

УДК 621.311.426; 621.3.064

**К.Н. Маренич /д.т.н./**

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

**И.Я. Чернов /к.т.н./, Е.В. Золотарев /к.т.н./**

ГБУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» (Донецк)

## **ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И АЛГОРИТМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СОСТАВЕ ШАХТНОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ**

*Обоснованы структура, методы и алгоритмы функционирования технических средств снижения коммутационных перенапряжений, выполненных на принципе шунтирования обмоток трансформатора активными и активно-емкостными элементами, в составе комплекса «высоковольтный коммутационный аппарат – трансформатор». Исследована возможность использования указанных средств снижения коммутационных перенапряжений в качестве отдельной системы автоматического ограничения перенапряжений, интегрированной в структуру электрической схемы шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции.*

**Ключевые слова:** комплектная трансформаторная подстанция, трансформатор, коммутация, перенапряжение, способы снижения перенапряжений, управление, алгоритм, структура.

### **Постановка проблемы**

К современным комплектным трансформаторным подстанциям (КТП) шахт и рудников всё чаще стали предъявляться требования по обеспечению встроенной в распределительное устройство высшего напряжения (РУВН) защиты силового трансформатора от различных аварийных ситуаций. Выполнить такую защиту становится возможным, используя высоковольтный коммутационный аппарат (ВКА), функционирующий совместно с собственным блоком защит и управления, размещёнными в РУВН такой подстанции [1].

Однако опыт эксплуатации КТП подобной конструкции выявил ряд технических задач, требующих эффективного решения. Одной из таких задач является задача снижения амплитуд коммутационных перенапряжений (КП), возникающих при коммутации ВКА, до приемлемого уровня, регламентированного нормативными документами, в частности ГОСТ 27863-88 [2]. Без использования эффективных средств защиты, КП способны повредить изоляцию обмоток силового трансформатора КТП и принести значительный материальный ущерб, связанный с дорогостоящими ремонтными работами трансформатора и простоям оборудования участка шахты [3].

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Применительно к исследованию параметров эффективности технических средств снижения КП, в комплексе «ВКА – трансформатор» КТП технологического участка шахты, в лаборатории ГБУ «НИИВЭ» были проведены натурные эксперименты с использованием различных типов ВКА и различных средств снижения КП, на основании которых получены следующие результаты:

1. Определены основные электрические параметры импульсов КП, возникающих в комплексе «ВКА – трансформатор», обусловленных коммутацией ВКА в цепи обмотки ВН трансформатора, при использовании различных технических средств снижения КП.

2. Определена степень влияния указанных технических средств, а также типа и конструкции ВКА на электрические параметры импульсов КП, возникающих в обмотках ВН трансформатора при функционировании исследуемого комплекса.

3. Обоснован и осуществлен выбор ряда технических средств по снижению КП для их дальнейшего анализа и применения в конструкции шахтной КТП.

4. Доказана высокая эффективность способа

снижения КП, основанного на предварительном шунтировании обмоток НН активными сопротивлениями с одновременным подключением активно-емкостных цепей к обмоткам ВН силового трансформатора [4,5].

Указанные практические результаты имеют хорошую согласованность с результатами анализа математической и компьютерной модели комплекса «ВКА – трансформатор», разработанной с учетом переходных процессов коммутации. При этом полученные расчётные данные кратностей перенапряжений для сухого трансформатора мощностью 400 кВ·А, коммутируемого элегазовым ВКА, отличались от результатов экспериментальных исследований не более, чем на 5-7 % [6].

Представленный способ снижения амплитуды КП был предложен к реализации в электрической схеме КТП с помощью интегрированной в её структуру системы автоматического ограничения перенапряжений (САОП), которую предполагается выполнить на полупроводниковой элементной базе с применением микропроцессорной техники [4].

### Цель (задачи) исследования

Целью исследования является разработка и обоснование принципов, алгоритмов и схемных решений устройства автоматического синхронного управления подключением средств снижения КП к обмоткам ВН и НН силового трансформатора шахтной участковой трансформаторной подстанции. При этом, указанное устройство должно функционировать в составе электрической схемы подстанции в качестве самостоятельной системы автоматического ограничения перенапряжений.

### Основной материал исследования

Как было отмечено выше, к функциям автоматической синхронизации коммутаций относятся:

- синхронное шунтирование обмоток НН силового трансформатора КТП активными сопротивлениями при отключении ВКА;
- синхронное шунтирование обмоток ВН силового трансформатора трансформаторной подстанции активно-емкостными цепями при включении и отключении ВКА.

Концепция работы системы автоматического снижения перенапряжений может быть реализована в структуре, электрическая схема которой приведена на рис. 1.

Схема работает следующим образом. Команда на выполнение коммутации ВКА одновременно поступает на его блок управления, иници-

ализируя процесс смены состояния его контактных групп, а также на вход 11 или 12 центрального микропроцессорного блока управления – А1, который, в свою очередь, формирует команду «Старт» (выход 24), являющуюся исходным сигналом для запуска процесса фиксации перехода синусоиды фазных напряжений через нуль блоком А2.

Сетевые фазные напряжения  $u_w, u_v, u_u$  через трехфазный понижающий трансформатор гальванической развязки TV3 поступают на входы 1...4 блока А2, который на выходах 5-8 формирует сигналы «единичного» логического уровня в моменты времени, когда мгновенные значения указанных напряжений будут равны нулю. Вышеупомянутые данные, поступающие на входы 1...4 блока А1, служат исходными параметрами для формирования задержек времени в алгоритме управления коммутатором активно-емкостных цепей К1. Исходным параметром для переключения коммутатора К2 является входной сигнал включения или отключения, поступающий на входы, соответственно, 11 или 12 блока А1.

Цепи обратной связи, предоставляющие данные о моментах времени коммутации ВКА и коммутаторов К1 и К2, выполнены посредством соответствующих блок-контактов, подключенных к входам 5...10 блока А1. Во избежание помех от «дребезга» контактных групп, эти цепи подключены к входу микропроцессора посредством стандартных электронных устройств, выполненных на базе триггера Шмидта.

Обмотки управления коммутаторами К1 и К2 подключены к выходам 13-17 блока А1. В отличие от коммутатора К2, переключение коммутатора К1 выполняется индивидуально для каждой фазы.

Центральный блок управления САОП А1 снабжен двумя выходами, которые задействуются в случае аварийных ситуаций в работе САОП. Для этого выход 18, 19 блока А1 подключается в цепь блокировки включения ВКА, а выход 20, 21 – в цепь отключения высоковольтной ячейки, питающей подстанцию.

Схема получает питание от источника, состоящего из трансформатора собственных нужд TV2 и блока питания А3. Для реализации защитной функции в случае отключения ВКА по причине срабатывания защиты нулевого напряжения, в схеме предусмотрен источник резервного питания А4, выполненный на базе электролитического конденсатора или ионистора, запасенной энергии которого должно быть достаточно для однократного срабатывания системы.

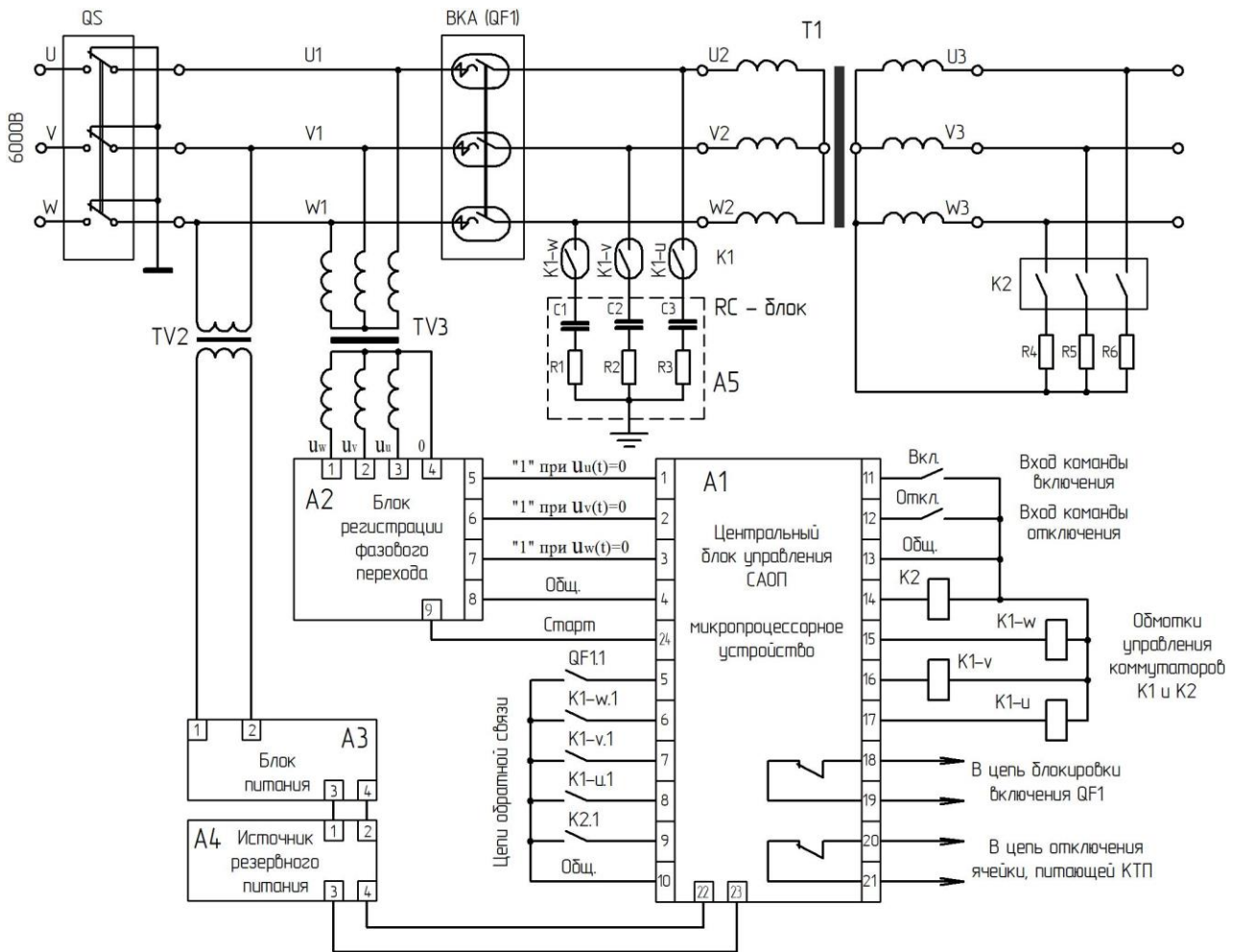


Рис. 1. Электрическая схема САОП в структуре шахтной участковой КТП:

- T1 – силовой трансформатор КТП; QF1 – ВКА; QS – разъединитель с короткозамыкателем;
- T2 – трансформатор собственных нужд; T3 – трехфазный понижающий трансформатор;
- K1 – коммутатор активно-емкостных цепей; K2 – коммутатор активных сопротивлений;
- A1 – центральный блок управления САОП, представляющий собой микропроцессорное устройство, реализующее функционирование основных алгоритмов управления коммутаторами K1 и K2;
- A2 – блок регистрации фазового перехода, выполняющий фиксацию момента времени перехода синусоиды напряжения каждой из фаз через нуль; A3 – блок питания схемы;
- A4 – источник резервного питания, обеспечивающий работу схемы при отключении ВКА в результате срабатывания защиты нулевого напряжения; A5 – блок активно-емкостных цепей;
- R4 – R6 – шунтирующие резисторы.

Процесс шунтирования обмоток НН трансформатора активными сопротивлениями, выполняемого коммутатором K2, осуществляется исходя из критериев оптимальности работы САОП и синхронизирован с процессом размыкания силовых контактов ВКА. А процесс шунтирования обмоток ВН силового трансформатора КТП активно-емкостными цепями, выполняемого коммутатором K1, осуществляется исходя из параметра коммутационной способности коммутатора K1 и синхронизирован с моментом перехода кривой сетевого напряжения через нуль.

Функциональная схема устройства управления коммутатором K2, учитывающая соблюде-

ние критериев оптимальности работы САОП, представлена на рис. 2.

Принцип работы схемы, представленной на рис. 2, заключается в следующем. В момент времени  $t_0$  команда на отключение ВКА поступает на вход разветвителя P, предназначенного для формирования синхронных сигналов исходной коммутации, характеризуемых моментом времени  $t_1$ . Эти сигналы подаются на входы блоков реле времени (БРВ1 и БРВ2), которые характеризуются соответствующими временными задержками  $time1$  и  $time2$ , представляющими собой переменные, способные изменять свои значения в процессе работы САОП.

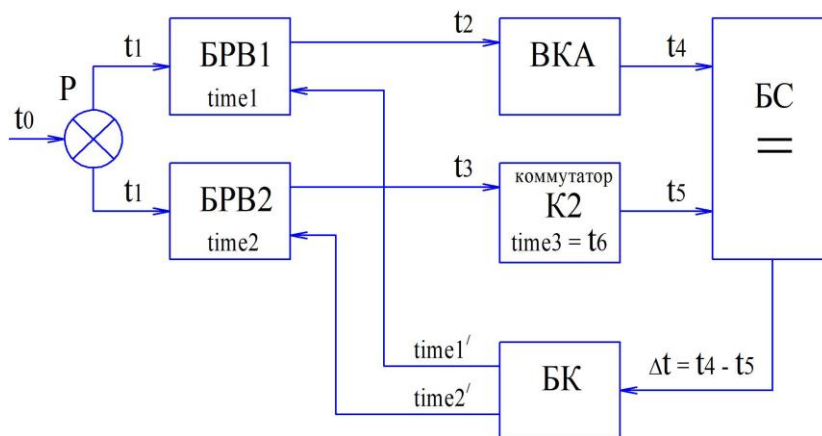


Рис. 2. Функциональная схема устройства управления коммутатором К2

При этом должно соблюдаться соотношение (1):

$$\begin{cases} \text{time1} = t_2 - t_1 \\ \text{time2} = t_3 - t_1 \end{cases} \quad (1)$$

Блок БРВ1 на выходе формирует команду отключения ВКА, характеризуемую моментом времени  $t_2$ . Блок БРВ2 на выходе формирует команду включения коммутатора К2, характеризуемую моментом времени  $t_3$ . Моменты времени  $t_4$  и  $t_5$  соответственно, характеризуются началом разведения силовых контактных групп ВКА ( $t_4$ ) и завершением процесса включения коммутатора К2 ( $t_5$ ).

В блоке сравнения БС происходит измерение и сравнение моментов времени  $t_4$  и  $t_5$ , а на его выходе формируется разность  $\Delta t = t_4 - t_5$ . Численное значение параметра  $\Delta t$  поступает на вход блока коррекции (БК), который в зависимости от его величины и знака формирует данные по коррекции переменных  $\text{time1}$  и (или)  $\text{time2}$  в блоках БРВ1 и БРВ2.

На рис. 3 представлена временная диаграмма

функционирования устройства управления, отображающая общий принцип формирования временных параметров управления ВКА и коммутатора К2. Приведенная диаграмма отображает случай, когда собственное время отключения ВКА, характеризуемое периодом  $T_2 = t_4 - t_2$ , больше собственного времени включения коммутатора К2, характеризуемое периодом  $T_3 = t_5 - t_3$ .

Время, когда коммутатор К2 находится во включенном положении характеризуется периодом  $T_4 = t_6 - t_5$ . Также из диаграммы видно, что периоды времени  $T_2$  и  $T_4$  пересекаются, при этом время пересечения соответствует параметру  $\Delta t = t_4 - t_5$ . Фактически,  $\Delta t$  – это период времени, когда ВКА и коммутатор К2 одновременно находятся во включенном состоянии.

Очевидно, что одним из условий оптимальности работы САОП является условие, когда параметр  $\Delta t \rightarrow 0$ . Однако в реальном физическом объекте присутствуют факторы погрешности системы управления, возникающие вследствие дребезга контактных групп коммутационных аппаратов, разброса времен их срабатывания и т.д.

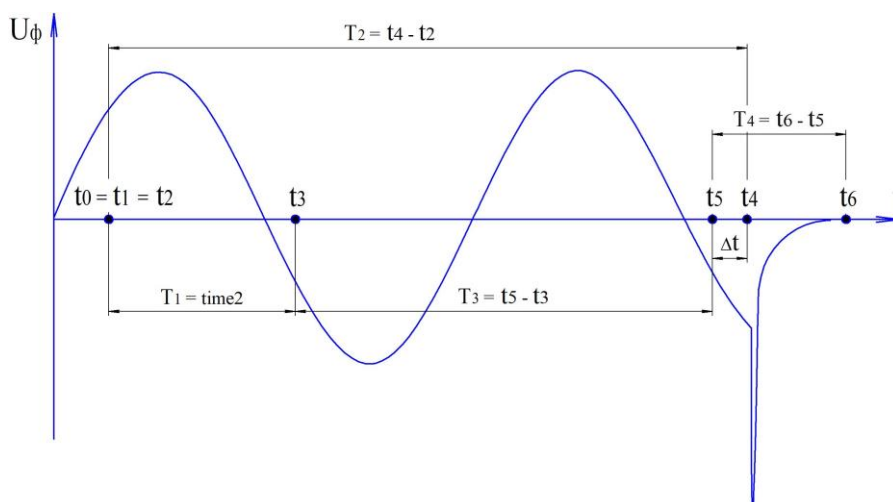


Рис. 3. Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К2

Поскольку позволить параметру  $\Delta t$  перейти в область отрицательных значений недопустимо, поэтому устанавливается некоторый запас времени, характеризуемый константой  $\xi$ , которая позволяет учесть несовершенство физического объекта. Следовательно, условием оптимальности функционирования САОП для реального физического объекта является выражение (2):

$$\Delta t \rightarrow \xi \quad (2)$$

Соблюдение условия (2) входит в функциональное назначение блока коррекции (БК), алгоритм работы которого представлен на рис. 4.

Представленный алгоритм позволяет скорректировать работу САОП при первом же цикле «включение – отключение» ВКА, которое целесообразно выполнить без подачи сетевого напряжения на обмотки трансформатора. Первая коррекция должна проводиться в заводских условиях, при помощи внешнего источника питания цепей управления, или использования специально предусмотренного источника резервного питания.

Входной информацией для БК являются следующие исходные данные:  $\Delta t$  – период времени одновременного пребывания во включенном положении ВКА и коммутатора К2;  $\xi$  – константа запаса времени, обусловленная дребезгом контактов ВКА и коммутатора К2;  $time1$  и  $time2$  – переменные, характеризуемые задержками времени блоков реле времени БВР1 и БВР2 соответственно. Указанные переменные поступают на вход БК исходя из условий предшествующего процесса отключения ВКА. После сравнения параметра  $\Delta t$  с константой  $\xi$ , БК вычисляет новые значения переменных  $time1$  и  $time2$  таким образом, чтобы выполнялось условие оптимальности (2) функционирования САОП для реального объекта.

Если собственное время отключения ВКА  $T_2$  составит меньше суммы собственного времени включения коммутатора К2  $T_4$  и константы  $\xi$ , то блок коррекции увеличит значение переменной  $time1$ , что, соответственно, приведет к увеличению общего времени отключения ВКА. Очевидно, что крайняя мера увеличения значения переменной  $time1$  может быть оправдана только тогда, когда переменная  $time2=0$ .

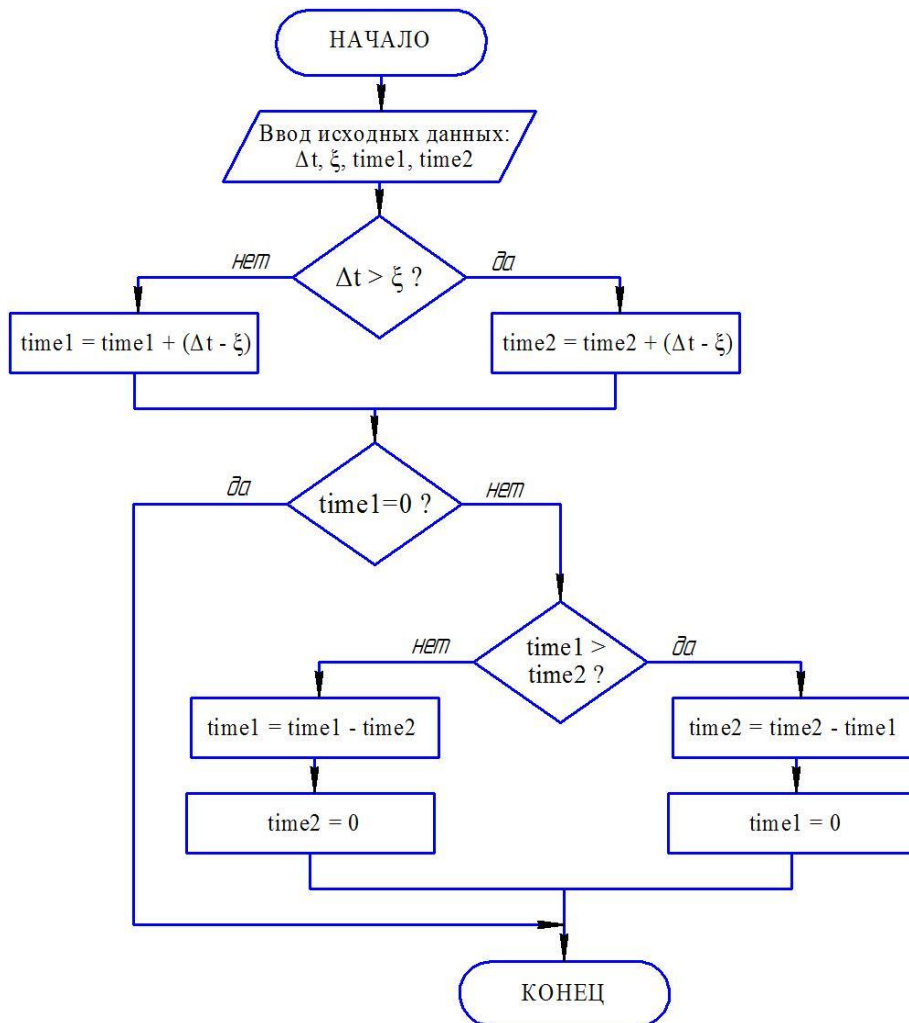


Рис. 4. Алгоритм функционирования блока коррекции БК

И, наоборот, нет необходимости увеличивать временную задержку  $time2$ , если  $time1 \neq 0$ . Поэтому алгоритм функционирования блока коррекции содержит проверку вышеупомянутых условий, приравнивая к нулю значение одной из переменных  $time1$  или  $time2$ , корректируя оставшуюся переменную  $time$  с учетом нулевого значения смежной переменной  $time$ .

Таким образом, одним из важнейших условий выбора коммутатора К2 при проектировании САОП, будет условие (3):

$$T_2 \geq T_3 + \xi \quad (3)$$

Алгоритм функционирования БК предусматривает отработку случая, когда условие (3) не выполняется. Однако такой режим уже не будет оптимальным режимом работы САОП. Поэтому система должна оповестить персонал о необходимости внеочередной ревизии объекта.

К коммутатору К1, предназначенному для подключения активно-емкостных цепей к обмоткам ВН силового трансформатора предъявляются следующие требования:

- номинальное напряжение коммутации – не менее 5000 В;
- номинальный ток коммутации – не менее 1А;
- коммутационная способность – не менее 3500 В·А;
- собственное время срабатывания коммутатора К1 должно быть, как минимум, на 30 % меньше собственного времени срабатывания ВКА.

Существующие коммутационные аппараты, удовлетворяющие вышеуказанным требованиям, обладают значительными массогабаритными показателями, сопоставимыми массогабаритными показателями с ВКА, из-за чего их использование в конструкции рудничных КТП нецелесообразно.

В то же время, для заявленных целей могут быть использованы высоковольтные вакуумные герконы типа МКА-40142 с Мо-Ті геттерирующим покрытием [7]. При прочих удовлетворительных параметрах (в т.ч. и массогабаритных), указанные герконы имеют очень низкую коммутационную способность.

Однако, если в процессе коммутации такого геркона выполнить синхронизацию момента переключения его контактов с моментом перехода кривой сетевого напряжения (или тока) через нуль, то коммутируемая мощность также будет околонулевой.

Таким образом, необходимым условием применения высоковольтных герконов типа МКА-40142 для управления активно-емкостными цепями снижения КП, является использование специального алгоритма коммутации, при котором подключение и отключение средств подавления КП происходит в момент перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль.

Функциональная схема устройства управления коммутатором К1, учитывающая синхронизацию момента включения его контактов с моментом перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль в режиме отключения ВКА, представлена на рис. 5. Управление процессом коммутации выполняется отдельно для каждой фазы коммутатора К1.

При поступлении команды отключения ВКА, характеризуемого случайным моментом времени  $t_0$ , происходит моментальная безусловная подача команды на его отключение. Собственное время отключения ВКА  $T_{02}$ , характеризуется разностью времен между моментом начала разведения силовых контактов ВКА  $t_{04}$  и моментом подачи команды отключения  $t_0$  на его блок управления. Время  $T_{02}$  является паспортной характеристикой для каждого конкретного типа ВКА и обычно составляет несколько десятков миллисекунд.

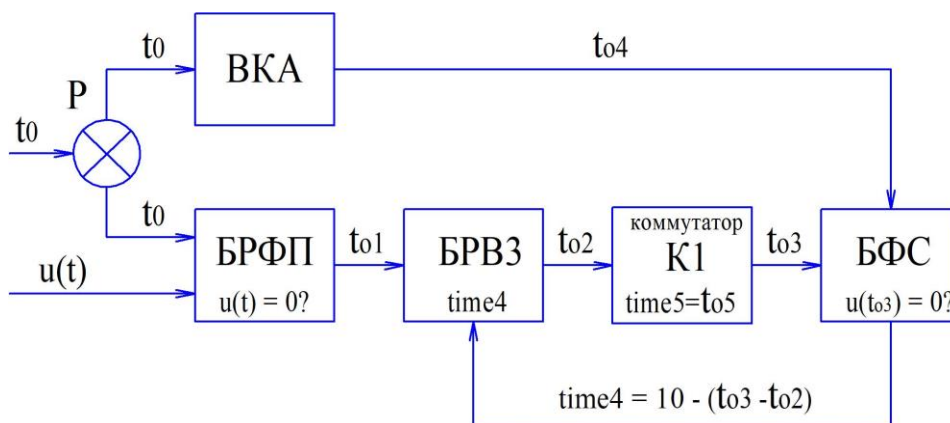


Рис. 5. Функциональная схема устройства управления коммутатором К1 при отключении ВКА

Одновременно с этим, в момент времени  $t_0$ , блок регистрации фазового перехода (БРФП) запускает процесс отслеживания мгновенных значений фазного напряжения  $u(t)$ . Как только будет выполнено условие  $u(t)=0$ , характеризующее моментом времени  $t_{01}$ , блок реле времени (БРВЗ) после временной паузы длительностью  $T_{03}=\text{time4}$  подаст команду на включение коммутатора К1. Величина выдержки времени  $\text{time4}$  выбирается таким образом, чтобы момент замыкания контактов коммутатора К1 произошел в момент перехода кривой сетевого напряжения через нуль (момент времени  $t_{03}$ ).

Блок фазовой синхронизации (БФС) выполняет двоякую функцию: во-первых, осуществляется контроль того, что отключение ВКА происходит при включенном коммутаторе К1 ( $t_{04}>t_{03}$ ), а, во-вторых, выполняется проверка того, что замыкание контактов коммутатора К1 произошло при нулевом мгновенном значении фазного напряжения  $u(t_{03})=0$ .

При этом контроль условия  $t_{04}>t_{03}$  выполняется при помощи сравнения моментов времени срабатывания блок-контактов ВКА и коммутатора К1. А проверка условия  $u(t_{03})=0$  выполняется косвенно, исходя из принятого допущения, что длительность полупериода сетевого напряжения стабильна и составляет 10 мс, т.е. момент замыкания контактов коммутатора К1 будет происходить в момент перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль, если будет выполняться равенство (4):

$$T_{кв} + T_{03} = T/2 \text{ мс} \quad (4)$$

где  $T_{кв}$  – собственное время включения коммутатора К1;  $T_{03}=\text{time4}$  – временная задержка блока БРВЗ;  $T=20$  мс – период сетевого напряжения.

Если равенство (4) не выполняется, то блок БФС осуществляет коррекцию величины временной задержки  $\text{time4}$ .

Отключение коммутатора К1 происходит после завершения переходного процесса в момент времени  $t_{05}$ , который определяется в соответствии с экспериментальными данными с учетом гарантированного «запаса». Время нахождения коммутатора К1 во включенном состоянии составляет  $T_{04}=t_{05}-t_{03}$ .

Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1, отображающая общий принцип формирования его временных параметров управления для режима отключения ВКА, представлена на рис. 6.

Принцип управления коммутатором К1 при включении ВКА остается таким же, как и при его отключении. Различия состоят лишь в последовательности выполняемых операций. Управление также выполняется отдельно для каждой фазы коммутатора К1.

Функциональная схема устройства управления коммутатором К1, учитывающая синхронизацию момента отключения его контактов с моментом перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль в режиме включения ВКА, представлена на рис. 7.

При поступлении команды включения ВКА, характеризующего моментом времени  $t_0$ , происходит безусловная подача команды на включение, непосредственно, ВКА и коммутатора К1. Так как предполагается, что собственное время включения коммутатора К1 гораздо меньше собственного времени включения ВКА, то К1 включится раньше, а его включение обозначится моментом времени  $t_{e1}$ . Через некоторое время, характеризующее моментом  $t_{e2}$ , произойдет включение ВКА.

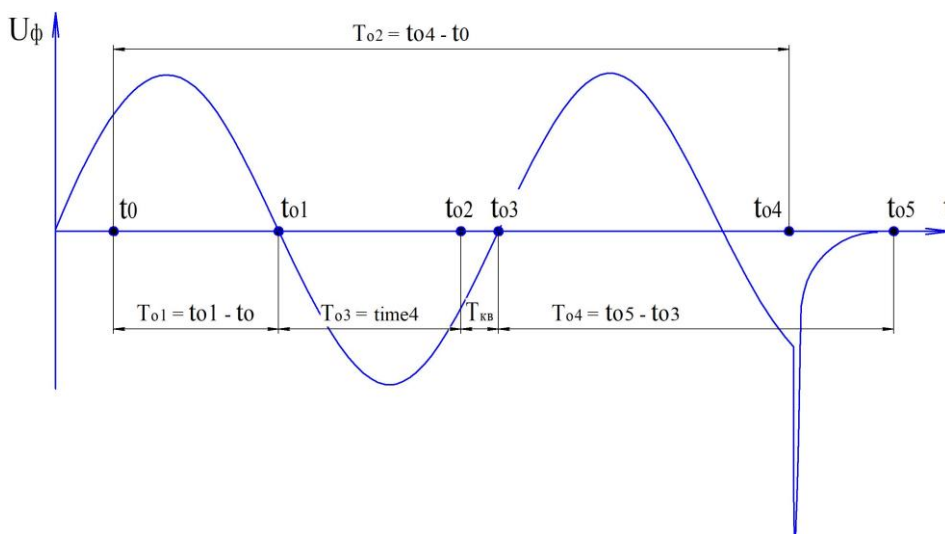


Рис. 6. Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1 при отключении ВКА

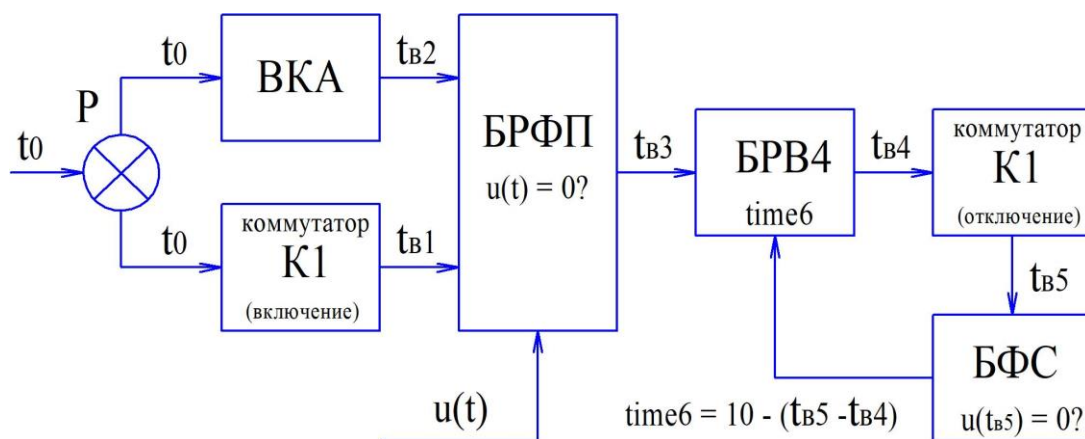


Рис. 7. Функциональная схема устройства управления коммутатором К1 при включении ВКА

При подтверждении того, что ВКА и коммутатор К1 одновременно находятся во включенном состоянии, БРФП запускает процесс отслеживания мгновенных значений фазного напряжения  $u(t)$ . Как только будет выполнено условие  $u(t)=0$ , характеризующее момент времени  $t_{\epsilon 3}$ , блок реле времени (БРВ4) после временной паузы длительностью  $T_{\epsilon 4}=\text{time6}$ , подаст команду на отключение коммутатора К1. Значение временной выдержки  $\text{time6}$  выбирается таким образом, чтобы момент размыкания контактов коммутатора К1 произошел в момент перехода синусоиды сетевого напряжения через нуль (момент времени  $t_{\epsilon 5}$ ).

Блок фазовой синхронизации (БФС) выполняет проверку размыкания контактов коммутатора К1 при нулевом мгновенном значении фазного напряжения  $u(t_{\epsilon 5})=0$ , исходя из условия со-

блюдения равенства (5):

$$T_{\text{ко}} + T_{\epsilon 4} = T/2 \text{ мс} \tag{5}$$

где  $T_{\text{ко}}$  – собственное время отключения коммутатора К1;  $T_{\epsilon 4}=\text{time6}$  – временная задержка блока БРВ4;  $T=20$  мс – период сетевого напряжения.

Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1, отображающая общий принцип формирования его временных параметров управления при включении ВКА представлена на рис. 8.

Если равенство (5) не выполняется, то блок БФС осуществляет коррекцию величины временной задержки  $\text{time6}$ . Время нахождения коммутатора К1 во включенном состоянии составляет  $T_{\epsilon 2}=t_{\epsilon 5}-t_{\epsilon 1}$ .

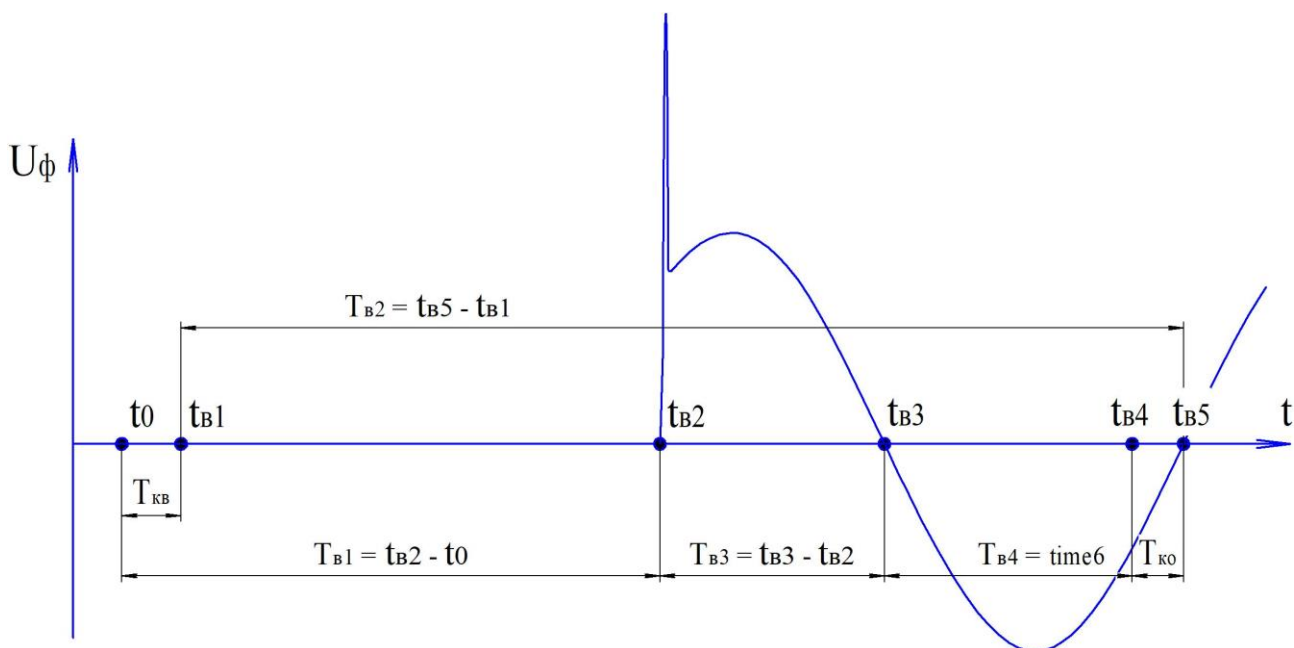


Рис. 8. Временная диаграмма функционирования устройства управления коммутатором К1 при включении ВКА



**Выводы**

Таким образом, представленная на рис. 1 структурная схема является комплексным техническим решением, обеспечивающим функционирование средств снижения КП в структуре шахтной участковой КТП, оснащенной ВКА, а разработанные принципы, алгоритмы и схемные решения автоматического синхронного управления подключением средств снижения КП к обмоткам ВН и НН трансформатора шахтной КТП, позволяют выполнить их комплексную практическую реализацию в качестве подсистемы автоматического ограничения перенапряжений, интегрированной в общую структуру подстанции.

**Список литературы**

1. Вареник, Е.А. Идеология построения электрических защит взрывобезопасных трансформаторных подстанций серии ТВПШ / Е.А. Вареник, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев, А.В. Савицкий, В.Н. Савицкий // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк: ООО «Типография Восток Пресс», 2017. – №1(52). – С. 14-24.
2. Устройства защиты от коммутационных перенапряжений подземных электрических сетей угольных шахт: ГОСТ 27863-88 (Ст. СЭВ 6041-87). – [Введен в действие 1989-07-01] – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1988. – 8 с.
3. Маренич, К.Н. Проблемные вопросы применения высоковольтного вакуумного выключателя в конструкции шахтной участковой трансформаторной подстанции / К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев // Вестник Донецкого национального технического университета. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – Вып. 4(18). – С. 53-61.

4. Чернов, И.Я. Система автоматического ограничения перенапряжений как структура управления коммутационными процессами в силовом трансформаторе шахтной участковой трансформаторной подстанции / И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев, И.В. Ковалева. – Информатика и кибернетика №1(19). – Донецк: ДонНТУ, 2020. – С. 52-62.
5. Золотарев Е. В. Исследование коммутационных перенапряжений в трансформаторе шахтной участковой подстанции / Е.В. Золотарев // Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2019): сборник трудов XVII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. – Т.2. – С. 142-147.
6. Маренич, К.Н. Исследование модели управляемого подавления коммутационных перенапряжений в трансформаторной подстанции / К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев // Сборник научных трудов ДонИЖТ, 2020. – №57. – С. 15-30.
7. Арушанов, К.А. Высоковольтный вакуумный геркон [Электронный ресурс] / К.А. Арушанов, И.А. Зельцер, В.М. Ермаков, Е.Б. Трунин. – Режим доступа: <http://www.rmcip.ru/files/rus/pdf/articles/2011/cf2c025db6f852ab622517e2c6f23975.pdf>. – Загл. с экрана (01.11.2021 г.).

**K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**I.Y. Chernov /Cand. Sci. (Eng.)/, Y.V. Zolotarev /Cand. Sci. (Eng.)/**

*Scientific-Research, Project-Designing and Technological Institute of Explosion Proof and Mine Electrical Equipment (Donetsk)*

**SUBSTANTIATION OF THE STRUCTURE AND ALGORITHMS  
FOR THE OPERATION OF THE AUTOMATIC OVERVOLTAGE LIMITATION  
SYSTEM AS PART OF THE ELECTRICAL CIRCUIT OF THE MINE SECTION  
COMPLETE TRANSFORMER SUBSTATION**

**Background.** *Substantiated the structure, methods and algorithms for the functioning of technical means for reducing switching overvoltages, made on the principle of shunting the transformer windings with active and active-capacitive elements, as part of the "high-voltage switching device - transformer" complex.*

**Materials and/or methods.** *Considered the principles of synchronous shunting of low-voltage windings of a power transformer using active resistances, as well as the principles of synchronous shunting of high-voltage windings of a power transformer using active-capacitive resistances.*

**Results.** *Functional diagrams, algorithms and timing diagrams of the functioning of technical means*

for reducing switching overvoltages have been developed, as part of the general structure of the electrical circuit of a mine section transformer substation.

**Conclusion.** The possibility of using the indicated means of reducing switching overvoltages as a separate system for automatic overvoltage limiting, functioning in the structure of the electric circuit of a mine section complete transformer substation, has been theoretically proved.

**Keywords:** complete transformer substation, transformer, switching, overvoltage, methods of overvoltage reduction, control, algorithm, structure.

**Сведения об авторах:**

**К.Н. Маренич**

SPIN-код: 8632-8425  
Author ID: 377905  
ORCID iD: 0000-0002-6309-4986  
Телефон: +380 (71) 301-98-61  
Эл. почта: knm1@donntu.org

**И.Я. Чернов**

SPIN-код: 6969-9416  
Телефон: +380 (71) 348-03-55  
Эл. почта: kniot\_i\_tp@mail.ru

**Е.В. Золотарев**

SPIN-код: 6936 -6692  
Телефон: +380 (71) 412-10-54  
Эл. почта: transformator76@inbox.ru

Статья поступила 27.05.2021 г.  
© К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев, 2021  
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалёв

