

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

ГУ «Научно-исследовательский институт взрывобезопасного электрооборудования» (Донецк)

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ В КОНСТРУКЦИИ ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Проанализирована особенность коммутации активной части трансформатора шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции посредством применения встроенного в подстанцию вакуумного выключателя. Приведены и проанализированы результаты опытной эксплуатации комплектной трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2 в части воздействия коммутационных перенапряжений на физическое состояние изоляции высоковольтной обмотки ее трансформатора. Установлены недостаточные функциональные возможности ограничителей перенапряжения типа ОПН-КР/TEL-6/6,9 в части подавления амплитуд импульсов перенапряжений, создаваемых при коммутации высоковольтной обмотки трансформатора подстанции вакуумным коммутатором, расположенным в непосредственной близости от нее.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция участка шахты, высоковольтная обмотка трансформатора, коммутация, перенапряжение, исследование, параметры.

Постановка проблемы

Характерной особенностью конструкции проектируемых в настоящее время шахтных участковых комплектных трансформаторных подстанций (КТП) серии ТВКП является применение вакуумного либо элегазового высоковольтного коммутационного аппарата (ВКА) для коммутации первичной (высоковольтной) обмотки силового трансформатора. Такое техническое решение позволило более рационально реализовать: функцию максимальной токовой защиты (защитное отключение техническими средствами непосредственно самой трансформаторной подстанции на стороне высшего напряжения) и структуру схемы электроснабжения шахты (возможность подключения нескольких КТП разной мощности к выходу одного комплектного высоковольтного распределительного устройства).

Однако применение быстродействующих силовых ВКА сопровождается возникновением коммутационных перенапряжений (КП). Неблагоприятные последствия процессов усугубляются при размещении ВКА в непосредственной близости от силового трансформатора, обладающего значительной нелинейной индуктивностью [1,2]. Это подтверждается и результатами опытной эксплуатации комплектной трансформаторной подстанции типа ТВКП-1000/6-1,2, где следствием многочисленных повторяющихся КП

явилось разрушение фрагментов фазных первичных обмоток трансформатора.

Таким образом, реализация схемы КТП со встроенным ВКА требует применения эффективных средств защиты от КП либо подавления КП.

Анализ последних исследований и публикаций

Предпосылки применения ВКА в цепи подключения силовых вводов КТП рассмотрены применительно к исследованию воздействия КП, обусловленных работой вакуумного контактора КВТ-10-400-4У2 [3], на функциональные элементы трансформаторов подстанций серий ТСШВП-Х/6; ТСВП-Х/6; ТКШВП-1000/6 с дисковыми обмотками [4]. Учитывая, что изначально применение ВКА непосредственно в составе КТП не предусматривалось, физическая модель исследования была дополнена кабелем длиной 60 м, соединяющим ВКА с высоковольтной обмоткой трансформатора КТП. Определение наиболее опасных режимов коммутации проведено без средств снижения перенапряжений, однако случаев повреждения изоляции трансформаторов зафиксировано не было.

Оценка условий возникновения КП при отключении вакуумным выключателем режима холостого хода (ХХ) трансформатора в электрической сети среднего уровня напряжения пред-

ставлена в исследовании [5]. В результате анализа степени влияния каждого элемента сети на вероятность и параметры возникновения КП, отмечено наличие условий, снижающих эффективность функционирования нелинейных ограничителей перенапряжений.

Типичным проявлением воздействия КП на активные части электрооборудования в сетях высокого напряжения являются зафиксированные аварийные состояния повышающих трансформаторов мощностью 2,65 МВА (напряжение 0,69/33,3 кВ при эксплуатации мощных генераторных установок на ветровых электростанциях Канады). Исследованием [6] установлено, что причиной повреждений оказались перенапряжения, возникающие при коммутации сети вакуумными выключателями, в частности высокочастотные составляющие параметров переходного коммутационного процесса и крутые передние фронты напряжения, при которых нелинейные ограничители напряжений неэффективны.

Результаты исследования КП при коммутации шахтного электрооборудования и, в частности, режим отключения ненагруженного трансформатора мощностью 1 МВА представлены в [7], где содержится вывод о том, что наиболее эффективным средством защиты от перенапряжений при отключении индуктивных нагрузок вакуумными выключателями является RC-цепь в сочетании с нелинейным ограничителем напряжения. В этом случае передний фронт импульса принимает на себя RC-цепь, а затем вступает в работу ограничитель, разгружая ее по мощности.

В исследовании [8] доказывается, что применение нелинейных ограничителей перенапряжений не позволяет ограничить опасные для градиентной изоляции коммутируемых ненагруженных трансформаторов высокочастотные перенапряжения. Поэтому их использование не может быть отнесено к эффективным техническим решениям.

Таким образом, потенциальная опасность разрушительного действия КП относительно обмоток силовых трансформаторов в сетях высокого напряжения объективно существует. Обоснованное рядом технических преимуществ применение ВКА в составе КТП (на стороне высшего напряжения) обуславливает необходимость уточнения специфики проявления КП в данном объекте с целью разработки эффективных защитных технических средств.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является выявление характерных особенностей и закономерностей воздействия процесса коммутации активной части

трансформатора шахтной КТП высоковольтным коммутационным аппаратом при условии его расположения непосредственно на вводе первичной обмотки высокого напряжения расположенным в непосредственной близости от нее высоковольтным ВКА. В частности, практическую актуальность представляет определение амплитудных значений КП, а также их длительности при отключении активной части трансформатора КТП посредством ВКА в режимах ХХ и при подключенном к обмоткам низшего напряжения (НН) этого трансформатора асинхронном двигателе; оценка эффективности (для данных условий) средств подавления КП, выполненных на базе нелинейных ограничителей перенапряжения типа ОПН-КР/TEL-6/6,9, рекомендованных к применению в составе рудничного взрывозащитного электрооборудования.

Основной материал исследования

Предварительные выводы о специфике воздействия КП на активную часть трансформатора КТП при расположении ВКА в непосредственной близости от этого трансформатора (в составе КТП) могут быть сделаны на основании анализа технического состояния функциональных элементов трансформатора, функционировавшего в ходе опытно-промышленной эксплуатации комплектной участковой трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2 в условиях угольной шахты. В данном случае в составе распределительного устройства высшего напряжения КТП применен ВКА типа ВВ/TEL-10-20/1000-У2 производства предприятия «Таврида Электрик», а для защиты от КП в конструкции КТП в соответствии с общепринятой практикой использованы ограничители перенапряжений согласно рекомендациям предприятия – изготовителя вакуумного выключателя [3].

По результатам опытно-промышленной эксплуатации зафиксирован выход из строя трансформатора КТП вследствие разрушения его обмоток высшего напряжения (ВН). В частности, установлено, что по характеру разрушения обмоток имел место пробой изоляции силового трансформатора вследствие образования дуги между крайними витками первой катушки обмотки ВН фазы «В» и ярмовой балкой магнитопровода по воздуху с последующим развитием дуги на катушки фаз «В» и «А» (рис.1). Очевидной причиной образования дуги представляются перенапряжения при коммутации обмотки ВН силового трансформатора с помощью ВКА, что согласуется с классической теорией дугообразования [9].

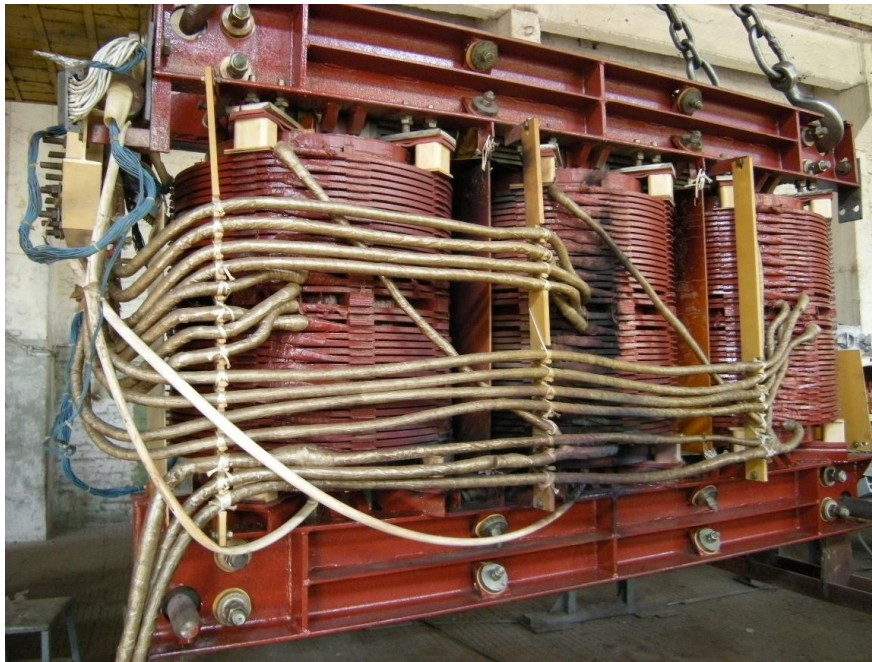


Рис. 1. Активная часть трансформатора подстанции ТВКП-1000/6-1,2 со следами дугового прожига изоляции фазных обмоток ВН, характерного при воздействии коммутационных перенапряжений

По характеру повреждений видно, что имели место множественные случаи пробоя изоляции обмоток ВН на выступающие участки ярмовой балки магнитопровода, причем расстояние по воздуху составляло более 60 мм (рис. 2). Особенности конструкции и взаиморасположения элементов активной части трансформатора подстанции и характер выявленных повреждений дают основания сделать следующие предположения относительно процессов, обуслов-

ленных КП. В частности, в результате множественных электрических пробоев изоляции под воздействием ионизации снизилось общее сопротивление окружающего воздуха, а образовавшийся электропроводящий «нагар», представляющий собой частицы поврежденной изоляции обмоток, осел на опорных изоляторах 4 и электроизоляционном экране 3, что в итоге привело к устойчивому замыканию обмоток ВН на землю.

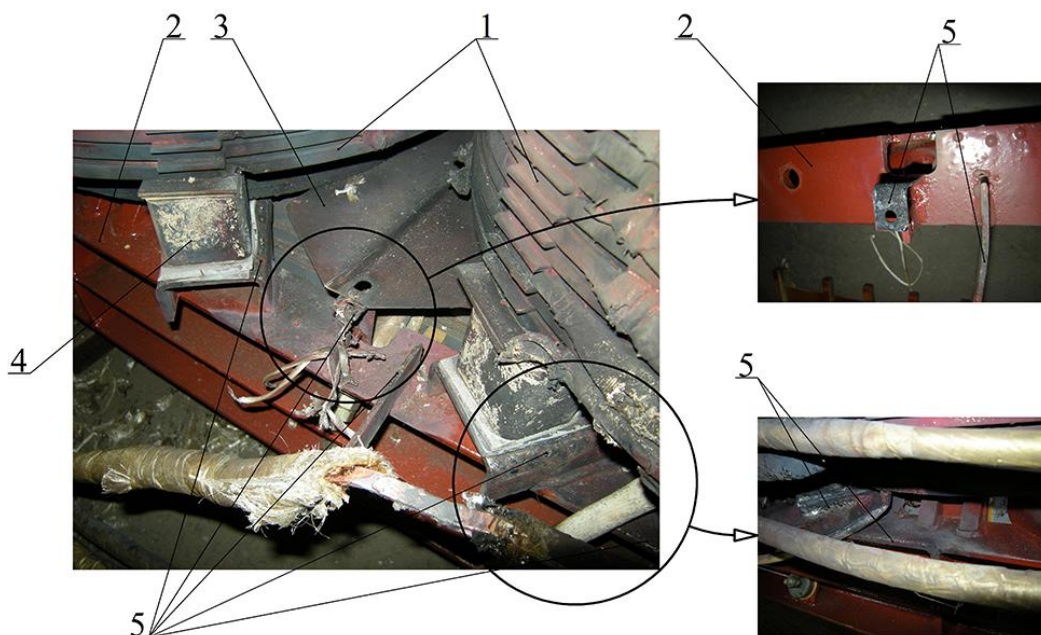


Рис. 2. Фиксация пробоя изоляции обмоток на ярмовую балку магнитопровода:
 1 – обмотки ВН; 2 – ярмовая балка магнитопровода; 3 – электроизоляционный экран;
 4 – опорный изолятор; 5 – место пробоя изоляции обмоток на ярмовую балку магнитопровода

Кроме того, важную роль сыграл фактор общего снижения сопротивления изоляции активной части при ее нагреве (во время работы КТП под нагрузкой).

На рис. 3 показаны результаты пробоя междуфазной изоляции между обмотками фаз «А» и «В» 1. В верхней и средней части обмотки фазы «В» наблюдаются два характерных места пробоя изоляции 4. На то, что причиной этих повреждений явились именно коммутационные перенапряжения, указывает расположение мест пробоя изоляции с внешней стороны обмотки (изоляция проводников внутренних слоев обмотки повреждений не имеет). Пробой происходил с обмотки на обмотку через междуфазную электроизоляционную перегородку 2 из стеклотекстолита толщиной 4 мм, на которой также видны соответствующие места повреждения 5.

Наличие пробоя изоляции через воздушный промежуток более 60 мм объясняется не только ионизацией воздушного пространства в оболочке КТП, изолированной от внешней среды, но также и переносом молекул обмоточной меди в воздушную среду под действием электрического поля высокой напряженности, возникающего при КП.

На рис. 4 приведен участок внутренней стенки взрывозащищенного корпуса подстанции с

характерным медным напылением, образовавшимся в результате систематического пробоя изоляции обмотки ВН одной из фаз.

Таким образом, опытный образец трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2, разработанный в соответствии с требованиями действующей нормативно-технической документации и прошедший полный комплекс лабораторных испытаний, в т.ч. испытание главной изоляции обмоток ВН трансформатора приложенным испытательным напряжением промышленной частоты – 20 кВ, вышел из строя в результате возникновения перенапряжений при коммутации токов в сетях с использованием вакуумной техники.

Как показали промышленные испытания, реальные перенапряжения, возникающие в рассматриваемом объекте в условиях шахтной сети, оказались выше допустимых значений, и традиционно принятых мер по их снижению оказалось недостаточно. Этим подтверждается актуальность поиска технических решений в контексте ограничения либо полного подавления коммутационных перенапряжений, возникающих в КТП, содержащей ВКА, непосредственно подключенный к входу трехфазной первичной обмотки силового трансформатора.

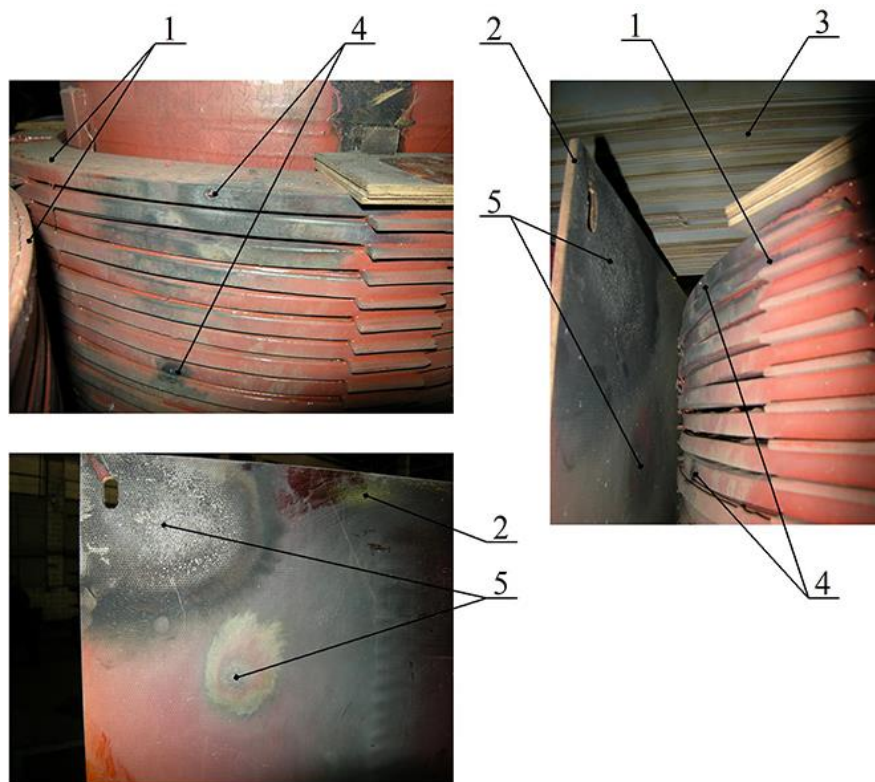


Рис. 3. Фиксация пробоя междуфазной изоляции активной части трансформаторной подстанции ТВКП-1000/6-1,2:

- 1 – обмотки ВН; 2 – междуфазная электроизоляционная перегородка;
- 3 – ярмо магнитопровода; 4 – место пробоя изоляции обмоток;
- 5 – место пробоя изоляции междуфазных электроизоляционных перегородок

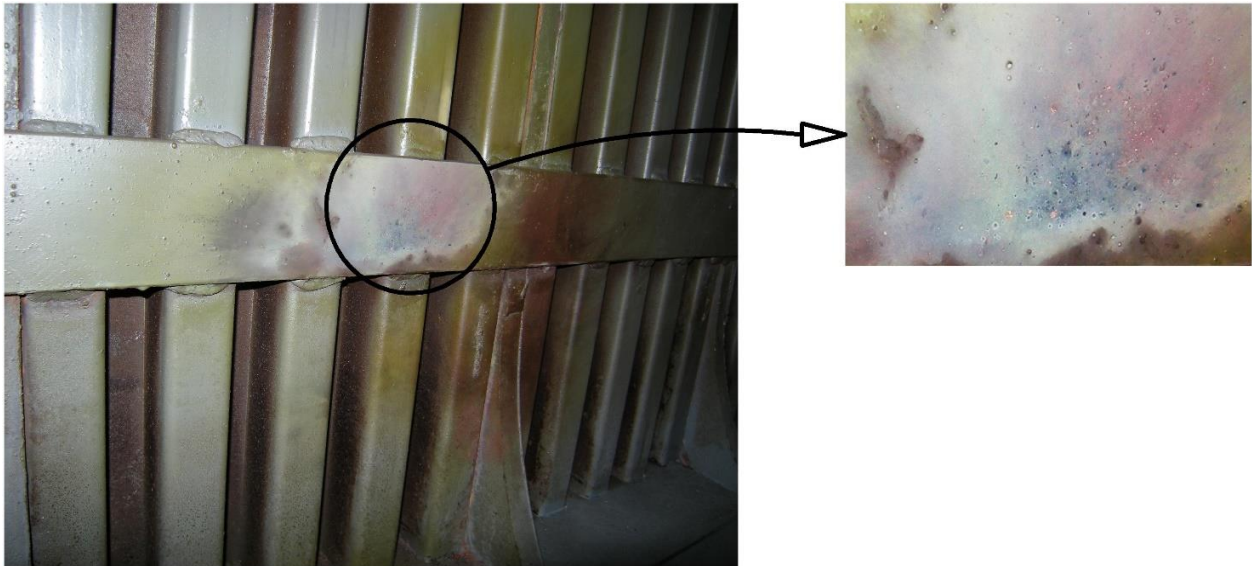


Рис. 4. Результат пробоя изоляции на внутреннюю стенку взрывозащищенного корпуса

Параметры возмущающих воздействий, обусловленных коммутационными перенапряжениями, определяются закономерностями протекания электромагнитных процессов в объекте. Так, при отключении индуктивной нагрузки ВКА происходит так называемое явление среза тока, заключающееся в том, что, если момент начала разведения контактов ВКА не совпадает с нулем тока промышленной частоты, то между контактами выключателя загорается дуга, которая горит в парах металла контактов [10]. Срез тока в вакуумном выключателе – это практически мгновенный его обрыв (до момента перехода кривой через нуль), обеспеченный, в частности, отсутствием среды, поддерживающей горение дуги в вакууме [11]. При этом в индуктивности нагрузки «запирается» энергия, которая затем освобождается на емкость присоединения, что вызывает перенапряжения, значительно превышающие величину амплитудного напряжения в сети.

Кратность перенапряжений при этом определяется индуктивностью нагрузки, емкостью присоединения (длиной кабельной линии) и величиной среза тока, который различается для выключателей с разными дугогасящими средами и химическим составом материала контактов [12].

Энергия магнитного поля, запасенная в обмотке трансформатора, определяется выражением:

$$W_L = \frac{L_{обм} \cdot I_{ср}^2}{2}. \quad (1)$$

В момент среза тока она переходит в электрическую энергию, определяемую выражением:

$$W_C = \frac{C_{обм} \cdot U_m^2}{2}. \quad (2)$$

Этот процесс описывается уравнением:

$$\frac{C_{обм} \cdot U_m^2}{2} = -\frac{C_{обм} \cdot U_o^2}{2} + \frac{L_{обм} \cdot I_{ср}^2}{2}, \quad (3)$$

где U_m – максимальная ожидаемая амплитуда перенапряжений; $I_{ср}$ – ток среза; U_o – напряжение на обмотке в момент среза тока; $L_{обм}$ и $C_{обм}$ – соответственно индуктивность и емкость обмотки.

Таким образом, максимальное ожидаемое перенапряжение составит:

$$U_m = \sqrt{U_o^2 + \frac{L_{обм}}{C_{обм}} \cdot I_{ср}^2}. \quad (4)$$

Данная формула иллюстрирует суть физического процесса, происходящего в обмотке трансформатора при его отключении в ненагруженном режиме. Исходя из выражения (4) можно сделать вывод, что в реальной конструкции шахтной участковой КТП параметры $L_{обм}$ и $C_{обм}$ являются величинами постоянными, а параметры U_o и $I_{ср}$ обладают вероятностными свойствами. А так как нагрузка носит явно выраженный индуктивный характер (отставание по фазе тока от напряжения достигает 90 эл. град.), то при $U_o = \max$; $I_{ср} \rightarrow 0$, и наоборот, при $I_{ср} \rightarrow \max$; $U_o = 0$.

Представленные зависимости в совокупности определяют предпосылки возникновения коммутационных перенапряжений в функциональной взаимосвязи с параметрами коммутации силовой высоковольтной цепи и ее активно-реактивных элементов. Практический интерес представляет установление конкретных значений параметров коммутационных перенапряжений примени-

тельно к объекту исследования. Исследования выполнены на стенде, схема которого приведена на рис. 5. В соответствии со схемой, сетевое напряжение 6 кВ через разъединитель *QS1* подается на вакуумный выключатель *QF1* типа ВВ/TEL-10-20/1000-У2, а с него – на обмотку ВН силового трансформатора (Т) типа ТСВ-400/6. Выключатель *QF1* расположен в непосредственной близости от трансформатора и подключен к его обмотке проводниками длиной не более 1 м. К входным клеммам обмотки ВН трансформатора по схеме «звезда с заземленной общей точкой» подключены ограничители перенапряжений типа ОПН-КР/TEL-6/6,9 (*R1...R3*). Измеряемый сигнал, снятый с делителя *R4...R7*, при помощи экранированного измерительного кабеля подается на вход цифрового осциллографа Tektronix TDS 2002 (*P1*). К обмотке НН трансформатора через автоматический выключатель *QF2* типа А3792У подключен асинхронный двигатель (АД) мощностью 30 кВт.

Осциллографировалось четыре режима измерения:

- отключение ненагруженного трансформатора при подключенных ограничителях перенапряжений (осциллограммы рис. 6а...в);
- отключение ненагруженного трансформатора при отключенных ограничителях перенапряжений (осциллограмма рис. 6г);
- отключение трансформатора, нагруженного на асинхронный двигатель, работающий в режиме ХХ при подключенных ограничителях перенапряжений (осциллограмма рис. 7а);
- отключение трансформатора, нагруженного на асинхронный двигатель, работающий в режиме ХХ при отключенных ограничителях пе-

ренапряжений (осциллограмма рис. 7б).

Характерной особенностью осциллограмм, представленных на рис. 6, является то, что они зафиксированы в моменты времени, когда $U_o \approx \max$ (рис. 6а, г); $U_o \approx 0,5\max$ (рис. 6б); $U_o \approx 0$ (рис. 6в).

На осциллограммах, представленных на рис. 7, зафиксированы электродвижущие силы выбега АД, возникающие после коммутационного процесса (вместо апериодической затухающей, как на рис. 6).

Представленные на рис. 6 и 7 осциллограммы каждого режима измерения соответствуют наибольшей возникшей кратности амплитуды перенапряжений K_u , которая представляет собой отношение наибольшего значения амплитуды импульса коммутационного процесса U_m к амплитудному значению напряжения питающей сети $U_{o \max}$ [11]:

$$K_u = \frac{U_m}{U_{o \max}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot U_c}, \quad (5)$$

где $U_c=6$ кВ – действующее значение напряжения питающей сети.

Так, согласно выражению (5), для осциллограммы (рис. 7б) параметр K_u составляет 8 ед.

Применительно ко всем режимам измерения зафиксированы импульсы перенапряжений длительностью порядка 100 мкс, амплитуды которых достаточны для пробоя изоляции классов, применяемых при изготовлении обмоток ВН трансформаторов участковых комплектных подстанций серии ТВКП.

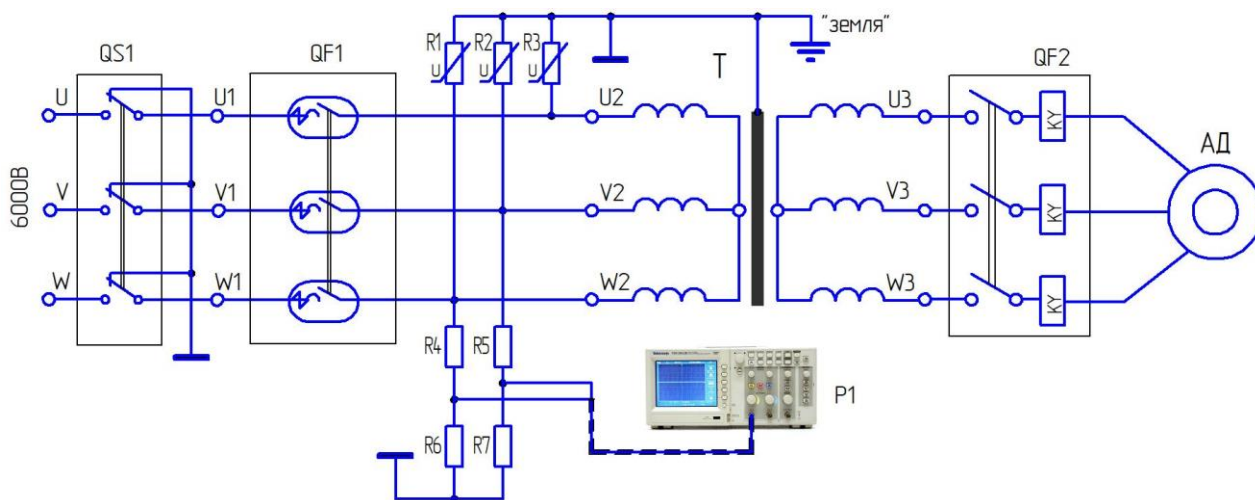


Рис. 5. Схема исследовательского стенда:

- QS1* – высоковольтный разъединитель с короткозамыкателем; *QF1* – ВКА;
- QF2* – автоматический выключатель; *T* – силовой трансформатор;
- R1...R3* – нелинейные ограничители перенапряжений; *R4...R7* – делитель напряжения;
- P1* – осциллограф; *АД* – асинхронный электродвигатель

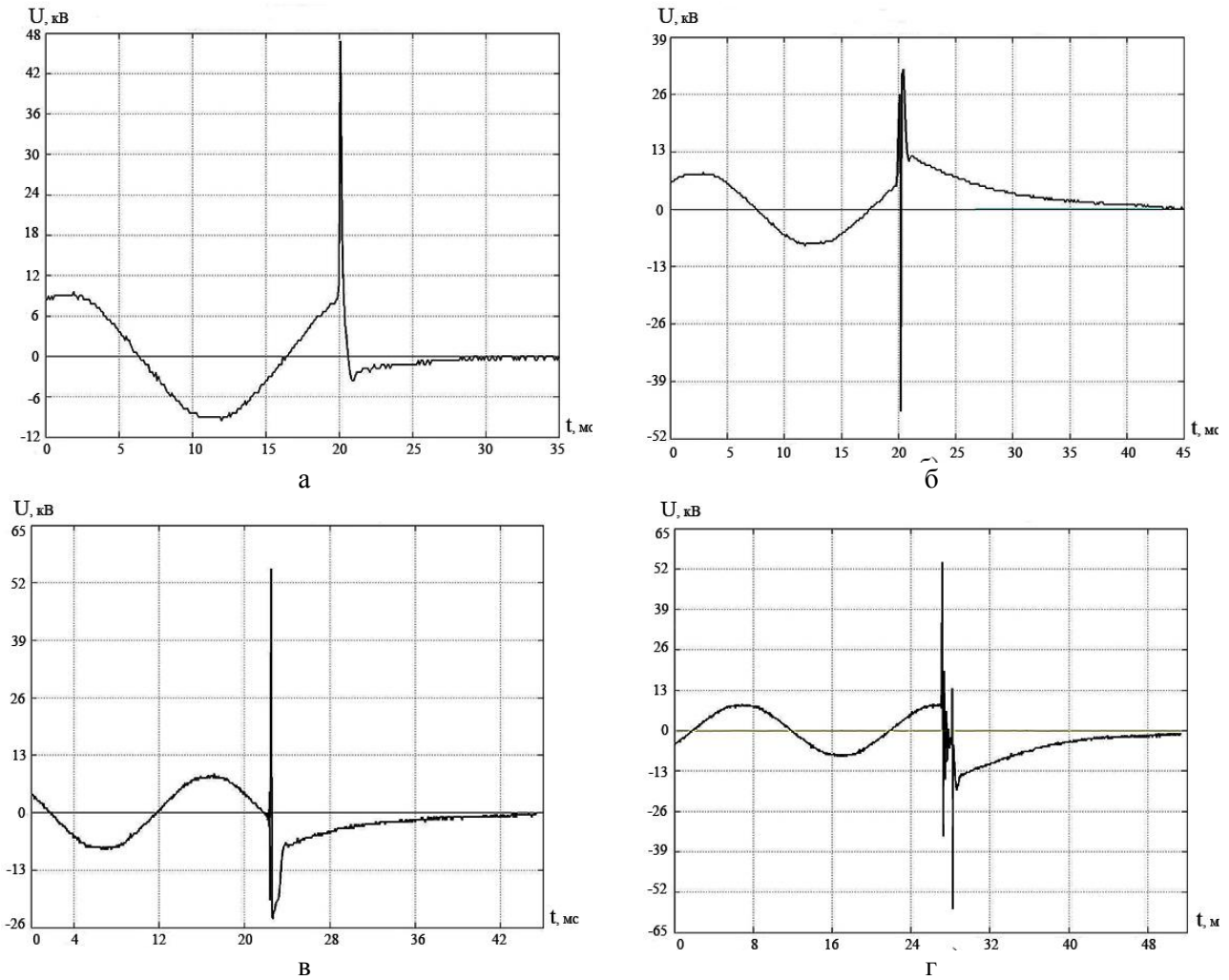


Рис. 6. Осциллограммы перенапряжений при отключении ненагруженного трансформатора мощностью 400 кВА

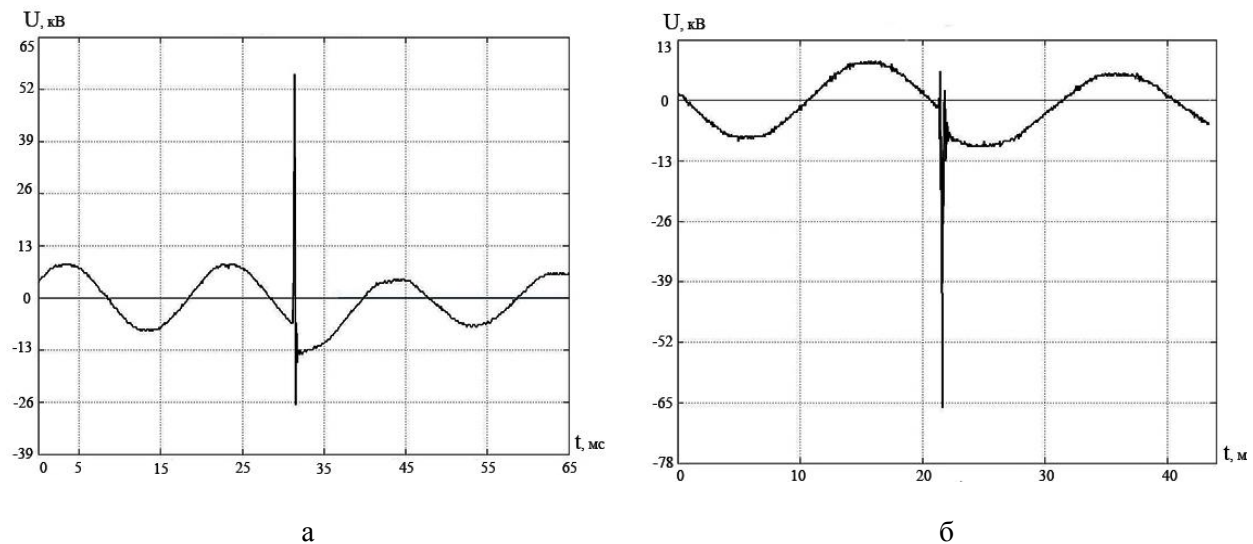


Рис. 7. Осциллограммы перенапряжений при отключении трансформатора мощностью 400 кВА, нагруженного электродвигателем

Выводы

Коммутация первичной (высоковольтной) обмотки трансформатора шахтной участковой комплектной трансформаторной подстанции ва-

кумным коммутационным аппаратом при его расположении в непосредственной близости от силовых вводов трансформатора сопровождается кратковременными (до 100 мкс) импульсами пе-

ренапряжений. Импульсы характеризуются крутыми передними фронтами. Соотношение активно-реактивных параметров системы «вакуумный коммутационный аппарат – высоковольтная обмотка трансформатора КТП» («ВКА – трансформатор») и наличие факторов, ограничивающих дуговые коммутационные процессы в выключателе, способствуют созданию амплитуд импульсов перенапряжений, превышающих напряжения сети в 8 и более раз. В совокупности скорость нарастания импульса перенапряжения и его амплитуда относятся к параметрам, достаточным для пробоя изоляции высоковольтной обмотки трансформатора КТП. Это подтверждено результатами опытной эксплуатации КТП типа ТВКП-1000/6-1,2, содержащей систему «ВКА – трансформатор», в условиях угольной шахты.

Эффективность работы нелинейных ограничителей перенапряжений типа ОПН-КР/TEL-6/6,9 и аналогичных в конструкциях трансформаторных подстанций, содержащих систему «ВКА – трансформатор», следует признать неудовлетворительной, что обуславливает необходимость совершенствования устройств подавления КП.

Список литературы

1. Идеология построения электрических защит взрывобезопасных трансформаторных подстанций серии ТВПШ / Е.А. Вареник [и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ «НИИВЭ». – Донецк: ООО «Восток Пресс», 2017. – №1(52). – С. 14-24.
2. Чернов, И.Я. Повышение технического уровня взрывобезопасных передвижных комплектных трансформаторных подстанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Чернов Игорь Яковлевич. – Донецк, 2009. – 263 с.
3. Методические указания по выбору ограничителей перенапряжений нелинейных производства предприятия «Таврида Электрик» для электрических сетей 6-35 кВ / В.А. Бржезицкий [и др.]. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2003. – 40 с.
4. Нагорный, М.А. Снижение перенапряжений в рудничных взрывозащищенных трансформа-
- торных подстанциях с высоковольтными вакуумными аппаратами. Применение напряжения 10 кВ на горных предприятиях / М.А. Нагорный, В.М. Грушко, Г.А. Кутелев // Сб. науч. тр. ВНИИВЭ. – Донецк, 1985. – С. 82-87.
5. Popov, M. Switching three-phase distribution transformers with a vacuum circuit breaker. Analysis of overvoltages and the protection of the equipment: doctoral thesis [Electronic resource]. – Delft University of Technology, 2002. – Available at: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:6163457a-697f-4d42-be87-9519a6427827>
6. Mantosh, D. Investigation of High Frequency Switching Transients on Wind Turbine Step Up Transformers [Electronic resource]. – UWSpace, 2015. – Available at: <http://hdl.handle.net/10012/9732>
7. Ограничение перенапряжений при коммутациях шахтного электрооборудования / А.Г. Гарганеев [и др.] // Изв. Томского политехн. ун-та. – 2012. – №4. – С. 51-56.
8. Лебедев, И.А. Исследование процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки и разработка технических требований к синхронным вакуумным выключателям: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.12 / Лебедев Иван Александрович. – Новосибирск, 2012. – 20 с.
9. Mayr, O. Über die Theorie des Lichtbogens und seiner Löschung / Elektrotechnische Zeitschrift, Jahrgang. – 1943. – No.49-50. Vol.64. – P. 645-652.
10. Ghezzi, L. Modeling and Simulation of Low Voltage Arcs [Электронный ресурс] / L. Ghezzi, A. Balestrero. – 2010. – Режим доступа: http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:ddf219d8-5572-45c5-9249-aacbb68683cd/Modeling_and_Simulation_of_Low_Voltage_Arcs
11. Кротенко, Е.А. Исследование перенапряжений в сетях среднего напряжения / Омский научный вестник. – 2019. – №1(163). – С.34-37.
12. Мнухин, А.Г. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений / А.Г. Мнухин, Б.И. Коневский. – М: Недра, 1987. – 143 с.

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

Donetsk National Technical University (Donetsk)

I.Ya. Chernov /Cand. Sci. (Eng.)/, E.V. Zolotarev

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

PROBLEMATIC ISSUES OF APPLICATION OF HIGH-VOLTAGE VACUUM CIRCUIT BREAKER IN THE MINE TRANSFORMER SUBSTATION DESIGN

Background. The influence of switching overvoltage on the electrical insulation strength of the

windings of a power transformer analysed on the example of a failed mine transformer substation type TVKP-1000/6-1.2. The efficiency of existing means of switching overvoltage suppression made on the basis of nonlinear overvoltage limiters is estimated. Oscillographing of switching processes was performed when the power transformer was turned off by a high-voltage vacuum circuit breaker located close to it.

Materials and/or methods. Measurements were carried out in laboratory conditions using a high-voltage vacuum circuit breaker type BB/TEL-10-20/1000-U2, power transformer type TSV-400/6, surge protectors type OPN-KR /TEL-6/6.9, and the asynchronous motor in the shutdown modes of the unloaded transformer, as well as the transformer loaded on the asynchronous motor, with connected and disconnected surge protectors.

Results. In substations with built-in high-voltage vacuum circuit breaker, there is a high vulnerability of the windings of the power transformer to the adverse effects of switching overvoltage. Sustained insulation breakdown occurs over time, as a result of frequent, systematic switching. The multiplicity of recorded overvoltage is up to 8 times, with the duration of up to 100 microseconds. Under those conditions, the low efficiency of nonlinear overvoltage limiters confirmed.

Conclusion. The studies confirmed the relevance of a comprehensive survey of switching processes in mine transformer substations equipped with high-voltage switching apparatus, as well as the need to develop tools and measures for effective suppression of arising overvoltage.

Keywords: mine transformer substation, high-voltage transformer winding, switching, overvoltage, research, parameters.

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 03.09.2019 г.

© К.Н. Маренич, И.Я. Чернов, Е.В. Золотарев, 2019
 Рецензент д.т.н., проф. И.А. Бершадский

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ




metal.donntu.org