

## **Особенности проектирования сетей 110-220 кВ, содержащих ОПН**

к.т.н. Дмитриев М.В. (ЗАО «Завод энергозащитных устройств»)

### **1. Введение**

Основными защитными аппаратами (ЗА) для защиты изоляции от грозových и коммутационных перенапряжений являются вентильные разрядники (РВ) и нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

Защитные свойства РВ и ОПН основаны на нелинейности вольтамперной характеристики их рабочих элементов, обеспечивающей заметное снижение сопротивления при повышенных напряжениях и возврат в исходное состояние после снижения напряжения до нормального рабочего. Низкая нелинейность вольтамперной характеристики рабочих элементов в разрядниках не позволяла обеспечить одновременно и достаточно глубокое ограничение перенапряжений и малый ток проводимости при воздействии рабочего напряжения, от воздействия которого удалось отстроиться за счет введения последовательно с нелинейным элементом искровых промежутков. Значительно большая нелинейность окисно-цинковых сопротивлений (варисторов) ограничителей перенапряжений ОПН позволила отказаться от использования в их конструкции искровых промежутков, т.е. нелинейные элементы ОПН присоединены к сети в течение всего срока его службы. Последнее привело к тому, что современные ОПН, в отличие от разрядников, оказались весьма чувствительными к так называемым квазистационарным перенапряжениям, которые могут приводить к перегреву варисторов и их последующему прожогу (рис.1). Квазистационарные перенапряжения могут возникать из-за различных причин, которые рассмотрены далее, но, как правило, являются следствием изменения схемы сети (плановые и аварийные коммутации трансформаторов или воздушных линий). Длительность таких перенапряжений (от секунд до десятков минут) ограничивается действием релейной защиты или оперативного персонала.

В случае разгерметизации ОПН (проникновения влаги) характер повреждения варисторов несколько иной – происходит перекрытие столба варисторов по поверхности, как правило, под рабочим напряжением, т.е. без предшествующего изменения схемы и режима сети.

В настоящее время в России существует целый ряд фирм, производящих ОПН. Накопленный за последнее десятилетие опыт и новейшие конструкторские решения позволили ведущим из них практически исключить брак при изготовлении ОПН, а также возможность разгерметизации ОПН в эксплуатации. Однако, несмотря на высокий уровень производства, опыт эксплуатации сетей 110-220 кВ свидетельствует о повреждениях ОПН. Учитывая это, важно обратить внимание проектных и эксплуатирующих организаций на то, что повреждения ОПН 110-220 кВ в большинстве случаев происходят не по вине производителя ОПН, а из-за имеющих место в сетях квазистационарных перенапряжений, для ограничения которых ОПН, по общему мнению, не предназначены.



Рис.1. Фотография варистора, повредившегося вследствие прожега.

## 2. Выбор наибольшего рабочего напряжения ОПН

Квазистационарные перенапряжения могут наблюдаться как на промышленной частоте, так и на высших и низших гармониках. Способность ОПН выдерживать повышенное напряжение промышленной частоты определяется его характеристикой «напряжение-время», пример которой приведен в табл.1.

Таблица 1. Характеристика "напряжение-время"  $K_{ОПН}(T)$  ОПН для сетей 110 и 220 кВ.

Длительность приложения повышенного напряжения	Кратность превышения напряжения по отношению к наибольшему рабочему напряжению ОПН ( $U_{НРО}$ )
0,1 с	1,45
1 с	1,40
10 с	1,35
100 с	1,28
1200 с	1,20

В относительных единицах  $U_{НРО}$  характеристики «напряжение-время» ОПН у различных фирм близки друг другу, также в относительных единицах близки друг другу и вольтамперные характеристики. Поэтому параметром, определяющим многие свойства ОПН, является его наибольшее рабочее напряжение ОПН  $U_{НРО}$ . При выборе ОПН значение  $U_{НРО}$  ограничено снизу требованиями надежной работы ОПН при воздействии на него рабочего напряжения и квазистационарных перенапряжений, а сверху – требованиями защиты оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений.

Наибольшее рабочее напряжение ОПН, обеспечивающее его безаварийную работу при воздействии рабочего напряжения, необходимо выбирать из условия

$$U_{НРО} \geq U_{НР}, \quad (1)$$

где  $U_{НР}$  – наибольшее рабочее напряжение сети (фазное значение).

Пусть в сети в течение времени  $T$  существуют квазистационарные перенапряжения кратности  $K_{П}$ , т.е. на установленные в сети ОПН воздействует напряжение  $K_{П} \cdot U_{НР}$ . Тогда наибольшее рабочее напряжение ОПН,

обеспечивающее его безаварийную работу при квазистационарных перенапряжениях, необходимо выбирать из условия

$$U_{HPO} \geq \frac{K_{\Pi} \cdot U_{HP}}{K_{OПН}(T)}. \quad (2)$$

Как видно, для верного выбора  $U_{HPO}$ , по крайней мере, необходимо знать возможные кратности квазистационарных перенапряжений  $K_{\Pi}$  в месте предполагаемой установки ОПН в сети и длительность их существования  $T$ .

Согласно [1] сети 110-220 кВ должны выполняться с эффективно заземленной нейтралью; в таких сетях  $K_{\Pi} \leq 1.4$ . Время существования перенапряжений считается равным времени действия основной (или резервной) релейной защиты и принимается не более нескольких секунд.

Тогда, на основе данных табл.1 с использованием выражения (2), а также с учетом прочих факторов (поправка на неравномерность распределения напряжения вдоль ОПН, попытка учесть возможность существования в сетевом напряжении высших гармонических), как правило, для сетей 110-220 кВ принимают

$$U_{HPO} = (1.0 \div 1.05)U_{HP}. \quad (3)$$

Условие выбора ОПН (3) принято типовым в проектных организациях и используется без тщательного анализа конкретной схемно-режимной ситуации, в которую попадает ОПН. Вместе с тем, специфика электрических сетей стран бывшего СССР такова, что:

- эксплуатируется большое число двухтрансформаторных подстанций; нейтраль одного из трансформаторов, как правило, разземлена; выключатели на стороне 110-220 кВ трансформаторов в большом числе случаев отсутствуют;
- такие подстанции (тупиковые, отпаечные, транзитные) в ряде случаев питаются по длинным воздушным линиям (ВЛ) 110-220 кВ, т.е. электрически удалены от центров питания, напряжение на шинах которых «неизменно».

Учитывая это, а также опыт эксплуатации ОПН и результаты расчетов перенапряжений, можно утверждать, что выполнение условия (3) не гарантирует надежную работу ОПН 110-220 кВ в случае возникновения в сети квазистационарных перенапряжений, так как:

- при аварийных отключениях ВЛ или силовых трансформаторов (отключение трансформатора с заземленной нейтралью) в сетях 110-220 кВ могут выделяться участки сети с изолированной нейтралью, что является нарушением требований ПУЭ; время существования таких режимов определяется тем, как быстро обслуживающий персонал заземлит нейтраль трансформатора, т.е. может составлять десятки минут;
- в ряде случаев в сетях 110-220 кВ производятся коммутации ВЛ 110-220 кВ в блоке с силовыми трансформаторами 110-220 кВ, не имеющими выключателей на стороне высшего напряжения; это может вызывать так называемый переходный феррорезонанс,

сопровождается квазистационарными перенапряжениями значительной кратности и длительности существования.

Для обеспечения надежной работы ОПН 110-220 кВ, выбранных исходя из условия (3), рекомендуется принятие рассмотренных ниже мер по снижению квазистационарных перенапряжений.

### 3. Короткие замыкания в сети

По известным для данной точки сети величинам токов однофазного и трехфазного короткого замыкания можно определить число  $m$ , которое вещественно при пренебрежении емкостными проводимостями и активными сопротивлениями сети

$$m = \frac{3I_K^{(3)}}{I_K^{(1)}} - 2. \quad (4)$$

Для случая однофазного короткого замыкания, составляющего основную долю в общем числе коротких замыканий, кратность напряжения на неповрежденной фазе согласно [2] будет:

$$K_{II} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{m^2 + m + 1}}{m + 2}. \quad (5)$$

Как правило, токи однофазных и трехфазных коротких замыканий в сетях 110-220 кВ отличаются друг от друга несущественно. Из (4)  $m \approx 1$ , что по (5) обеспечивает  $K_{II} \approx 1.0$ , т.е. заметных повышений напряжения при однофазных коротких замыканиях не бывает (также и при других видах коротких замыканий). Однако, после отключения поврежденного элемента может временно выделяться участок сети с изолированной нейтралью, что при неблагоприятных стечениях обстоятельств вызовет опасные квазистационарные перенапряжения – например, в схемах электроснабжения железных дорог [3].

### 4. Тяговые подстанции переменного тока 27.5 кВ

Электрифицированные железные дороги (ЭЖД) являются одним из крупнейших потребителей электроэнергии и заслуживают соответствующего внимания. Электроснабжение электрифицированных железных дорог осуществляется через тяговые подстанции (ТПС). Состав и устройство ТПС зависит от системы (по роду тока и напряжения) электрической тяги, применяемой на железной дороге. К настоящему времени наибольшее распространение получила система однофазного тока промышленной частоты 50 Гц [4], на которой и сосредоточим внимание.

От тяговых подстанций (рис.2) через тяговую сеть, включающую в себя контактную сеть (КС), рельсовый путь (РП), питающие и отсасывающие линии (фидеры) и ряд других устройств и линий, запитывается электроподвижной состав (ЭПС).

Электрифицированные железные дороги согласно [4] относятся к электроприемникам первой категории по надежности электроснабжения по классификации ПУЭ. Поэтому для них предусмотрено питание от двух

независимых взаимно резервирующих источников электроэнергии, которыми могут являться две различные подстанции высоковольтных электрических сетей. Питание обычно осуществляется от сетей классов напряжения 110-220 кВ по одноцепным ВЛ, которые заводятся непосредственно на ТПС.

Нагрузка тяговой подстанции является двухфазной (рис.2): один фазный вывод трансформатора на стороне 27,5 кВ (здесь – фаза «с») присоединяется к рельсовому пути (по сути, заземляется), другие две фазы («а» и «b») через выключатели присоединяются к контактным проводам. Таким образом, электроподвижной состав запитывается снимаемыми с трансформатора линейными напряжениями  $U_{ac}$  и  $U_{bc}$ .

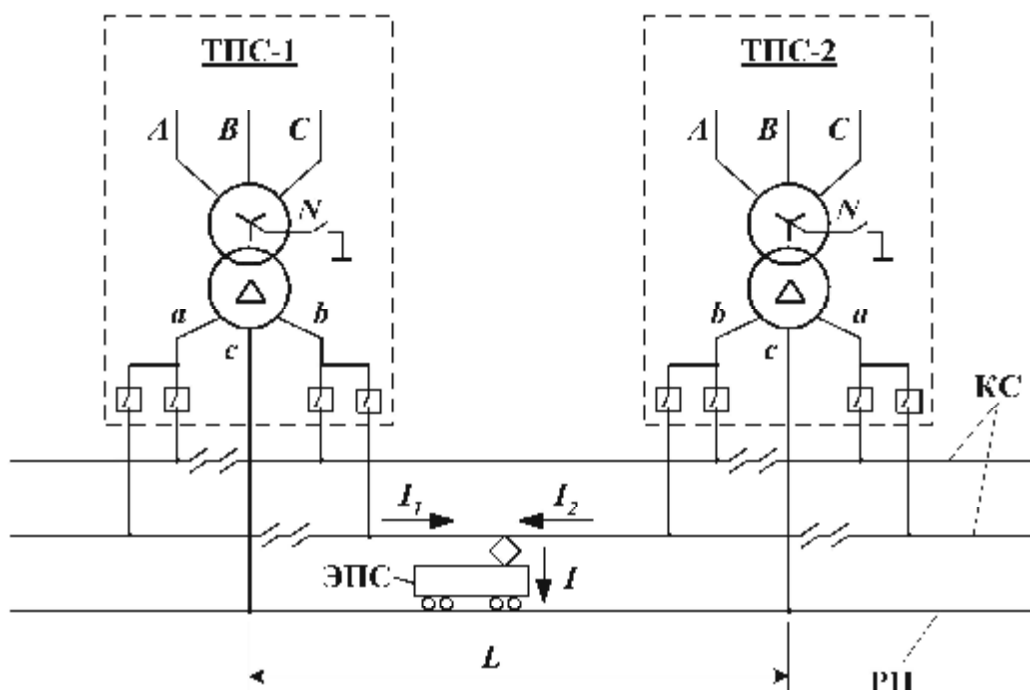


Рис.2. Схема двухпутного участка железной дороги однофазного тока промышленной частоты при его двухстороннем питании (не показаны линии электропередачи, питающие тяговые подстанции, а также некоторые элементы ТПС и тяговой сети).

Достаточно часто на стороне 110-220 кВ силовых трансформаторов ТПС отсутствуют выключатели, вместо которых установлены комплекты «короткозамыкатель-отделитель», а нейтрали трансформаторов ТПС разземлены. В случае возникновения короткого замыкания на питающей ВЛ 110-220 кВ эта ВЛ отключается от сети 110-220 кВ выключателем головной ПС, но остается присоединенной к силовому трансформатору ТПС. Тогда напряжение из контактной сети, питаемой по условиям обеспечения надежного электроснабжения ЭПС от второй тяговой подстанции, за счет так называемой «обратной трансформации» может передаваться на отключенную ВЛ 110-220 кВ и вызывать квазистационарные перенапряжения на изоляции присоединенного к ней оборудования с кратностью вплоть до  $K_{\Pi} = 3.5$ , т.е., в частности, приводить к повреждению ОПН, установленных у обмоток 110-220 кВ силового трансформатора ТПС.

Для исключения повреждений ОПН 110-220 кВ в схемах питания тяговых подстанций переменного тока 27.5 кВ согласно [3] проектирующим и эксплуатирующим организациям рекомендуется:

- по возможности заземлять нейтрали силовых трансформаторов на ТПС;
- устанавливать на ТПС ограничители перенапряжений с повышенным наибольшим рабочим напряжением и удельной поглощаемой энергией ( $w_{уд} \geq 6$  кДж/кВ);
- при коротком замыкании на питающей ВЛ 110-220 кВ отключать рабочий трансформатор ТПС от тяговой сети 27.5 кВ (например, выключателем на стороне 27.5 кВ) до выделения изолированного участка питающей сети, состоящего из ВЛ 110-220 кВ и трансформатора ТПС.

### 5. Блочные схемы

Одной их схем, в которых возможно возникновение опасных для ОПН квазистационарных перенапряжений, является так называемая блочная (полублочная) схема [5].

В качестве примера, схема блочной передачи 110 кВ, в которой воздушная линия 110 кВ может коммутироваться в блоке с силовым трансформатором 110/10 кВ («звезда-треугольник-11») выключателями 110 кВ, приведена на рис.3. Подобная схема достаточно распространена при питании тупиковых и отпаечных подстанций 110 (220) кВ.

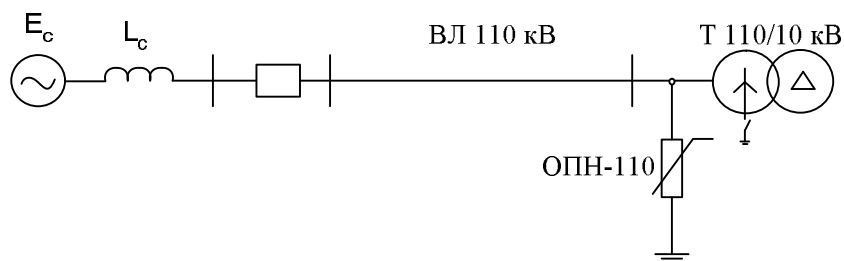


Рис.3. Схема блочной передачи 110 кВ.

В эксплуатации перед плановыми коммутациями блока ВЛ-Т рекомендуется предварительно заземлять нейтраль трансформатора, присоединенного к ВЛ. Однако большое число аварийных ситуаций возникает при коммутациях ВЛ 110 (220) кВ без соответствующей подготовки схемы, т.е. когда нейтраль трансформатора на момент коммутации оказывается разземленной.

Условимся питаемый со стороны 110 кВ блок ВЛ-Т, в котором трансформатор 110/10 кВ ненагружен, называть «холостым». В случае неполнофазного включения блока ВЛ-Т на сеть 110 кВ упрощенная расчетная схема для определения напряжения на отключенных фазах приведена на рис.4,а,б. На этих схемах  $E_{ЭКВ}$  – эквивалентная эдс, обусловленная действием подключенных к сети 110 кВ фаз блока ВЛ-Т;  $C_{ЭКВ}$  – эквивалентная емкость между отключенными и подключенными к сети 110 кВ фазами ВЛ;  $L_T$  – эквивалентная индуктивность трансформатора, определяемая его

индуктивностью рассеяния;  $L_M$  – нелинейный шунт намагничивания, определяемый на основе нелинейных свойств стали трансформатора.

Феррорезонансные перенапряжения в схемах вида рис.4 возникают в том случае, когда под воздействием напряжения  $E_{ЭКВ}$  окажется цепочка, в которой последовательно соединены емкость и нелинейная индуктивность. Подобная цепочка образуется из  $C_{ЭКВ}$  и  $L_M$  в схеме рис.4,а, в которой высока вероятность возникновения опасных феррорезонансных перенапряжений на отключенных фазах. В схеме рис.4,б параллельно емкости  $C_{ЭКВ}$  включена индуктивность  $L_T$ , и их суммарное сопротивление носит индуктивный характер в широком диапазоне частот, что исключает в схеме рис.4,б феррорезонансные перенапряжения.

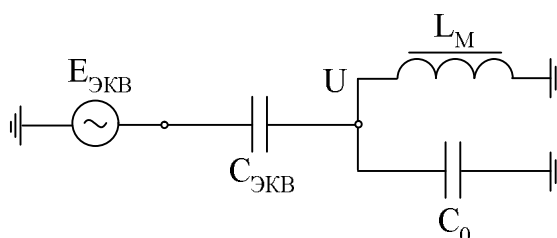


Рис.4,а. Эквивалентная схема для расчета напряжения на отключенных фазах (нейтраль силового трансформатора разземлена).

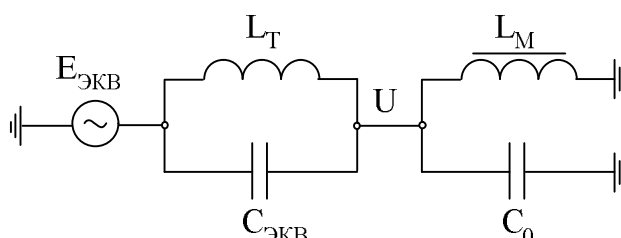


Рис.4,б. Эквивалентная схема для расчета напряжения на отключенных фазах (нейтраль силового трансформатора заземлена).

В подтверждение вероятности возникновения феррорезонансных перенапряжений на невключенных фазах блока ВЛ-Т (в случае, когда нейтраль силового трансформатора разземлена) на рис.5-6 приведены расчетные осциллограммы, полученные в полной трехфазной схеме для ВЛ 110 кВ длиной 30 км и мощности трансформатора 110/10 кВ, составляющей 40 МВА.

Проведенные исследования показывают, что при неполнофазных режимах питания блока ВЛ-Т с разземленной нейтралью опасные феррорезонансные перенапряжения на отключенных фазах могут возникать в широком диапазоне длин ВЛ и мощностей силовых трансформаторов. Однако на возможность возникновения феррорезонанса и кратности перенапряжений при нем существенное влияние оказывает нагрузка трансформатора: уже при активной нагрузке трансформатора, соответствующей 10% его номинальной мощности, феррорезонансных перенапряжений не возникает.

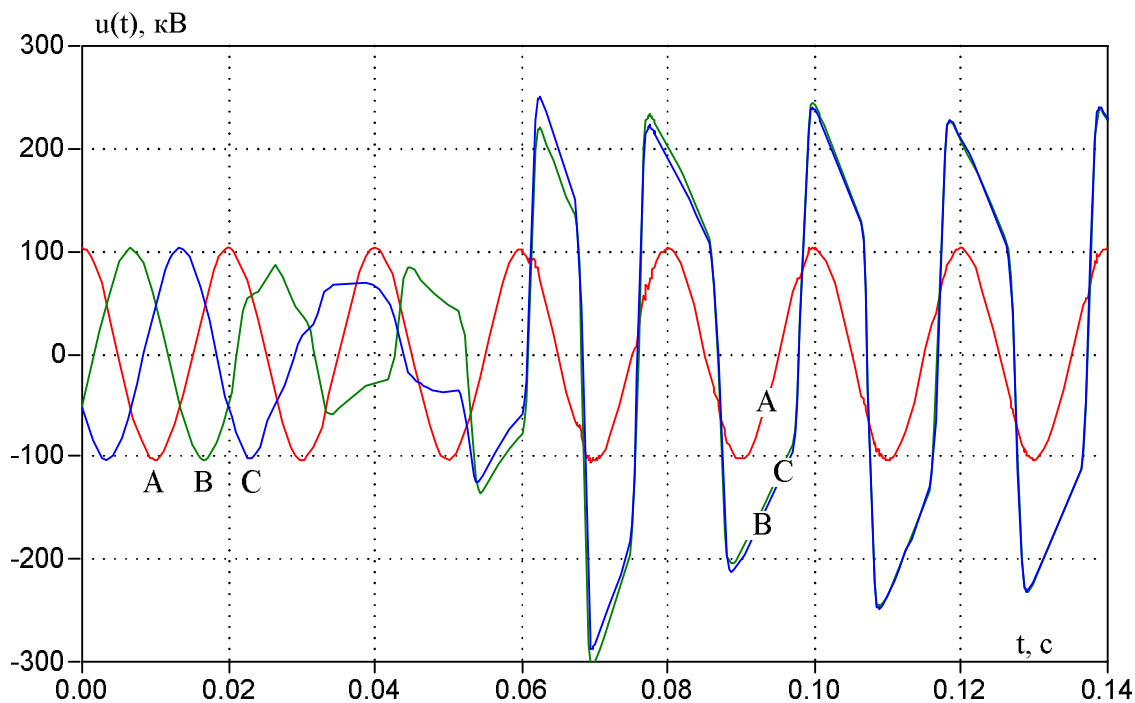


Рис.5. Напряжение фаз ВЛ 110 кВ при отключении холостого блока ВЛ-Т от сети 110 кВ в случае, когда фаза «А» не отключилась (нейтраль изолирована).

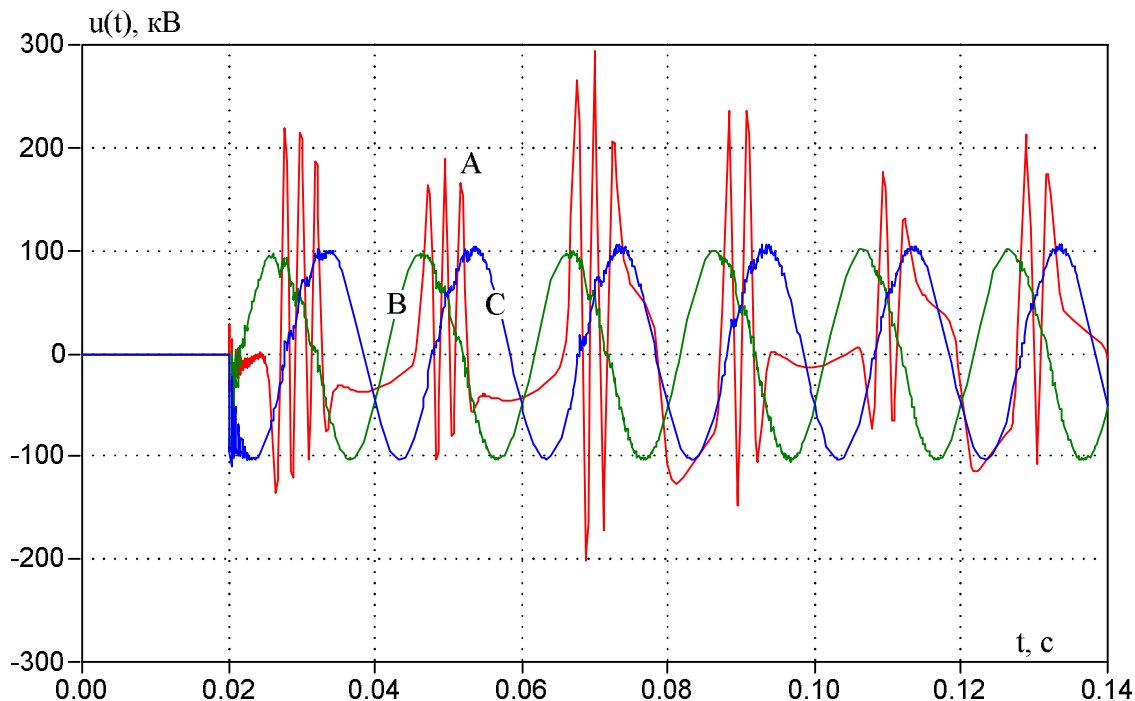


Рис.6. Напряжение фаз ВЛ 110 кВ при включении холостого блока ВЛ-Т от сети 110 кВ в случае, когда включились только фазы «В» и «С» (нейтраль изолирована).

У силовых трансформаторов в блочной передаче ВЛ-Т установлены защитные аппараты (разрядники или ОПН), предназначенные для ограничения грозовых перенапряжений. После замены вентильных разрядников на ОПН феррорезонансные перенапряжения в случае их возникновения будут воздействовать на ОПН отключенных фаз. Расчеты процессов в случае ненагруженного трансформатора показывают, что, например, за 1 секунду



неполнофазного режима, рассмотренного на рис.5, в ОПН выделится энергия 400 кДж, а в условиях рис.6 – 700 кДж, т.е. около 5.2 и 9.0 кДж/кВ соответственно (приведено к  $U_{нрО} = 77$  кВ).

Выполненный анализ позволил сделать ряд обобщающих выводов.

1. В блочных передачах вида рис.3 возможно возникновение опасных феррорезонансных перенапряжений при одновременном стечении следующих обстоятельств:
  - нейтраль трансформатора разземлена;
  - активная нагрузка трансформатора менее 10% его номинальной мощности;
  - имеет место неполнофазный режим включения блока.
2. В случае возникновения феррорезонансных перенапряжений существенным нагрузкам и риску повреждения подвергаются ОПН, установленные у трансформатора. Для снижения риска повреждения ОПН рекомендуются повышенные рабочее напряжение ОПН и его удельная энергоемкость, конкретные значения которых необходимо определять по результатам компьютерных расчетов, аналогичных проведенным выше.
3. Для снижения вероятности возникновения феррорезонансных перенапряжений и снижения риска повреждения ОПН рекомендуется:
  - заземлять нейтраль трансформатора перед осуществлением плановых коммутаций по включению и отключению блока;
  - оснастить блочную передачу защитами от неполнофазных режимов.
4. Для исключения возможности возникновения феррорезонансных перенапряжений проектным организациям рекомендуется не применять блочные передачи вида рис.3, а устанавливая выключатель на стороне высокого напряжения трансформатора, что соответствует мировой практике построения высоковольтных сетей.

## 6. Заключение

В ряде случаев ОПН 110-220 кВ выходят из строя вследствие теплового пробоя, сопровождающегося прожогом варисторов, который возникает из-за нерасчетных квазистационарных перенапряжений, т.е. по независящим от производителя ОПН причинам. Учитывая это, проектным и эксплуатирующим организациям при замене вентильных разрядников 110-220 кВ на ОПН 110-220 кВ рекомендуется обращать внимание на возможность возникновения квазистационарных перенапряжений в местах установки ОПН и принимать меры по их снижению.

1. Для вновь строящихся подстанций отказаться от применения блочных схем, т.е. схем без выключателей на стороне высшего напряжения трансформаторов 110-220 кВ.
2. На уже введенных в действие и эксплуатирующихся подстанциях заменить у трансформаторов 110-220 кВ комплекты «короткозамыкатель-отделитель» на выключатели.

3. По-возможности (там, где это допустимо по условиям работы релейной защиты), заземлять нейтрали силовых трансформаторов 110-220 кВ.
4. В сетях, содержащих трансформаторы 110-220 кВ с разземленной нейтралью:
  - устанавливать ОПН 110-220 кВ, наибольшее рабочее напряжение которых, по крайней мере, на 10% выше, чем наибольшее рабочее напряжение сети;
  - обратить особое внимание на возможность выделения участка сети с изолированной нейтралью (особенно, в схемах электроснабжения тяговых подстанций); для исключения возможности длительного существования в сети такого участка, в частности, рекомендуется вместо ручного заземления нейтрали персоналом обеспечить автоматическое заземление нейтрали выключателем или разъединителем с автоматическим приводом.
5. Вывести на щит оперативного пульта управления индикацию не только линейного напряжения сети (сборных шин, ВЛ), но и напряжения всех трех фаз относительно земли, так как в эксплуатации ОПН находится под воздействием фазного напряжения, которое с учетом возможной несимметрии сети (естественной или аварийной) не может быть определено через линейное напряжение.

#### **Список использованных источников**

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. (ПУЭ-7). – М.: 2004.
2. Евдокунин Г.А. “Электрические системы и сети”. – СПб.: Издательство Сизова М.П., 2004.
3. Афанасьев А.И., Евдокунин Г.А., Дмитриев М.В. Обеспечение электромагнитной совместимости на тяговых подстанциях переменного тока//Сборник докладов научно-технической конференции «Электромагнитная совместимость, выбор, размещение и эксплуатация нелинейных ограничителей перенапряжений в электрических сетях 0.4-500 кВ ГЭС и ГАЭС», 19-23 июня 2006.
4. Справочник по электроснабжению железных дорог: В 2 т. / Ю.Н. Макас, В.М. Эрлих, П.М. Шилкин, Б.Е. Геронимус, И.Б. Мостинский и др.; Под ред. К.Г.Марквардта. – М.: Транспорт, 1980-1981.
5. РД 153-34.3-35.125-99 Руководства по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. – 2-е изд. – СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.