

Авторы:

**к.т.н. Емельянов Н.И.,
Ильиных М.В.,**
ООО «Болид»,
г. Новосибирск, Россия,
Кириленко М.Л.,
ЗФ ПАО «ГМК
«Норильский никель»,
г. Норильск, Россия.

**Ph.D. Emelyanov N.I.,
Ilinykh M.V.,**
Bolid LLC,
Novosibirsk, Russia,
Kirilenko M.L.,
ZF PJSC «MMC
«Norilsk Nickel»,
Norilsk, Russia.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ И СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ПРИСОЕДИНЕНИЙ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ 6-35 КВ

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND MODELING OF SWITCHING OVERVOLTAGES AND PROTECTION DEVICES FOR FEEDERS WITH 6-35 KV TRANSFORMERS

Аннотация: рассмотрены негативные стороны применения вакуумных выключателей (ВВ), связанные с возникновением высокочастотных импульсных коммутационных перенапряжений, необходимость проведения экспериментальных и расчетных исследований для обеспечения длительной надежной работы высоковольтного оборудования в сети с ВВ. Показана практическая важность экспериментального определения характеристик конкретного выключателя. Представлены подходы к моделированию переходных процессов при коммутациях ВВ присоединений с трансформаторами, результаты расчетных исследований влияния параметров ВВ и самого присоединения на характер процессов и величины коммутационных перенапряжений. Приведен анализ применения различных схем защиты трансформаторов от коммутационных перенапряжений с использованием ограничителя перенапряжений нелинейного (ОПН) и RC-цепей.

Ключевые слова: вакуумные выключатели, коммутационные перенапряжения, расчеты переходных процессов, электрическая прочность, защита трансформаторов, ограничители перенапряжений нелинейные, RC-цепь.

Abstract: the negative aspects of the use of vacuum circuit breakers associated with the occurrence of high-frequency impulse switching overvoltages and the need for experimental and computational investigations to ensure long-term reliable operation of high-voltage equipment in a network with vacuum circuit breakers are considered in the paper. The practical importance of the

Введение

В сетях подстанций (ПС) 6-35 кВ все чаще в качестве коммутационных аппаратов используются ВВ. При модернизации и строительстве новых ПС практически везде применяются именно ВВ.

ВВ обладают рядом неоспоримых эксплуатационных достоинств (большой ресурс, компактность и т. д.), но в то же время для выключателей с «жесткими» дугогасящими средами, в число которых входит вакуум, характерно возникновение высокочастотных перенапряжений высокой кратности. Высокочастотные перенапряжения при коммутациях ВВ представляют серьезную опасность для изоляции высоковольтного оборудования.

Чаще всего при коммутациях ВВ повреждаются электродвигатели, кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (особенно муфты), трансформаторы и токоограничивающие реакторы.

В связи с вышесказанным, для обеспечения длительной надежной работы высоковольтного оборудования и всей сети 6-35 кВ в целом задача определения коммутационных перенапряжений и выбора защитных аппаратов для их ограничения является крайне актуальной.

Экспериментальные исследования коммутации ВВ

Параметры ВВ, характеристики переходных процессов при коммутациях, уровни

Цифровые запоминающие осциллографы-регистраторы DL750 и DL850 Scope Corder



Одновременное измерение и анализ до 16 каналов (Multi-channel measurement: 8 modules of the 2-CH voltage input)
 Максимальная длина записи 1000 Мточек (Max. recording length: 1 Gpts)
 Непрерывная запись на жесткий диск со скоростью 100 кВб/с одновременно до 16 каналов (Continuous hard disk recording at 100 kS/s simultaneously on 16 channels)
 Диапазон временной развертки: от 100 нс/дел до 3 дней/дел (Time axis setting range: 100 ns/div to 3 days/div)
Измерительный модуль:
 Частота выборки: 100 Мвб/с (Sampling rate: 100 MS/s)
 Разрешение АЦП: 12 бит (A/D resolution: 12 bits)
 Полоса пропускания: 20 МГц (Frequency bandwidth: 20 MHz)
 Изолированные входы (Isolated inputs)

Цифровой запоминающий осциллограф-регистратор DLM2024



Полоса пропускания до 200 МГц (Frequency bandwidth: 20 MHz)
 Максимальная частота выборки 2,5 ГВб/с (Sampling rate: 2,5 GS/s)
 Одновременное измерение и анализ 4 аналоговых каналов (Simultaneous measurement and analysis of 4 analog channels).

Рис. 1. Осциллографы-регистраторы

перенапряжений и эффективность применяемых защитных аппаратов в ряде случаев могут быть определены путем проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальное измерение коммутационных перенапряжений имеет важное практическое значение, так как во многих случаях позволяет определить характеристики конкретного выключателя, разобраться в причинах повреждения ответственного оборудования. Ответить на вопросы: дело в ВВ, его конкретных характеристиках, приводящих к опасным перенапряжениям, или в технологических недостатках самого оборудования, либо в недостаточности защитных аппаратов, их неправильном выборе.

На сегодняшний момент ООО «Болид» проведены экспериментальные исследования более чем на 10 российских и зарубежных объектах с участием разных типов современных ВВ 6-110 кВ.

Современная измерительная аппаратура и собственные разработки позволяют регистрировать переходные процессы с высокой частотой дискретизации в большом временном диапазоне измерений.

Осциллографирование переходных процессов при коммутациях ВВ выполняются с использованием японских осциллографов-регистраторов компании «Yokogawa Electric Corporation» (рис. 1) и широкополосных высоковольтных температурнеза-

висимых делителей напряжения собственной разработки (рис. 2).

Делители ООО «Болид» типа ДНЕ рассчитаны на постоянное использование в существующих сетях стандартных напряжений от 6 до 35 кВ. Делители ДНЕ имеют номинальный диапазон рабочих частот 20 Гц...1 МГц при неравномерности АЧХ 0,5 дБ, широкий температурный диапазон от -55 до 40 °С, сравнительно небольшие габаритные размеры и вес, климатическое исполнение по УХЛ 3.1.

Проведенные экспериментальные измерения позволили определить характеристики ВВ различных отечественных и зарубежных производителей. Подтвердили присутствие при коммутациях ВВ наличие многих негативных процессов, влияние характеристик самого ВВ и присоединения на характер процессов и величины перенапряжений, позволили определить технические характеристики ВВ, требования к которым необходимо ужесточить [1]. Сравнительные испытания для различных выключателей позволили определить скорость изменения пробивного напряжения (СИПН) между контактами вакуумной дугогасящей камеры (ВДК) ВВ 10 кВ различных производителей. СИПН находится в достаточно широких пределах от 19 до 140 кВ/мс.

Экспериментальные исследования ВВ 110 кВ были выполнены в сетях ряда металлургических комбинатов. Осциллограммы



Рис. 2. Высоковольтные широкополосные емкостные делители напряжения 10, 35 и 110 кВ

experimental determination of the characteristics for a particular circuit breaker is shown.

Approaches to modeling transient processes when switching power transformers by vacuum circuit breakers and the results of computational studies of the influence of feeder and vacuum circuit breaker parameters on the transients nature and the magnitude of switching overvoltages are presented. The analysis of the application of various transformer protection schemes against switching overvoltages by using surge arresters and RC-circuits is given.

Keywords: vacuum circuit breakers, switching overvoltages, transient process calculations, electric strength, transformer protection, surge arrester, RC-circuit.



Emel'yanov Nikolai Ivanovich

Дата рождения: 01.02.1947.
 В 1969 г. окончил Новосибирский электротехнический институт (НЭТИ) по специальности «Электрические системы».
 В 1976 г. защитил кандидатскую диссертацию в НЭТИ на тему «Оптимизация надежности дальних электропередач».
 Заместитель директора ООО «Болид».



Ильиных

Михаил Владимирович

Дата рождения: 01.10.1960.

В 1982 г. окончил Новосибирский электротехнический институт (НЭТИ) по специальности «Электрические станции». Ведущий научный сотрудник ООО «Болид».



Кириленко

Максим Леонидович

Дата рождения: 25.08.1982.

В 2006 г. окончил Норильский индустриальный институт по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Главный специалист ЭТО, Управление главного энергетика ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

процессов, возникающих при коммутациях отключения печного трансформатора, наглядно показывают, что характер их развития и уровень перенапряжений напрямую зависят от параметров самого ВВ и применяемых средств защиты [2].

Опасность высокочастотных импульсных коммутационных перенапряжений

Коммутационные перенапряжения высокого уровня представляют очевидную опасность для всех видов изоляции электрооборудования. Помимо собственно высокого уровня перенапряжений, высокие частоты собственных колебаний, сопровождающие процессы при коммутациях ВВ, могут привести к повреждению витковой изоляции двигателей, трансформаторов и токоограничивающих реакторов. Неравномерность распределения напряжения по обмотке приводит к появлению на отдельных ее частях значительных перенапряжений, которые могут привести к повреждению или ускорению старения изоляции. Кроме того, высокочастотные перенапряжения способствуют деградации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и, в особенности, кабельных соединительных муфт.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что ВВ в зависимости от качества их исполнения и настройки, могут негативно влиять на работоспособность и эксплуатационную надежность коммутируемого ими оборудования.

Опасность этих коммутационных перенапряжений в существенной степени определяется видом электрооборудования и, соответственно, может быть оценена исходя из уровня допустимых для него кратностей перенапряжений.

Согласно РД 153-34.3-35.125-99 [3], допустимые кратности внутренних перенапряжений для изоляции электрооборудования сетей 6-35 кВ по отношению к наибольшему рабочему напряжению определяются выражением:

$$k_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{доп}}}{U_{\text{нр}}/\sqrt{3}} = \frac{k_{\text{и}} \cdot k_{\text{к}} \cdot U_{\text{исп}}}{U_{\text{нр}}/\sqrt{3}},$$

где $U_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение;

$U_{\text{исп}}$ – нормированное одноминутное заводское испытательное напряжение (действующее значение) главной изоляции электрооборудования;

$U_{\text{нр}}$ – наибольшее рабочее напряжение электрооборудования;

$k_{\text{и}} = 1,3$ – коэффициент импульса при внутренних перенапряжениях для главной изоляции трансформаторов 6-35 кВ;

$k_{\text{к}} = 0,9$ – коэффициент кумулятивности.

Для электродвигателей коэффициент импульса и кумулятивности принимаются равными единице, а значение испытательного напряжения задается выражением:

$$U_{\text{исп}} = 2U_{\text{ном}} + 1.$$

В табл. 1 приведены допустимые (выдерживаемые) кратности внутренних перенапряжений для изоляции электрооборудования сетей 6-35 кВ согласно РД 153-34.3-35.125-99 [3].

Таблица 1. Допустимые кратности внутренних перенапряжений $k_{\text{доп}}$ для электрооборудования 6-35 кВ

$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	6	10	15	20	35
Нормальная изоляция	7,0	5,9	5,2	4,9	4,3
Облегченная изоляция	4,5	4,1	4,3	4,4	-
Изоляция электродвигателей	3,4* 2,45	3,3* 2,45	-	-	-

* – указанные в таблице значения допустимой кратности для электродвигателей приведены для современной терморезистивной изоляции по РД 153-34.3-35.125-99.

Для трансформаторов имеем достаточно высокий уровень допустимых перенапряжений. Наиболее низкий уровень допустимых перенапряжений имеет изоляция высоковольтных двигателей.

Для кабельных линий (КЛ) значений допустимых кратностей перенапряжений в литературе не приводится. Для определения опасной кратности перенапряжений для КЛ можно ориентироваться на остаточную электрическую прочность изоляции КЛ в табл. 2 [4].

Таблица 2. Значения кратковременной электрической прочности для кабелей с пропитанной бумажно-масляной изоляцией (БМПИ) и с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), кВ/мм

Тип КЛ	Исходная электрическая прочность	Остаточная электрическая прочность
КЛ с изоляцией из СПЭ	50 - 70	8 - 12
КЛ с БМПИ	30 - 40	10 - 15

В табл. 3 приведен расчет электрической прочности изоляции КЛ с учетом толщины изоляции.

Таблица 3. Расчетные значения электрической прочности КЛ 10 кВ

Тип кабеля	Класс напряжения, кВ	Толщина изоляции, мм	Исходная электрическая прочность, кВ	Остаточная электрическая прочность, кВ	Соответствующая кратность перенапряжений, о.е.
СПЭ	10 кВ	3,4	170 - 238	27,2 - 40,8	2,78 - 4,16
БМПИ	10 кВ	2,75	82,5 - 110	27,5 - 41,25	2,81 - 4,21

Для кабелей 10 кВ допустимая кратность перенапряжений, принятая как нижняя граница остаточной электрической прочности, составляет в относительных единицах (о.е.): для КЛ СПЭ-изоляции 2,78 о.е., а для КЛ с БМПИ – 2,81 о.е.

В зависимости от класса изоляции, характеристик и состояния изоляции высоковольтного оборудования в рассматриваемых сетях, значения допустимых перенапряжений могут изменяться в некоторых пределах.

Расчетные исследования коммутации присоединений с трансформаторами 6-35 кВ ВВ

Задачи исследования влияния различных факторов на перенапряжения коммутационного характера, выбора защитных аппаратов для ограничения опасных перенапряжений эффективно реализуются методами компьютерного имитационного моделирования.

Опыт использования на протяжении последних 20 лет различных программных комплексов для расчетов электромагнитных переходных процессов в электрических сетях 6-35 кВ (PSPICE, МАЭС, различные модификации EMTP, пакет Simulink) показал, что для расчетных исследований коммутации присоединений с трансформаторами 6-35 кВ ВВ хорошо подходит программа Simulink со специализированными библиотеками SimPowerSystems из программного комплекса MATLAB [5].

Общие положения по моделированию перенапряжений при коммутациях ВВ

Обобщенная расчетная схема, принятая для моделирования процессов при коммутациях присоединений с трансформаторами ВВ, приведена на рис. 3.

Моделирование ВВ и основные характеристики ВДК

Несмотря на большой набор элементов для моделирования электрических сетей, существующий в Simulink, для проведения полноценных исследований электромагнитных процессов при коммутациях ВВ потребовалось создание специального элемента - модели ВВ, учитывающего основные характеристики ВДК.

В качестве модели ВВ выступает ключ с заданной логикой включения и отключения. Логика ра-

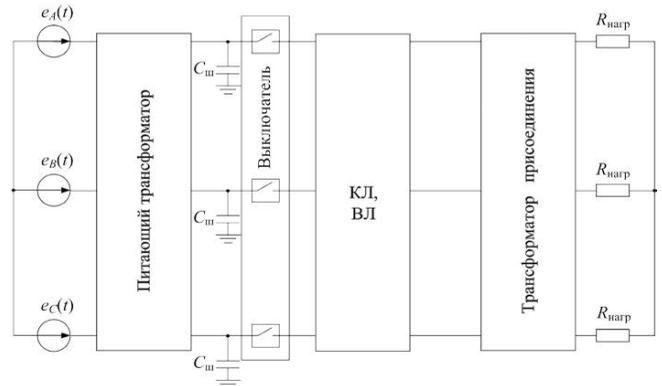


Рис. 3. Обобщенная расчетная схема для моделирования процессов коммутаций присоединений с ненагруженным трансформатором

боты ВДК ВВ, изложенная в трудах Евдокунина Г.А., Кадомской К.П. и других авторов [6, 7], была реализована с использованием средств программирования в среде MATLAB.

Кратко опишем механизм возникновения переходных процессов, свойственных ВВ.

- После размыкания контактов в момент времени (0) между контактами загорается дуга, при приближении мгновенного значения тока промышленной частоты к нулю возникает срез тока, дуга гаснет.

- После погасания дуги восстанавливается электрическая прочность, и пробивное напряжение $U_{пр}$ возрастает, вместе с тем как возрастает расстояние между контактами.

- Также после погасания дуги на контактах выключателя появляется переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН), обусловленное свободной составляющей переходного процесса, возникшей в коммутируемом контуре.

- Таким образом, происходит процесс соревнования между возрастающим пробивным напряжением и ПВН.

- В случае если ПВН в какой то момент превышает $U_{пр}$, происходит пробой и дуга загорается снова. И с этого момента начинаются отличия, свойственные ВВ.

- При пробое ток дуги имеет высокочастотную составляющую, которая, как правило, переходит через нулевое значение тока и, в случае ВВ, гаснет (в чем и проявляется свойства сильной деионизации вакуума).

- Далее, как и после среза тока, снова возникает процесс соревнования между ПВН и $U_{пр}$, в котором снова ПВН может превысить $U_{пр}$. Таким образом, процесс закидывается, пока $U_{пр}$ не возрастет до необходимых значений или не произойдет повреждения оборудования.

Такой переходной процесс называется «эскалацией перенапряжений».

При моделировании ВВ учитывалось следующее:

- ток среза ($i_{ср}$) при отключении тока промышленной частоты;

• неустойчивое горение дуги обуславливает возможность ее погасания при нулевом значении высокочастотного тока при повторных зажиганиях (ПЗ);

• необходимость моделирования кривой растущего пробивного напряжения межконтактного промежутка, поскольку вероятность повторных зажиганий зависит от «процесса соревнования» между переходным восстанавливающимся напряжением на контактах выключателя после погасания дуги и растущим пробивным напряжением межконтактного промежутка при отключении на размыкающихся контактах после погасания дуги.

Скорость восстановления пробивного напряжения промежутка в начальный момент коммутации является важной характеристикой современных ВДК, так как именно она определяет вероятность возникновения повторных зажиганий дуги и высоких кратностей перенапряжений.

Кривая восстановления пробивного напряжения межконтактного промежутка ВДК аппроксимировалась в расчетах следующим выражением:

$$u_{\text{пр}} = k(t + t_0),$$

где t_0 – время между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока через нулевое значение;

k – скорость изменения пробивного напряжения межконтактного промежутка ВДК при отключении.

Для математической модели ВДК (для коммутации и двигателя, и ненагруженного трансформатора) ВВ можно принять следующие параметры:

• ток среза 5 А (производители ВВ приводят величину 5-6 А);

• скорость перехода тока через ноль, при которой еще возможно погасание дуги между контактами выключателя $di/dt = 200 \div 350$ кА/мс;

• скорость изменения (восстановления/снижения) пробивного напряжения межконтактного промежутка ВДК $k = 25 \div 100$ кВ/мс (обычно принимается от 30 до 60 кВ/мс).

Моделирование коммутируемого трансформатора

Хотелось также отметить следующую особенность: при моделировании коммутируемого трансформатора использовался блок из библиотеки элементов приложения Simulink – силовой трансформатор с учетом насыщения стали сердечника (Saturable Nransformer). Это позволяло выполнять расчеты при отключении ненагруженного трансформатора с броском тока намагничивания значительной величины.

Шунт намагничивания трансформатора коммутируемого присоединения моделировался кривой намагничивания сердечника трансформатора в виде зависимости тока намагничивания от потокосцепления.

В качестве расчетной принята зависимость для отечественных трансформаторов:

$$i_{\mu} = 0,15\varphi + 0,18\varphi^9 + 0,68\varphi^{11},$$

где φ – мгновенное значение потокосцепления,

i_{μ} – мгновенное значение тока намагничивания, соответствующее потокосцеплению φ .

Согласно результатам собственных исследований авторов, а также результатам публикаций других авторов, можно выделить следующие основные факторы, оказывающие влияние на уровень перенапряжений при коммутациях ненагруженных трансформаторов:

1) При отключении, при возможном срезе тока:

- величина тока среза;
- емкость присоединения (определяется длиной и параметрами линии между выключателем и входной емкостью трансформатора);

- параметры трансформатора (мощность, емкость, форма кривой намагничивания, потери);

- исходный режим трансформатора;
- режим работы сети (наличие однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) и т.п.);

- разновременность при размыкании контактов;
- скорость восстановления пробивного напряжения межконтактного промежутка;

- возникновение повторных зажиганий между контактами ВДК в процессе их размыкания.

2) При включении, при возможных кратковременных предварительных пробоях между контактами ВДК до их полного смыкания – фактическое пробивное напряжение между контактами, скорость его снижения.

Коммутация отключения ВВ трансформатора

Основным условием создания перенапряжений высокой кратности при отключении ненагруженных трансформаторов является срез тока.

Коммутируемый ток ненагруженного трансформатора в значительной степени определяется режимом работы трансформатора. Величина установившегося тока холостого хода трансформатора мощностью до 4000 кВА мала – менее 5 А, в отличие от величины неустановившегося тока при включении трансформатора (бросок токов намагничивания). Неустановившийся ток намагничивания трансформатора может многократно превышать установившееся значение тока холостого хода (рис. 4). Если по какой-либо причине после такого включения трансформатора возникает необходимость мгновенного его повторного отключения (например, включение в режиме ОЗЗ), к моменту размыкания контактов выключателя броски токов в фазах выключателя могут составлять сотни ампер.

Таким образом, при отключении трансформатора небольшой мощности в этом режиме срез тока может уже происходить при более высоких значениях, чем при ма-

лом тока установившегося режима холостого хода, что приводит к большим значениям перенапряжений.

Для определения возможных наибольших перенапряжений расчеты выполнялись для отключения ненагруженного трансформатора для режима броска тока намагничивания (БТН) и среза тока 5 А.

При моделировании коммутации отключения ненагруженного трансформатора были исследованы процессы для трех ключевых режимов:

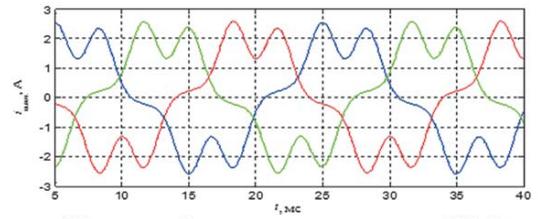
- со срезом тока без возникновения повторных зажигания;
- со срезом тока и последующим однократным зажиганием;
- со срезом тока и многократным зажиганием.

В зависимости от времени между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока через нулевое значение (t_0) получаем различное протекание процессов.

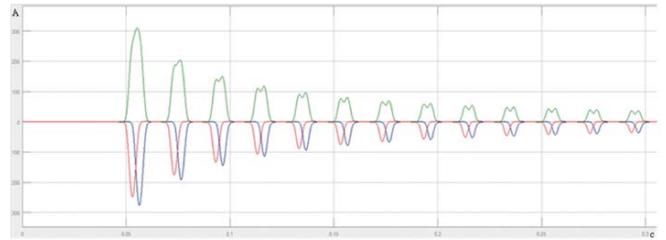
Проиллюстрируем процессы с возникновением перенапряжений при коммутациях ВВ присоединений с трансформаторами на ряде примеров расчетов, выполненных для сетей 10 кВ.

Характерные осциллограммы рассматриваемых процессов коммутации отключения присоединения с ненагруженным трансформатором мощностью 2000 кВА с длиной КЛ 45 метров приведены на рис. 5.

Помимо возникновения очень высокого перенапряжения, генерируемого за счет среза тока, за счет



а) Установившийся режим при напряжении сети 10,5 кВ



б) Неустойчивый режим с БТН при включении трансформатора

Рис. 4. Токи, протекающие в полюсах выключателя присоединения с короткой воздушной линией и ненагруженным трансформатором $S = 1000$ кВА

возникновения ПЗ происходит значительное изменение напряжения с очень высокой частотой, условно назовем это явление «срез напряжения». Следует обратить внимание, что в конце линии у трансформатора величина «среза напряжения» выше, чем в начале КЛ за выключателем.

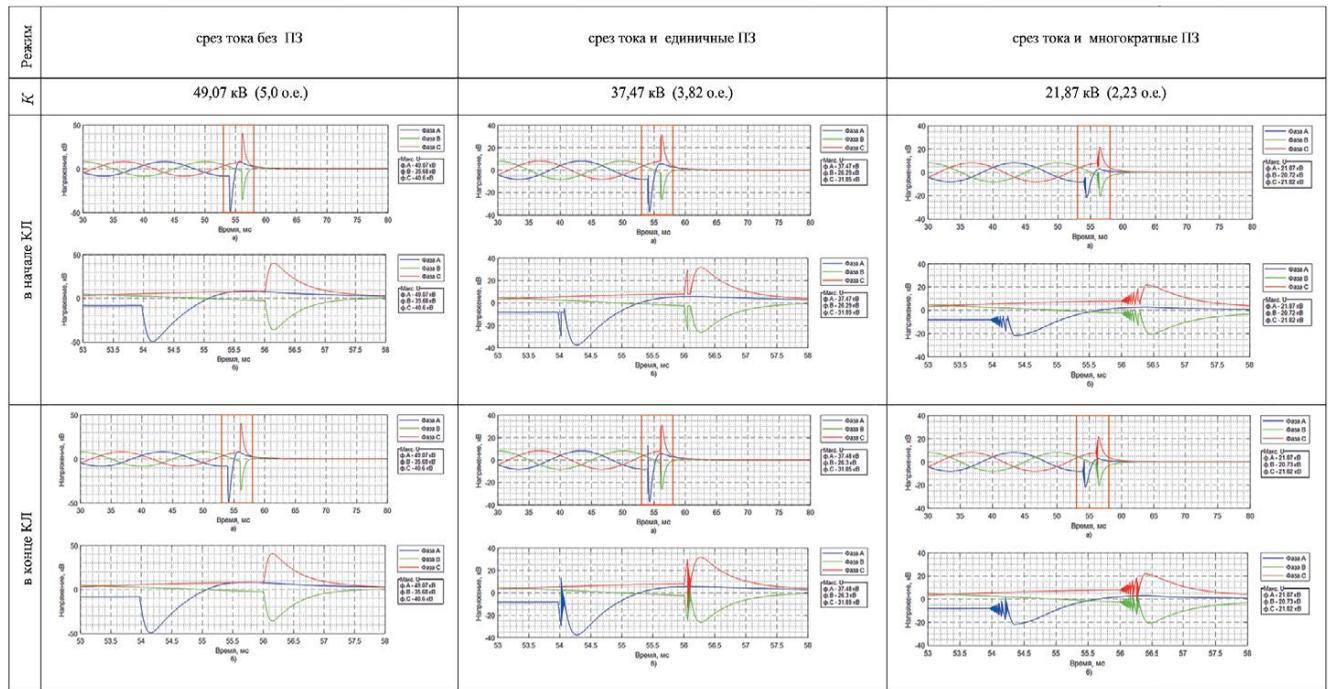


Рис. 5. Осциллограммы фазных напряжений при отключении трансформатора 2000 кВА с длиной КЛ 45 м ВВ (а - полный процесс; б - фрагмент осциллограммы)

Исследования показали, что наибольшая кратность перенапряжений возникает при отключении ненагруженных трансформаторов без повторных зажигания. Кратности перенапряжений при отключении присоединения с ненагруженным трансформатором без повторных зажигания приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, с увеличением длины КЛ между выключателем и трансформатором коммутационные перенапряжения снижаются, возникновение значительных перенапряжений наблюдается только при коротких длинах.

Таблица 4. Кратности перенапряжений (КП) при отключении присоединения с ненагруженным трансформатором без повторных зажигания в начале КЛ

Мощность, кВА	Общая длина КЛ, м	КП	
		кВ	о.е.
630	60	33,81	3,451
	70	36,81	3,757
	200	23,74	2,423
1000	250	21,50	2,194
	45	49,07	5,008
2000	75	39,55	4,037
	180	26,97	2,753
	200	25,74	2,627
	250	23,37	2,385
	367	19,91	2,032
2500	40	35,70	3,644
	100	24,75	2,526
	150	21,08	2,151

Опасность возникновения перенапряжений значительной кратности при отсутствии либо при очень коротких КЛ

Расчеты показали, что очень высокие значения перенапряжений могут возникать в случае отключения присоединения с индуктивной нагрузкой при относительно малой емкости данного присоединения. Такие

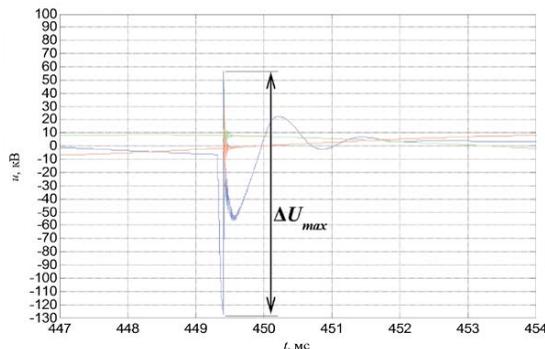


Рис. 7. Фрагмент компьютерной осциллограммы напряжений на фазах трансформатора в процессе включения-отключения ТСН 250 кВА при наличии единичного ПЗ. $i_{ср} = 5 \text{ А}$. $t_0 = 2,6 \text{ мс}$. $k = 50 \text{ кВ/мс}$. $K_{п} = 13,1$. $\Delta U_{max} = 184,43 \text{ кВ}$ (19,01 о.е.)

коммутации возможны в схемах сетей распределительных подстанций. Длина линий до трансформаторов может составлять до 10-25 м, а в ряде случаев трансформатор может быть подключен с помощью ошиновки. В таких случаях возможно возникновение перенапряжений значительной кратности, превышающих не только уровень остаточной электрической прочности изоляции КЛ, но и даже допустимые уровни для изоляции трансформаторов.

Расчетные осциллограммы отключения трансформатора ТСН малой мощности 250 кВА для подобного случая присоединения без КЛ приведены на рис. 6. При отсутствии ПЗ для данной схемы даже при нормируемом значении тока среза 5 А возникают очень высокие перенапряжения до 13 крат ($K_{п} = 13,1$).

В случае наличия повторного зажигания, помимо возникновения очень высокого перенапряжения, генерируемого за счет среза тока, за счет возникновения ПЗ происходит резкое изменение напряжения с очень высокой частотой - «срез напряжения» (рис. 7). Величина «среза напряжения» также достигает очень большого значения до 19 крат.

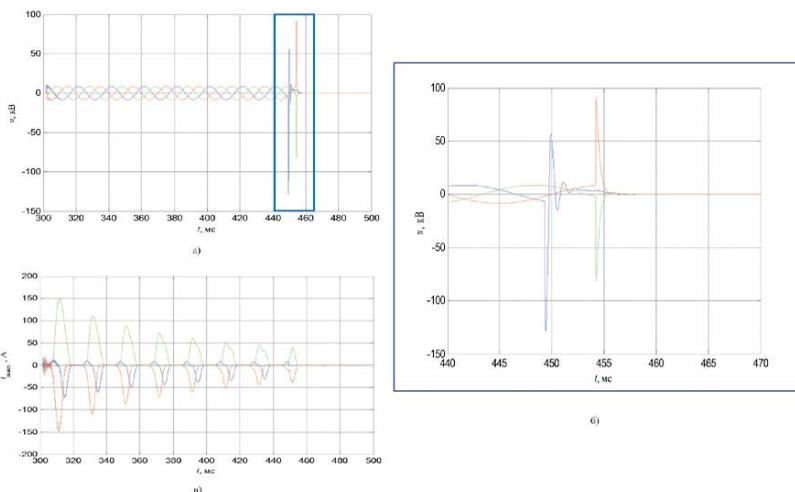


Рис. 6. Компьютерная осциллограмма фазных напряжений и токов трансформатора в процессе включения-отключения ТСН 250 кВА.

$i_{ср} = 5 \text{ А}$. $K_{п} = 13,1$ (а - осциллограмма фазных напряжений; б - фрагмент осциллограммы фазных напряжений; в - осциллограмма фазных токов)

Рис. 8 иллюстрирует влияние скорости возрастания пробивного напряжения. Увеличение скорости возрастания электрической прочности ВДК приводит к возрастанию уровня перенапряжений, но в то же время снижает количество ПЗ в ВДК выключателя.

Расчеты также показывают, что при коммутациях в режиме с ОЗЗ перенапряжения несколько увеличиваются по сравнению с подобной коммутацией в нормальном режиме.

Для наглядности в табл. 5 приведены кратности перенапряжений, полученные при расчетах коммутаций присоедине-

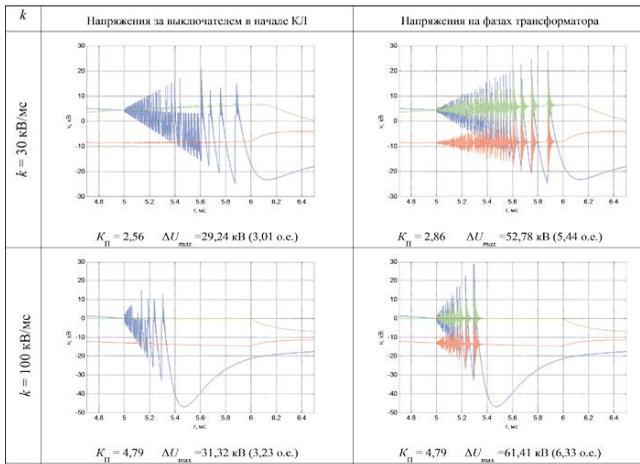


Рис. 8. Компьютерная осциллограмма процесса отключения трансформатора ТМ-1000/10 в сети 10 кВ. ($i_{ср} = 5 \text{ А}$ с возникновением ПЗ и различной СИПН)

ния с трансформатором 1000 кВА без учета и с учетом ПЗ в ВДК для режима без ОЗЗ и с ОЗЗ при различных скоростях восстановления электрической прочности k .

Таблица 5. Кратности перенапряжений при коммутациях присоединения с трансформатором 1000 кВА без учета и с учетом ПЗ в ВДК, о.е.

Режим	k , кВ/мс			
	– (Без ПЗ)	30	50	100
Без ОЗЗ	5,33/5,33	2,53/2,86/5,44	3,1/3,19/5,95	4,16/4,16/5,99
ОЗЗ на шинах	6,01/6,01	3,24/3,24/5,3	3,57/3,57/6,48	4,79/4,79/6,33

* Примечание: Первое число – кратность перенапряжений на фазах за выключателем; второе число – кратность перенапряжений на фазах на вводе трансформатора; третье число – ΔU_{max} в о.е. по отношению к

амплитуде наибольшего рабочего фазного напряжения (9,7 кВ).

Таким образом, при отключении ненагруженных трансформаторов с малой емкостью присоединения возможно возникновение перенапряжений, опасных не только для главной, но и для витковой изоляции трансформаторов.

Коммутация включения трансформаторов

Расчет перенапряжений при коммутациях включения трансформаторов 10 кВ показывает, что также возможно возникновение высокочастотных перенапряжений, но их кратности значительно ниже, чем при коммутации отключения (рис. 9). Коммутации включения характеризуются отсутствием процесса эскалации перенапряжений.

Перенапряжения при коммутациях включения трансформаторов по амплитуде не представляют существенной опасности, но за счет наличия высокочастотной составляющей оказывают негативное кумулятивное влияние на высоковольтную изоляцию оборудования.

Для надежной длительной работы высоковольтной изоляции трансформаторов и другого оборудования при коммутациях ВВ в значительном числе случаев необходимо применение средств ограничения коммутационных перенапряжений.

Ограничение коммутационных перенапряжений. Эффективность различных схем применения защитных аппаратов

В качестве основных мер защиты оборудования от коммутационных перенапряжений могут быть использованы ОПН и RC-цепи, как наиболее эффективные по сравнению с другими мероприятиями (управление мо-

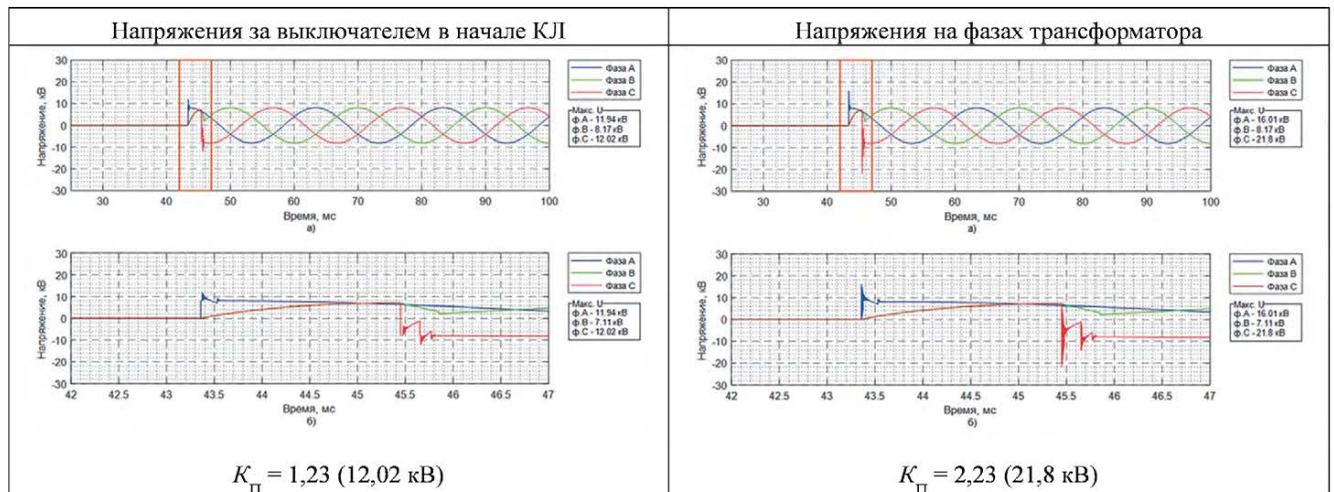


Рис. 9. Осциллограммы фазных напряжений при включении трансформатора 2500 кВА с длиной КЛ 40 м ВВ (пробой при смыкании контактов ВДК)



Рис. 10. Основные схемы защиты изоляции трансформаторов от коммутационных перенапряжений

ментом коммутации, задержка в отключении двух фаз и др.).

Основные схемы защиты изоляции трансформаторов от коммутационных перенапряжений приведены на рис. 10.

Защита трансформаторов с помощью ОПН

При использовании ВВ в качестве защитных аппаратов для присоединений с индуктивной нагрузкой многими производителями рекомендуется использовать простые схемы защиты с использованием ОПН, установленных непосредственно в ячейке с ВВ.

Исходя из этого, зачастую поставляемые ячейки с ВВ комплектуются ОПН. В большинстве случаев выбор конкретного типа ОПН в зависимости от характеристик присоединения не производится.

Таким образом, для определения необходимой защиты изоляции оборудования требуется проверка эффективности установленного ОПН.

Проиллюстрируем установку ОПН на примере ранее рассмотренной схемы с ТСН 250 кВА. Установка ОПН типа КР/TEL-10/12 при отсутствии ПЗ обеспечивает ограничение перенапряжений до $2,82U_{\phi}$ (рис. 11).

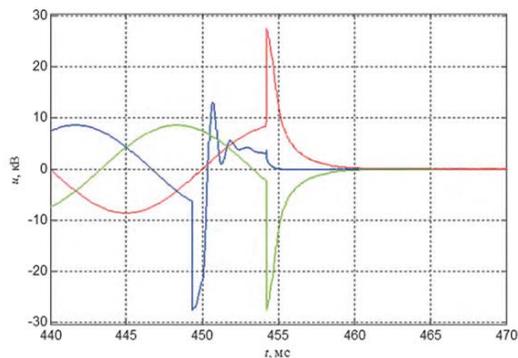


Рис. 11. Компьютерная осциллограмма напряжений на фазах трансформатора в процессе включения-отключения ТСН 250 кВА при БТН трансформатора и $i_{ср} = 5 \text{ А}$, $K_{\Pi} = 2,82$. ОПН установлен за выключателем

Частота одиночного импульса достаточно низкая (не выше 1 кГц), и ОПН обеспечивает эффективное ограничение перенапряжений.

Расчетная осциллограмма при отключении присоединения с трансформатором 1000 кВА при учете ПЗ в ВДК приведена на рис. 12. Чтобы рассмотреть наиболее тяжелый режим, скорость возрастания электрической прочности принималась равной 100 кВ/мс, так как в этом случае согласно расчетам, приведенным выше, возникали наибольшие кратности перенапряжений. На фазах трансформатора составила K_{Π} составила 3,05, $\Delta U_{max} = 55,86 \text{ кВ}$ (5,78 о.е.).

Кратности перенапряжений при коммутациях присоединения с трансформатором ТМ-1000/10 длиной КЛ 30 м при применении ОПН и $k = 100 \text{ кВ/мс}$ приведены в табл. 6.

Таблица 6. Кратности перенапряжений при коммутациях присоединения с трансформатором ТМ-1000/10 и короткой КЛ при применении ОПН-КР/TEL-10/12, $k = 100 \text{ кВ/мс}$

Режим	Место установки ОПН		
	Без ОПН	ОПН за выключателем	ОПН на вводе трансформатора
Без ОЗЗ	4,16 / 4,16/5,99	2,71/3,24/5,91	2,71/3,05/5,78
ОЗЗ на шинах	4,79/4,79/6,33	2,75/2,75/4,09	2,74/2,75/4,03

Примечание: первое число – кратность перенапряжений на фазах за выключателем; второе число – кратность перенапряжений на фазах на вводе трансформатора; третье число – ΔU_{max} в о.е. по отношению к амплитуде наибольшего рабочего фазного напряжения (9,7 кВ).

Согласно выполненным расчетам коммутаций отключения трансформатора, установка ОПН за КЛ у трансформатора обеспечивает в нормальном режиме более глубокое ограничение перенапряжений по сравнению с уровнем ограничения при установке ОПН за выключателем.

Следует отметить, что применение ОПН с более низким уровнем ограничения (например, ОПН типа ОПН-РТ/TEL-10/11,5) приведет к некоторому снижению перенапряжений по сравнению с полученными выше результатами для ОПН типа ОПН-КР/TEL-10/12.

Установка ОПН на присоединениях с ВВ ограничивает перенапряжения, связанные с обрывом тока и эскалацией напряжений, сокращает число повторных зажиганий, а, следовательно, число опасных для изоляции воздействий.

ОПН начинает влиять на параметры переходного процесса лишь при определенном повышении напряжения и практически не оказывает влияния на начальной стадии процесса. Между тем именно начальная стадия коммутации характеризуется значительными перенапряжениями на витковой изоляции оборудования.

Недостатком ОПН является то, что они не способны эффективно защитить витковую изоляцию трансфор-

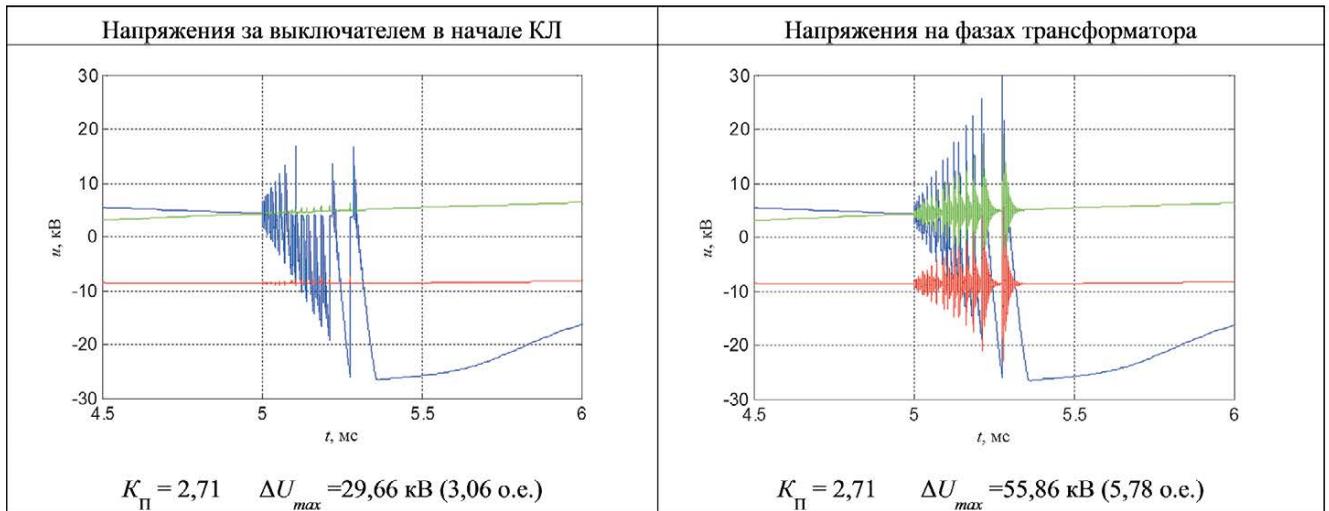


Рис. 12. Компьютерная осциллограмма фазных напряжений при коммутациях присоединения с трансформатором ТМ-1000/10 и короткой КЛ при применении ОПН ($i_{cp} = 5$ А с возникновением ПЗ, $k = 100$ кВ/мс). ОПН установлен перед трансформатором.

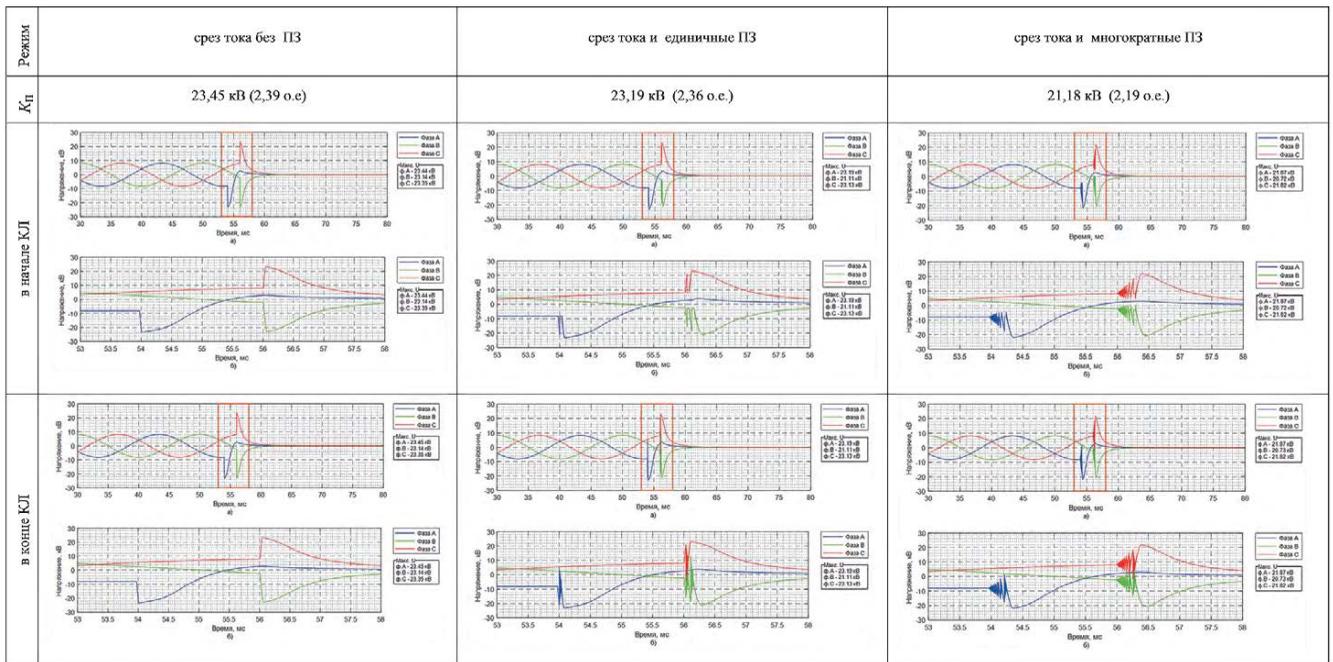


Рис. 13. Осциллограммы фазных напряжений при отключении трансформатора 2000 кВА с ОПН ЗЕК7 150-4СС4 (ОПН установлен в ячейке с ВВ) и КЛ 45 м ВВ (а - полный процесс; б - фрагмент осциллограммы)

маторов и электродвигателей от воздействия высокочастотных перенапряжений, поскольку ОПН практически не влияют на вероятность возникновения повторных зажиганий и малоэффективны при воздействии перенапряжений с крутыми фронтами, которые сопровождают коммутации ВВ.

Характерные осциллограммы процессов коммутации отключения присоединения с ненагруженным трансформатором с ОПН (ОПН типа ЗЕК7 150-4СС4 в

ячейке с ВВ) на примере трансформатора мощностью 2000 кВА с длиной кабельной линии 45 метров приведены на рис. 13.

Изоляция КЛ и трансформаторов имеет более высокие уровни импульсной прочности по сравнению с изоляцией двигателей, и можно допустить при отключении ВВ несколько пробоев межконтактного промежутка ВВ с возникновением высокочастотных эскалационных перенапряжений невысокой кратности.

Многочисленные расчеты показывают, что в качестве защитных аппаратов для присоединений «кабельная линия – трансформатор» в большинстве случаев могут быть эффективно применены ОПН с характеристиками, обеспечивающими требуемый уровень ограничения коммутационных перенапряжений.

Защита с использованием RC-цепей

Одним из наиболее эффективных способов защиты витковой изоляции трансформаторов и электродвигателей от коммутационных перенапряжений является установка защитных RC-цепей. Разработаны различные схемные решения, предусматривающие как самостоятельное применение RC-цепей с соединением их в «звезду» или «треугольник», так и комбинации с ОПН.

Защитное действие RC-цепочки при коммутациях ВВ основано на уменьшении частоты собственных колебаний присоединения. При этом за счет действия емкости RC-цепочки процесс восстановления напряжения на контактах после погасания дуги становится более низкочастотным, что приводит либо к снижению количества повторных зажиганий дуги, либо к их полному исключению.

RC-цепь позволяет существенно ограничить крутизну коммутационного импульса и, соответственно, степень воздействия перенапряжения на витковую изоляцию.

Уровни перенапряжений и характер переходного процесса зависят как от параметров расчетной схемы, так и от параметров RC-цепочки и от места ее установки.

Помимо указанных преимуществ, RC-цепи имеют и недостатки, связанные с их большими габаритами и вы-

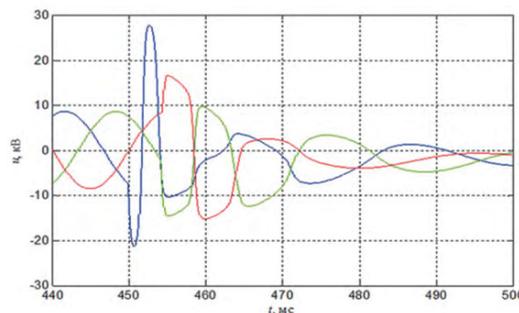


Рис. 14. Компьютерная осциллограмма напряжений на фазах трансформатора в процессе включения-отключения ТЧН 250 кВА, $K_{\Gamma} = 2,84$, $i_{\text{ср}} = 5$ А. RC-цепочка установлена за выключателем ($C = 0,12$ мкФ, $R = 15$ Ом)

сокой стоимостью по сравнению с ОПН, которые в этих отношениях оказываются гораздо предпочтительнее.

Выбор типов оборудования для заземления нейтрали должен быть согласован с установкой RC-цепей, емкость конденсаторов которых существенно увеличивает емкостной ток сети.

Для надежной защиты изоляции оборудования от коммутационных перенапряжений необходимо осуществить правильный выбор параметров RC-цепочек.

Предварительный выбор характеристик RC-цепочек может быть осуществлен согласно методике, изложенной в РД 153-34.3-35.125-99 «Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений».

В дальнейшем параметры RC-цепочек необходимо уточнять расчетными исследованиями коммутационных перенапряжений для рассматриваемых присоединений.

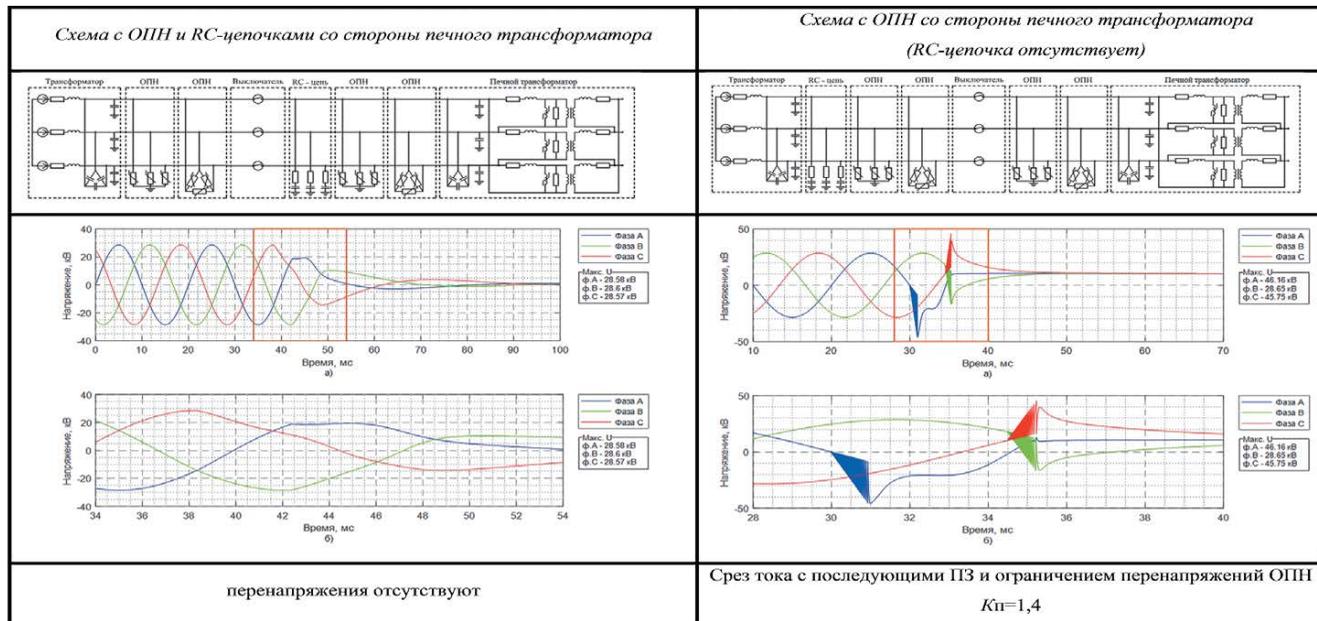


Рис. 15. Осциллограммы переходных процессов при отключении печного трансформатора ВВ 35 кВ с различными схемами защитных аппаратов

Пример ограничения перенапряжений RC-цепочкой для схемы с трансформатором мощностью 250 кВА приведен на рис. 14. Для избавления от ПЗ в ВДК необходимая величина емкости составляет 0,12 мкФ. $K_{II} = 2,84$. RC-цепочка установлена за выключателем.

Для защиты наиболее ответственных трансформаторов необходимо использование более сложных схем защиты с ОПН и RC-цепочками со стороны трансформатора.

Осциллограммы переходных процессов при отключении печного трансформатора ВВ печного распределительного устройства 35 кВ приведены на рис. 15.

Выводы

1. Экспериментальные измерения коммутационных перенапряжений имеют важное практическое значение: позволяют определить фактические характеристики конкретных ВВ, разобраться в причинах повреждения ответственного оборудования, оценить эффективность защитных мероприятий.

2. Современные ВВ могут быть причиной возникновения опасных для изоляции электрооборудования перенапряжений. Негативный эффект от применения ВВ можно минимизировать, выбирая коммутационные аппараты с необходимыми техническими характеристиками, производя настройку ВВ, применяя защитные аппараты.

3. Расчеты коммутационных перенапряжений для присоединений 6-35 кВ с ВВ и индуктивной нагрузкой могут быть эффективно выполнены с использованием программы Simulink комплекса MATLAB. Для программы Simulink разработана специализированная модель ВВ, позволяющая учитывать особенности работы ВДК.

4. Выполненные расчеты при варьировании характеристик присоединений и параметров ВВ для различных объектов сетевых и промышленных предприятий подтвердили следующее:

- для определения возможных перенапряжений и выбора защитных аппаратов для их ограничения (устранения) необходимо проведение индивидуальных расчетов для конкретных характеристик коммутируемого присоединения;
- величина коммутационных перенапряжений и их опасность определяется как характеристиками ВВ, так и параметрами коммутируемого присоединения;
- при отключении после возникновения среза тока в ВДК возможно протекание процессов как в виде возникновения однократного импульса, так и возникновение многократных пробоев межконтактного промежутка ВДК с генерацией высокочастотных перенапряжений (с частотами до единиц МГц), с резким изменением напряжения (срезом напряжения);
- наибольшие по амплитуде коммутационные перенапряжения возникают для присоединений с транс-

форматорами без КЛ или при коротких КЛ при отключении ненагруженного трансформатора после среза тока без возникновения повторных зажиганий между контактами ВДК.

5. Оценка эффективности различных схем использования ОПН и RC-цепочек для защиты трансформаторов показала следующее.

Для обеспечения эффективной работы защиты от коммутационных перенапряжений с использованием ОПН и RC-цепочек необходим правильный выбор параметров и характеристик этих защитных аппаратов. Параметры и характеристики защитных аппаратов должны выбираться исходя из параметров конкретного присоединения.

Применение схемы защиты с установкой ОПН в ячейке с ВВ в большинстве случаев обеспечивает защиту изоляции КЛ и корпусной изоляции трансформатора.

Для защиты от высокочастотных коммутационных перенапряжений не только главной, но и витковой изоляции трансформаторов наиболее ответственных присоединений рекомендуется применение RC-цепочек.

Защитные аппараты необходимо устанавливать непосредственно у защищаемого объекта. Равнозначность защитного действия при установке защитных аппаратов за выключателем или непосредственно у защищаемого объекта наблюдается только для очень коротких КЛ длиной не более 30 м.

При правильном выборе параметров RC-цепочек, обеспечивающих необходимое снижение крутизны фронта и отсутствие пробоя ВДК при расхождении контактов, необходимость в установке ОПН в ячейке выключателя отсутствует.

Схема защиты с совместным использованием ОПН и RC-цепочки может использоваться при необходимости снижения емкости RC-цепочки.

Литература:

1. Базавлук А.А., Сарин Л.И., Наумкин И.Е. Результаты исследований переходных процессов при коммутациях вакуумных выключателей // Энергетик. - 2011. - №10. - С. 27-32.
2. Базавлук А.А., Сарин Л.И., Чайка В.Д. Результаты экспериментальных исследований переходных процессов при коммутациях многоразрывных вакуумных выключателей 110 кВ // Энергетик. - 2016. - №9. - С. 34-36.
3. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозных и внутренних перенапряжений. РД 153-34.3-35.125-99 / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. - 2-ое издание. - СПб.: ПЭИПК. Минтопэнерго, РФ, 1999. - 353 с.
4. Ширковец А.И., Лиске А.Г. Факторы снижения электрической прочности кабельной изоляции из шитого полиэтилена и причины ее повреждения в эксплуатации // Промышленная энергетика. - 2015. - №11.
5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. - 288 с.: ил.
6. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. / Под ред. Халилова Ф.Х., Евдокунина Г.А., Таджибаева А.И. - СПб.: Петербургский энергетический институт повышения квалификации Министерства топлива и энергетики Российской Федерации, 1997, 216 с.
7. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 368 с. - (Серия «Учебники НГТУ»).