

**Эффект «обратной трансформации» в электрических сетях,  
включающих в себя тяговые подстанции 27,5 кВ,  
и анализ причин повреждения оборудования**  
Дмитриев М.В. (ЗАО «ЗЭУ»), Афанасьев А.И., Евдокунин Г.А. (СПбГПУ),

### **1. Введение**

Электрифицированные железные дороги (ЭЖД) являются одним из крупнейших потребителей электроэнергии. Нормативные документы, регламентирующие устройство и техническую эксплуатацию системы электроснабжения ЭЖД (например, [1-4]), в основном, согласованы с ПУЭ [5]. Однако по условиям работы, решаемым задачам, применяемому оборудованию и устройствам система электроснабжения электрифицированных железных дорог существенно отличается от систем электроснабжения других потребителей. Немаловажным также является то, что развитие ЭЖД, как и вообще железных дорог, происходит в рамках иной ведомственной принадлежности, нежели развитие электроэнергетических сетей и систем общей принадлежности. По всем этим причинам используемые в электроснабжении ЭЖД схемы, а также некоторые принципы технической эксплуатации отличаются от регламентируемых [6, 7]. В частности, различается логика действий релейных защит и автоматики (РЗА) системы электроснабжения электрифицированных железных дорог и электрических сетей общего назначения (ЭСОН); координация их действий также отсутствует.

Такое положение вещей в отдельных случаях может приводить к аварийным ситуациям в электрических сетях общего назначения [8]. Перед тем как проиллюстрировать это утверждение примерами, следует кратко описать систему электроснабжения ЭЖД.

### **2. Особенности электроснабжения электрифицированных железных дорог**

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. Основное внимание сосредоточим на системе однофазного тока промышленной частоты 50 Гц [9, 10].

От тяговых подстанций (рис.1) 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). Номинальное напряжение контактной сети принимается равным номинальному напряжению электроподвижного состава и составляет 25 кВ. При этом номинальное напряжение всех устройств ТПС, присоединенных к контактной сети, составляет 27,5 кВ, то есть оно на 10% превышает номинальное напряжение КС. При использовании этой системы тяговые подстанции представляют собой простые трансформаторные подстанции, обладающие, однако, специфическими особенностями.

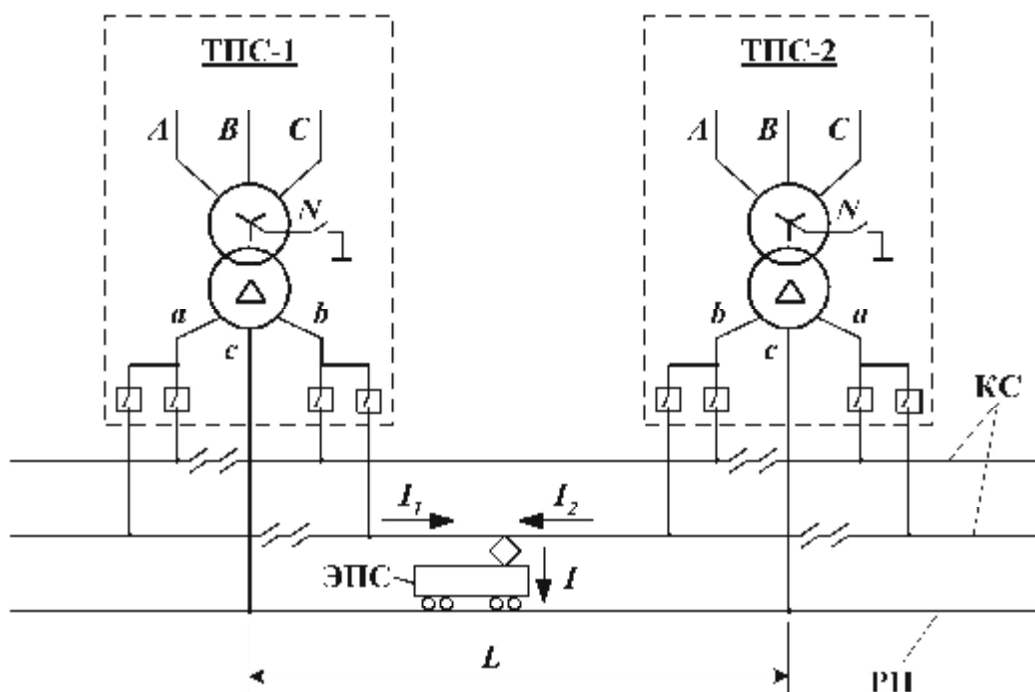


Рис.1. Схема двухпутного участка железной дороги однофазного тока промышленной частоты при его двухстороннем питании (не показаны линии электропередачи, питающие тяговые подстанции, а также некоторые элементы ТПС и тяговой сети).

Электрифицированные железные дороги согласно [1, 4, 9] относятся к электроприемникам первой категории по надежности электроснабжения по классификации ПУЭ [5]. Поэтому для них предусмотрено питание от двух независимых взаимно резервирующих источников электроэнергии, которыми могут являться две различные (отдельные) подстанции (ПС) высоковольтных электрических сетей общего назначения или разные системы шин крупной ПС. Питание обычно осуществляется от сетей классов напряжения 110 кВ, реже 35 или 220 кВ, по одноцепным воздушным линиям (ВЛ), которые заводятся непосредственно на ТПС. Длины ВЛ невелики и составляют в среднем 20-40 км.

Выбор схемы питания конкретной тяговой подстанции зависит от конфигурации сетей общего назначения, резерва мощности в системе и т.п., но всегда стремятся к двухстороннему (от различных подстанций) электроснабжению ТПС [1-3, 9, 10]. Схема типовой тяговой подстанции с двухсторонним питанием представлена на рис.2. Такие схемы используются как для транзитных, так и для отпаечных ТПС 110-220 кВ [9].

На тяговые подстанции, как правило, устанавливаются силовые трехфазные трансформаторы, обмотки которых соединены по схеме  $Y_n/\Delta-11$  («звезда с выведенной нейтралью – треугольник» – 11). Мощности трансформаторов составляют 25-40 МВА. Нейтрали трансформаторов, как правило, разземлены. Каждая ТПС оснащается двумя такими трансформаторами, один из которых является 100 %-ным ненагруженным резервом другого (то есть в любой момент времени в работе находится только один трансформатор). На транзитных и отпаечных ТПС в целях экономии силовые выключатели на высокой стороне трансформаторов отсутствуют (рис.2); их заменяют комплекты «короткозамыкатель-отделитель» [9, 11].

Отключение питания контактной сети осуществляется выключателями 27,5 кВ на низкой стороне трансформаторов.

Нагрузка тяговой подстанции является двухфазной (рис.1): 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  $U_{bc}$ . Напряжения  $U_{ac}$  и  $U_{bc}$  определяются напряжениями  $U_{AN}$  и  $U_{CN}$  на высокой стороне трансформатора. Фазы «А» и «С» получают нагруженными (их принято называть «рабочими»), а фаза «В» оказывается ненагруженной («нерабочей»). Таким образом, ТПС имеет несимметричную по фазам нагрузку.

### 3. Эффект «обратной трансформации» напряжения

Одна из особенностей системы электроснабжения электрифицированных железных дорог проявляется в следующей ситуации, которую рассмотрим на примере типовой схемы рис.2 из [9, 10]. Предположим на воздушной линии между ТПС и ПС-2 в точке *F* произошло однофазное короткое замыкание на землю. По обнаружению к.з. РЗА ЭСОН дает команду на отключение нормально замкнутого силового выключателя В-110-2 на ПС-2. Затем отключается нормально замкнутый выключатель В-110-1 на ПС-1. После отключения В-110-1 и В-110-2 ТПС теряет источники питания в сетях общего назначения. Однако рабочий трансформатор Т-1 тяговой подстанции остается подключенным к контактной сети и, соответственно, к двум соседним ТПС (система питания двухсторонняя), так как отключения нормально замкнутого выключателя В-27,5-1 не происходит. Это, с одной стороны, связано с логикой действий РЗА системы электроснабжения ЭЖД (допускается перерыв питания ТПС на время автоматического восстановления питания от источников в сетях общего назначения [5]). С другой стороны, токовые защиты на стороне 27,5 кВ тяговой подстанции не реагируют на однофазные к.з. на землю на стороне 110 кВ потому, что оно не вызывает сколько-нибудь существенного увеличения тока в обмотках 27,5 кВ трансформаторов и в контактной сети. Действительно, пока трансформатор Т-1 подключен к сети 110 кВ через него проходит ток, обусловленный подпиткой со стороны контактной сети точки короткого замыкания на ВЛ 110 кВ «ПС-1–ТПС–ПС-2». Если нейтраль Т-1 была бы заземлена, то ток подпитки точки однофазного к.з. проходил бы по этой нейтрали и составлял килоамперы. Так как после отключения выключателей В-110-1 и В-110-2 на ПС-1 и ПС-2 нейтраль единственного подключенного к выделившемуся участку сети 110 кВ трансформатора Т-1 разземлена, то нет другого пути протекания тока однофазного короткого замыкания кроме как через емкости «здоровых» фаз ВЛ 110 кВ. Поэтому сопротивление протеканию тока замыкания оказывается высоким: оно определяется, главным образом, емкостным сопротивлением фазных проводов ВЛ 110 кВ. Учитывая это, ток однофазного замыкания, обусловленный подпиткой точки к.з. на ВЛ 110 кВ через трансформатор ТПС со стороны контактной сети, оказывается весьма

незначительным и по расчетам для типовых параметров трансформатора 110 кВ, 40 МВА, ВЛ 110 кВ (пусть расстояния от ТПС до ПС-1 и ПС-2 одинаковы и равны 30 км) и КС 25 кВ (пусть расстояния от рассматриваемой ТПС до соседних одинаковы и равны 50 км) составляет 20-40 А. Изменение же тока в КС на несколько десятков ампер не вызовет срабатывания токовых защит, так как в целом ток не превысит номинального значения, и, кроме того, скачки тока характерны для контактной сети при движении по участку ЭПС.

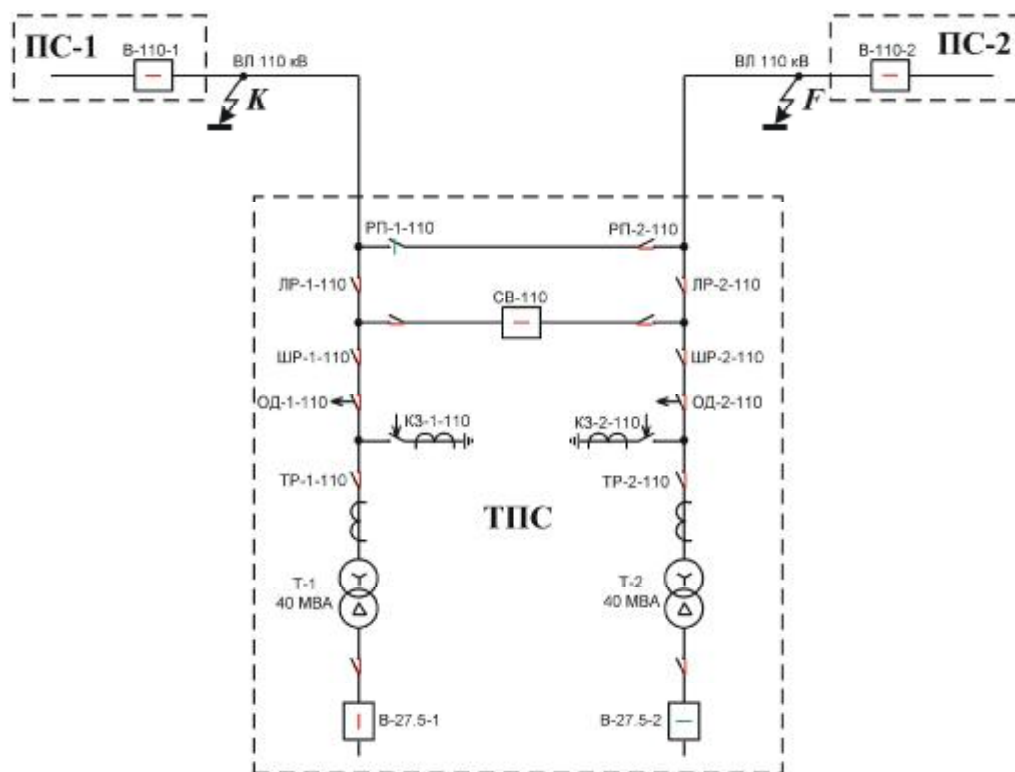


Рис.2. Тяговая подстанция для электроснабжения тяговой сети 25 кВ однофазного тока частотой 50 Гц.

При некоторых двухфазных замыканиях в сети 110 кВ возможно значительное возрастание тока в КС 25 кВ (до 800 А по расчетам [12]). В этом случае на ТПС срабатывает токовая защита, дающая команду на отключение выключателя на стороне 27,5 кВ трансформатора. Полное время отключения с учетом селективности защит первой ступени и работы выключателя составляет порядка 0,1 с.

В течение всего времени, пока трансформатор Т-1 будет подключен к запитанной от соседних тяговых подстанций контактной сети и не отключен от сети 110 кВ, на выделенный участок сети 110 кВ (ВЛ 110 кВ «ПС-1–ТПС», ТПС, ВЛ 110 кВ «ТПС–ПС-2») с трансформатора за счет эффекта, который можно назвать «обратной трансформацией», будет подаваться напряжение. Оценим величину этого напряжения.

На рис.3,а показана схема трехфазного двухобмоточного трансформатора, обмотки которого соединены по схеме  $Y_n/\Delta-11$ , нейтраль разземлена. На схеме обозначены: *A, B, C* – выводы стороны 110 кВ; *a, b, c* – выводы стороны 27,5 кВ. Графоаналитически поясним влияния эффекта «обратной трансформации» на квазистационарные перенапряжения в сети 110 кВ. При этих приближенных

расчетах будем пренебрегать наличием присоединенной к трансформатору сети 110 кВ и предполагать, что контактная сеть имеет бесконечную мощность.

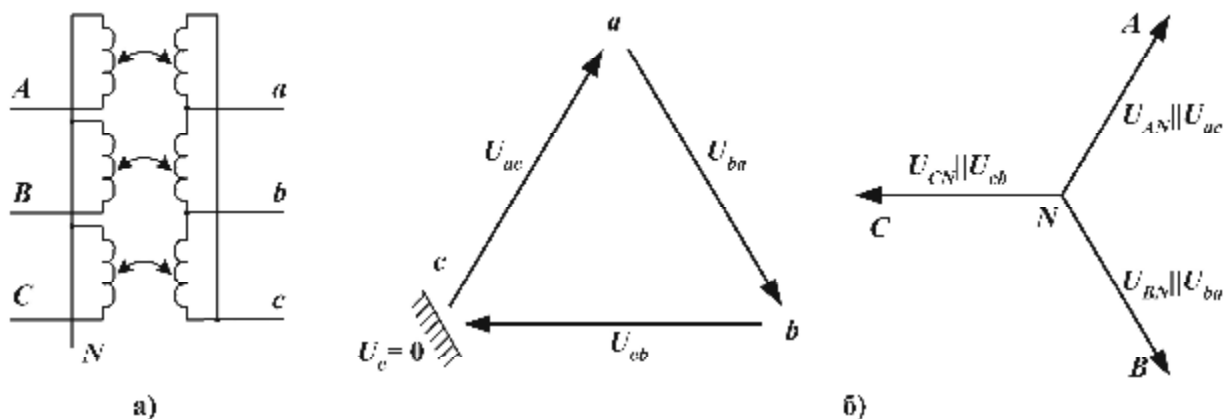


Рис.3. Трехфазный двухобмоточный трансформатор с соединением обмоток  $Y_n/\Delta-11$  (а) и его векторная диаграмма напряжений при обратной трансформации в случае отсутствия к.з. на высокой стороне (б).

В комплексной плоскости запишем уравнения трансформатора для напряжения. При этом в формулах и выражениях для простоты не будем ставить обозначения векторов (комплексов).

Пусть  $U_{A,B,C}$  – напряжение выводов обмоток высокой (110 кВ) стороны относительно земли;  $U_N$  – напряжение нейтрального вывода трансформатора относительно земли;  $U_{a,b,c}$  – напряжение выводов обмоток низкой (27,5 кВ) стороны относительно земли.

Тогда  $U_{AN} = U_A - U_N$  – напряжение, приложенное к обмотке фазы «А»;  
 $U_{BN} = U_B - U_N$  – напряжение, приложенное к обмотке фазы «В»;  
 $U_{CN} = U_C - U_N$  – напряжение, приложенное к обмотке фазы «С»;  
 $U_{ac} = U_a - U_c$  – межфазное (линейное) напряжение между фазами «а» и «с»;  
 $U_{ba} = U_b - U_a$  – межфазное (линейное) напряжение между фазами «b» и «а»;  
 $U_{cb} = U_c - U_b$  – межфазное (линейное) напряжение между фазами «с» и «b».

Уравнения трансформатора:

$$U_{AN} = K \times U_{ac}, U_{BN} = K \times U_{ba}, U_{CN} = K \times U_{cb},$$

где  $K = \frac{110/\sqrt{3}}{27,5} = 2,31$  – коэффициент трансформации понижающего трансформатора 110/27,5 кВ.

Предположим, что на стороне высокого напряжения трансформатора короткое замыкание отсутствует. Предположение вполне правомочно для случая, если в точке  $F$  произошло не металлическое однофазное короткое замыкание на землю, а, например, перекрытие гирлянды изоляторов в результате воздействия грозового перенапряжения. После отключения линейных выключателей В-110-1 и В-110-2 подпитка дуги короткого замыкания происходит только от тяговой подстанции за счет «обратной трансформации»,

причем в сети с изолированной нейтралью, т.е. по каналу дуги протекает ток в несколько ампер, и она может самопроизвольно погаснуть (короткое замыкание исчезнет).

Пусть напряжение на трансформатор подается по двум фазам («а» и «b») с низкой стороны трансформатора (двухстороннее питание), а третья фаза «с» – заземлена (соединена с рельсом). Построения выполнены на рис.3,б.

По диаграмме видно, что смещения нейтрали не происходит, а на изоляцию «фаза-земля» оборудования стороны 110 кВ воздействуют фазные напряжения сети 110 кВ.

В случае если в сети 110 кВ однофазное короткое замыкание осталось, то возможны три варианта, которые для двухстороннего питания ТПС со стороны 27,5 кВ рассмотрены на рис.4.

Во всех рассмотренных случаях однофазных коротких замыканий (рис.б) происходит смещение нейтрали, и на изоляцию «фаза-земля» оборудования стороны 110 кВ воздействуют линейные напряжения сети 110 кВ.

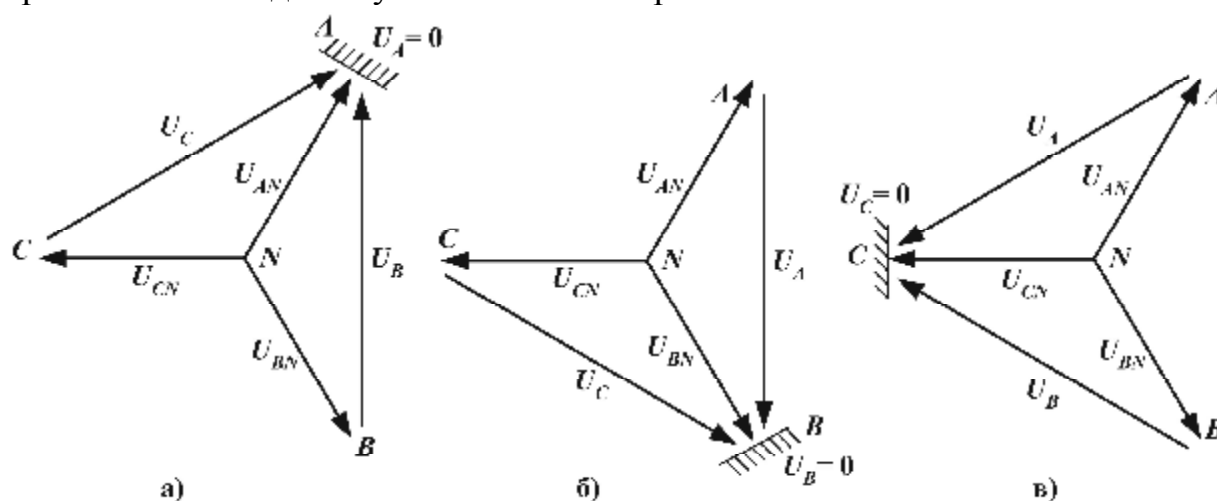


Рис.4. Векторные диаграммы напряжений на высокой стороне трехфазного двухобмоточного трансформатора при обратной трансформации в случаях короткого замыкания на землю фазы «А» (а), фазы «В» (б), фазы «С» (в).

Аналогичные расчеты могут быть проведены при различных видах коротких замыканий на стороне 110 кВ для случаев одностороннего и двустороннего питания на стороне 27,5 кВ. Анализ результатов, полученных в подробных расчетных моделях, позволил сделать ряд важных выводов:

- в случае отсутствия короткого замыкания на стороне 110 кВ напряжение на высоковольтных выводах трансформатора не превышает фазного напряжения 63,6 кВ как при подпитке на стороне 27,5 кВ по одной фазе, так и при подпитке по двум фазам;
- при одностороннем питании (подпитка по одной фазе) наибольшие значения напряжения на высоковольтных выводах трансформатора наблюдаются при двухфазных коротких замыканиях фаз «А» и «В» или фаз «А» и «С» на землю (кратность перенапряжений до 2,5-3,5 о.е. по отношению к наибольшему рабочему напряжению сети 110 кВ), а при двухстороннем питании (подпитка по двум фазам) – при однофазных

коротких замыканиях на землю любой из фаз (кратность перенапряжений до 2,0 о.е.); длительность существования повышенных напряжений определяется действием релейной защиты (персонала) и может достигать нескольких секунд (минут);

- при всех видах коротких замыканий на стороне 110 кВ и при всех вариантах подпитки по стороне 27,5 кВ чаще наибольшее значение напряжения отмечается на фазе «В» (нерабочей).

Таким образом, следует признать, что эффект «обратной трансформации» может являться причиной квазистационарных перенапряжений значительной кратности.

Помимо квазистационарных перенапряжений на оборудование ВЛ 110 кВ будут воздействовать коммутационные перенапряжения, связанные с отключением выключателей 110 кВ. Традиционно считается, что коммутационные перенапряжения не представляют опасности для изоляции электрических сетей 110 кВ и потому специальных мер по их ограничению не предусматривается [5, 13, 14]. Однако электрические сети, включающие в себя тяговые подстанции системы электроснабжения ЭЖД с тягой на однофазном переменном токе, обладают своей спецификой, связанной с возможностью проявления эффекта «обратной трансформации». Как и ранее покажем это на примере типовой схемы, приведенной на рис.2.

При возникновении короткого замыкания на линии «ПС-1–ТПС–ПС-2» релейная защита дает команду на отключение выключателя В-110-2 на ПС-2. Отключение этого выключателя не приведет к сколько-нибудь значительным коммутационным перенапряжениям, так как длины воздушных линий питания ТПС невелики (в рассматриваемом случае суммарная протяженность ВЛ 110 кВ составляет 60 км) и они присоединяются к мощным подстанциям (ПС-1 и ПС-2). При отключении в дальнейшем выключателя В-110-1 выделяющийся участок сети 110 кВ «ПС-1–ТПС–ПС-2» теряет питание от мощного источника (ПС-1) и, вследствие «обратной трансформации», оказывается запитанным от источника малой мощности (контактная сеть 25 кВ). Если при питании от сети 110 кВ при однофазном к.з. напряжения на здоровых фазах ВЛ 110 кВ в сети с заземленной нейтралью не превосходят кратности 1,4 (реально – заметно меньше), то при питании от контактной сети 25 кВ при режиме работы сети с изолированной нейтралью кратности могут достигать 3,5. В процессе перехода от одного режима (питание от мощного источника при заземленной нейтрали) к другому (питание от маломощного источника при изолированной нейтрали) возникают коммутационные перенапряжения, которые в ряде случаев могут быть опасными для изоляции сетей 110 кВ.

При отключении линейного выключателя В-110-1 наибольшие по величине коммутационные перенапряжения возникают на стороне отключаемой ВЛ 110 кВ и воздействуют на изоляцию «фаза-земля» собственно выключателя В-110-1, а также на фазную изоляцию другого электрооборудования ПС-1, подключенного со стороны линии до В-110-1 (конденсаторы связи, линейные разъединители, заземлители и т.п.). Дело в том, что этот конец ВЛ 110 кВ (и присоединенное к нему оборудование) является наиболее удаленным от

маломощного источника (ТПС), питающего за счет «обратной трансформации» выделившийся участок сети 110 кВ, и, кроме того, наиболее удаленным от установленных на ТПС защитных аппаратов (нелинейных ограничителей или вентильных разрядников).

Параметры возникающих коммутационных перенапряжений с учетом возникающих квазистационарных перенапряжений таковы, что существует высокая вероятность повреждения установленных на ТПС защитных ОПН.

Решением проблемы высоких коммутационных перенапряжений, как и ранее проблемы квазистационарных перенапряжений, является отключение на стороне 27,5 кВ силового трансформатора ТПС от контактной сети до момента отключения от сети 110 кВ последнего мощного источника, т.е. до момента отключения В-110-1 на ПС-1 в рассмотренном примере. В противном случае следует ожидать выхода из строя подстанционного оборудования, что уже происходило на практике. Например, установлено, что эффект «обратной трансформации» стал причиной повреждения:

- элегазового выключателя в ОРУ 110 кВ на ПС «Киндери» Казанских электрических сетей АО «Татэнерго»;
- ОПН 110 кВ на тяговой подстанции ТП-84 «Сумский посад» Кемской дистанции Октябрьской Железной дороги (филиал ОАО «РЖД»);
- бытовой техники 0,22 кВ большого числа потребителей, питаемых от трехобмоточных трансформаторов 110/35/27,5 кВ (далее через трансформаторы 35/10 кВ и 10/0,4 кВ), установленных на ТПС 27,5 кВ «Навля», которая присоединена к ВЛ 110 кВ «Брянская-Центральная» в «Брянскэнерго».

Вполне возможно, что эффект «обратной трансформации» становился причиной повреждений и в других случаях.

#### **4. Заключение**

Исследования, результаты которых кратко изложены выше, позволили с новых позиций обосновать необходимость проявления повышенного внимания к вопросам электроснабжения электрифицированных железных дорог от высоковольтных сетей общего назначения и сделать ряд важных выводов.

1. В типовых схемах питания тяговых подстанций переменного тока 25 кВ от воздушных линий 110-220 кВ в случае возникновения короткого замыкания на питающих воздушных линиях с их последующим отключением выделяется участок сети с изолированной нейтралью, что является нарушением требований ПУЭ [5].
2. Наличие присоединенного к ТПС выделенного участка питающей сети с изолированной нейтралью при определенных обстоятельствах приводит к «обратной трансформации» на него напряжения из контактной сети 25 кВ, что вызывает в ряде случаев опасные для изоляции оборудования квазистационарные и коммутационные перенапряжения.



3. Для снижения риска или исключения повреждений оборудования в схемах питания тяговых подстанций переменного тока 25 кВ от воздушных линий 110-220 кВ рекомендуется:

- по возможности заземлять нейтрали силовых трансформаторов на ТПС;
- заменить вентильные разрядники на нелинейные ограничители перенапряжений с повышенным наибольшим рабочим напряжением и удельной поглощаемой энергией; например, в условиях ПС «Сумпосад» при однофазных коротких замыканиях на Л-160 повреждений ОПН 110 кВ можно было бы избежать, если бы его наибольшее рабочее напряжение составляло 88 кВ, а удельная поглощаемая энергия одного импульса составляла 2.5-3.0 кДж/кВ;
- обеспечить координацию действий релейных защит электрических сетей общего назначения и системы электроснабжения электрифицированных железных дорог;
- при коротком замыкании в питающей сети отключать рабочий трансформатор ТПС от тяговой сети 25 кВ (например, выключателем на стороне 27,5 кВ) до выделения изолированного участка питающей сети;
- основываясь на результатах расчетов и опыте эксплуатации тяговых подстанций, выявить признаки наиболее опасных аварийных режимов, с использованием которых разработать новую микропроцессорную релейную защиту [12], которая сменит (или дополнит) малоэффективную защиту минимального напряжения.

Перечисленные меры обладают различной эффективностью и простотой реализации и, поэтому, требуют обсуждения с привлечением широкого круга специалистов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ЦЭ-462 Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации (Утверждены МПС РФ 04.06.1997г.) – М.: Интекст, 1997.
2. ЦЭ-868 Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (Утверждены 11.12.2001 г. МПС РФ)
3. СТН ЦЭ 141-99 Нормы проектирования контактной сети (взамен ВСН 141-90). – Утверждены и введены в действие 26.04.2001 г. – М.: «Трансиздат», 2001.
4. ЦРБ-756 Правила технической эксплуатации железных дорог Российской федерации. (С изменениями и дополнениями) – М.: Изд-во «Трансинфо», 2002.
5. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. (ПУЭ-7). – М.: 2004.
6. Правила технической эксплуатации электростанций и сетей РФ. (Утв. Приказом по Минэнерго РФ от 19.06.2003 г № 229, введены в действие с 30.06.2003 г.) – М.: Изд-во «Энергосервис», 2003 г.
7. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. (Утв. Приказом по Минэнерго от 13.01.2003 г № 6, введены в действие с 01.07.2003 г.) – М.: Изд-во «Энергосервис», 2003 г.
8. Афанасьев А.И., Дмитриев М.В. и др. Эффект «обратной трансформации» и внутренние перенапряжения в электрических сетях, включающих в себя тяговые подстанции // «Энергетик», №12, 2006.

9. 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.
10. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – 4-е изд., перераб. и дополн. / Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт,1982.
11. Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов И.Г. Тяговые подстанции / Учебник для вузов ж.-д. трансп. – М.: Транспорт, 1986.
12. Защита от подпитки коротких замыканий на «высокой» стороне понижающего трансформатора со стороны тяговой сети/А.Кондаков, А.Мизинцев, А.Бурьяноватый, С.Рогач//РЖД-Партнер. №3(31). 2001. С.30-35.
13. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. – Л.: Энергия, 1979.
14. РД 153-34.3-35.125-99 Руководства по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. – 2-е изд. – СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.