случаях предусматривается глубокое секционирование с возможностью АВР на всех ступенях от РП до РУ – 6 кВ. Нормальным состоянием параллельно подключенных секционных аппаратов: секционного масляного выключателя и ВЗ-10 – является состояние «отключено». ВЗ-10 срабатывает (замыкает цепь) по команде пускового устройства, регистрирующего параметры аварийного состояния на шинах подстанции с двигательной нагрузкой. При исследовании работы ВЗ-10 в схеме с АВР аварийная ситуация (глубокая посадка напряжения или длительное его исчезновение) имитировалась путем отключения вводного выключателя 1-й секции шин. Секционный масляный выключатель приводится в действие обслуживающим персоналом лишь в нормальных условиях эксплуатации.

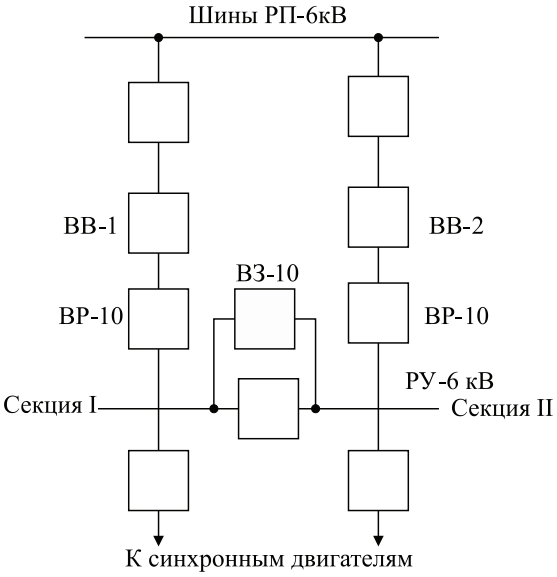


Рис. 6. Принципиальная схема РУ-6кВ со взрывными коммутационными аппаратами ВР-10 и ВЗ-10

По результатам регистрации параметров самозапуска двигателя СТД-1600 значение времени выбега при описанной выше имитированной аварийной ситуации не превышало $30 \cdot 10^{-3}$ с, при этом создавались относительно благоприятные условия для самозапуска СД. При увеличении времени перерыва электроснабжения примерно до 0,115 с угол расхождения δ_p уже достигает 105°, а при 0,185 с – 180°. Это свидетельствует о том, что при таком времени выбега реализовать АВР с успешным самозапуском при использовании на вводах в РУ обычных выключателей практически невозможно. Именно по этой причине в реальных условиях при глубоких посадках или исчезновении напряжения СД отключаются от защиты минимального напряжения и вновь запускаются оператором спустя несколько минут.

Для обеспечения эффективного перевода аварийной секции подстанции на резервное питание суммарное собственное время срабатывания коммутационной аппаратуры и время действия пускового устройства АВР не должно превышать 0,03–0,05 с. С этой целью предлагается на каждом вводе последовательно с ВВ1 и ВВ2 включить ВР-10. Создание пускового устройства на современных элементах микроэлектроники позволяет довести собственное время срабатывания до 0,01 с.

При такой схеме включения ВР-10 действует только по команде быстродействующего пускового устройства. ВВ1 и ВВ2 производят оперативные переключения. Снятие с вводных выключателей защитных функций от действия токов КЗ позволяет заменить их, например, выключателями нагрузки. Следует отметить, что представленная схема позволяет менять в процессе эксплуатации отработавшие взрывные коммутационные аппараты без отключения СД от сети.

Выводы

1. Использование взрывных замыкателей типа ВЗ-10 совместно с взрывными размыкателями типа ВР-10 и быстродействующим пусковым устройством позволяет осуществлять АВР без выхода из синхронизма СД мощностью 1600 кВт и более.

2. Наибольший эффект можно получить при использовании взрывных коммутационных аппаратов в системах электроснабжения с жесткими условиями технологического режима работы двигателей, требующих обеспечения устойчивого самозапуска.

Список литературы

1. Асташкин И.Н., Корольков В.Л., Круглянский И.М., Сивков А.А. Варисторное ограничение перенапряжения при отключении тока взрывным предохранителем // Изв. вузов. Электромеханика. – 1986. – № 8. – С. 83–89.

2. Голоднов Ю.М. Самозапуск электродвигателей. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.

3. Курганов В.В., Крышнев Ю.В. Применение адаптивного быстродействующего АВР на подстанциях промышленных предприятий с синхронной двигательной нагрузкой // Журнал ЭиМ. – 2002. – № 4(8). – С. 15–19.

4. Автоматическое включение резерва питания мощных синхронных двигателей с помощью взрывных коммутаторов / В.Л. Корольков, В.А. Даценко, А.А. Сивков, И.Н. Асташкин // Промышленная энергетика. – 1988. – № 12. – С. 26–28.

5. Корольков В.Л., Нестеренко А.Е., Сивков А.А. Исследование и расчет процесса образования межконтактного промежутка во взрывных выключателях // Изв. вузов. Электромеханика. – 1986. – № 1. – С. 81–87.

6. Сивков А.А., Корольков В.Л. Даценко В.А. Взрывной замыкатель: патент № 753305. 1993.

7. Взрывной вентильный предохранитель / А.А. Сивков, В.Л. Корольков, И.Н. Асташкин, А.Г. Червяков // Изв. вузов. Электромеханика. – 1988. – № 10. – С. 85–89.

8. Елагин П. Коммутационные ограничители тока. Новые устройства для защиты электрооборудования // Новости электротехники. Информационно-справочное издание. – 2004. – № 4.(28). – URL: http://www.news.elteh.ru/arh/2004/28/06.php.

References

1. Astashkin I.N., Korol'kov V.L., Krugljanskij I.M., Sivkov A.A. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika*, 1986. no. 8. pp. 83–89.

2. Golodnov Ju.M. *Samozapusk jelektrodvigatelej*. Moscow: Jenergo-atomizdat, 1985.136 p.

3. Kurganov V.V., Kryshnev Ju.V. *Zhurnal JeiM*, 2002 no. 4(8). pp. 15–19.

4. Korol'kov V.L., Dacenko V.A., Sivkov A.A., Astashkin I.N. *Promyshlennaja jenergetika*, 1988. no. 12. pp. 26 – 28.

5. Korol'kov V.L., Nesterenko A.E., Sivkov A.A. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika*, 1986. no. 1. pp.81 – 87.

6. Sivkov A.A., Korol'kov V. L. Dacenko V. A. Vzryvnoj zamykatel' Patent no. 753305. 1993.

7. Sivkov A.A., Korol'kov V.L., Astashkin I.N., Chervjakov A.G. *Izvestija vuzov. Jelektromehanika,* 1988. no. 10. pp. 85–89.

8. Elagin P. Kommutacionnye ogranichiteli toka. Novye ustrojstva dlja zashhity jelektro-oborudovanija // Novosti Jelektrotehniki. Informacionno-spravochnoe izdanie. no. 4.(28). 2004. URL: http://www.news.elteh.ru/arh/2004/28/06.php.

Рецензенты:

Кабышев А.В., д.ф-м.н., профессор, Томский политехнический университет, Энергетический институт, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», г. Томск;

Лавринович В.А., д.т.н., профессор, Томский политехнический университет, Энергетический институт, кафедра «Электроэнергетические системы», г. Томск.

Работа поступила в редакцию 29.01.2013.