

Ю. Л. САЕНКО (ГВУЗ «ПГТУ»), А. С. ПОПОВ (ПАО «ДОНБАССЭНЕРГО», СБТЭС)

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская 7, г. Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Публичное акционерное общество «Донбассэнерго», Старобешевская тепловая электрическая станция, ул. Станционная 1, пгт. Новый Свет, Старобешевский район, Донецкая обл., Украина, 87230, тел.: (06253) 7-22-78, e-mail: artempopov9@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-1131-0568

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТУРЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС

Постановка проблемы

Основная доля потребителей собственных нужд тепловых электростанций (ТЭС) представляет собой асинхронные двигатели напряжением 6(10) кВ с короткозамкнутым ротором. Доля синхронных двигателей незначительна, в основном они используются в качестве приводных механизмов мельниц. Типовая схема питания сети собственных нужд блочных ТЭС с мощностью трансформатора собственных нужд 25-63 МВА приведена на рис. 1, что соответствует единичной мощности генераторов 200-1200 МВт [1].

При наличии генераторного выключателя пуск агрегатов собственных нужд при запуске энергоблока осуществляется от трансформатора собственных нужд ($T_{\text{раб}}$). В противном случае запуск агрегатов осуществляется от пускорезервного трансформатора ($T_{\text{рез}}$). Наличие расщепленной обмотки у трансформаторов собственных нужд (ТСН) существенно повышает эксплуатационную надежность, поскольку при коротких замыканиях на одной секции напряжение на другой снижается не более чем на 10%, что практически исключает опрокидывание двигателей [1].

При расщепленной обмотке ТСН секции LO1 и LO2 электрически не связаны. Токи однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) в данных сетях зачастую не превышают 10 А. Исключения составляют сети, от которых питаются удаленные распределительные пункты багерных или компрессорных станций, что в итоге может увеличить ток ОЗЗ на 5-7 А. Величина тока ОЗЗ будет выше в случае использования ТСН без расщепленной обмотки, поскольку в таком случае секции LO1 и LO2 будут гальванически связаны между собой.

Нейтраль сети собственных нужд ТЭС зачастую изолирована. Согласно правил устройства электроустановок защита от ОЗЗ действует на отключение электродвигателей мощностью 2 МВт и выше при токе ОЗЗ 5 А и более, а также

на электродвигателях меньшей мощности при токах ОЗЗ более 10 А. На практике зачастую защиту на отключение выполняют при токе ОЗЗ выше 5 А, что позволяет существенно снизить разрушающее воздействие замыкания на двигатель и минимизировать объемы разрушений.

Опыт эксплуатации данных сетей показал, что наименьшую электрическую прочность имеют высоковольтные двигатели, повреждение которых чаще всего начинается с повреждения изоляции одной фазы на землю, т.е. с ОЗЗ.

Особую опасность представляют неустойчивые замыкания, при которых дуга попеременно загорается и гаснет. В такой ситуации емкость нулевой последовательности сети попеременно разряжается и дозаряжается, возникающие при этом переходные процессы, накладываясь на ЭДС источника питания, создают опасные дуговые перенапряжения. Для повышения эксплуатационной надежности сетей собственных нужд следует иметь представление о длительности и кратности дуговых перенапряжений, а также решить вопрос согласования этих перенапряжений с уровнем изоляции сети.

Анализ последних исследований и публикаций

На сегодняшний день математическое моделирование переходных процессов достаточно распространено, поэтому в существующей научно-технической литературе данному вопросу посвящено значительное количество публикаций. Работы авторов [2] посвящены исследованию процессов дуговых ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Результаты исследований показывают, что кратность дуговых перенапряжений при изолированной нейтрали может составлять $3,5U_{\text{ф}}$ и выше. Применение резистивной нейтрали позволяет существенно снизить дуговые перенапряжения до безопасной величины $2-2,2U_{\text{ф}}$.

© Саенко Ю. Л., Попов А. С., 2015

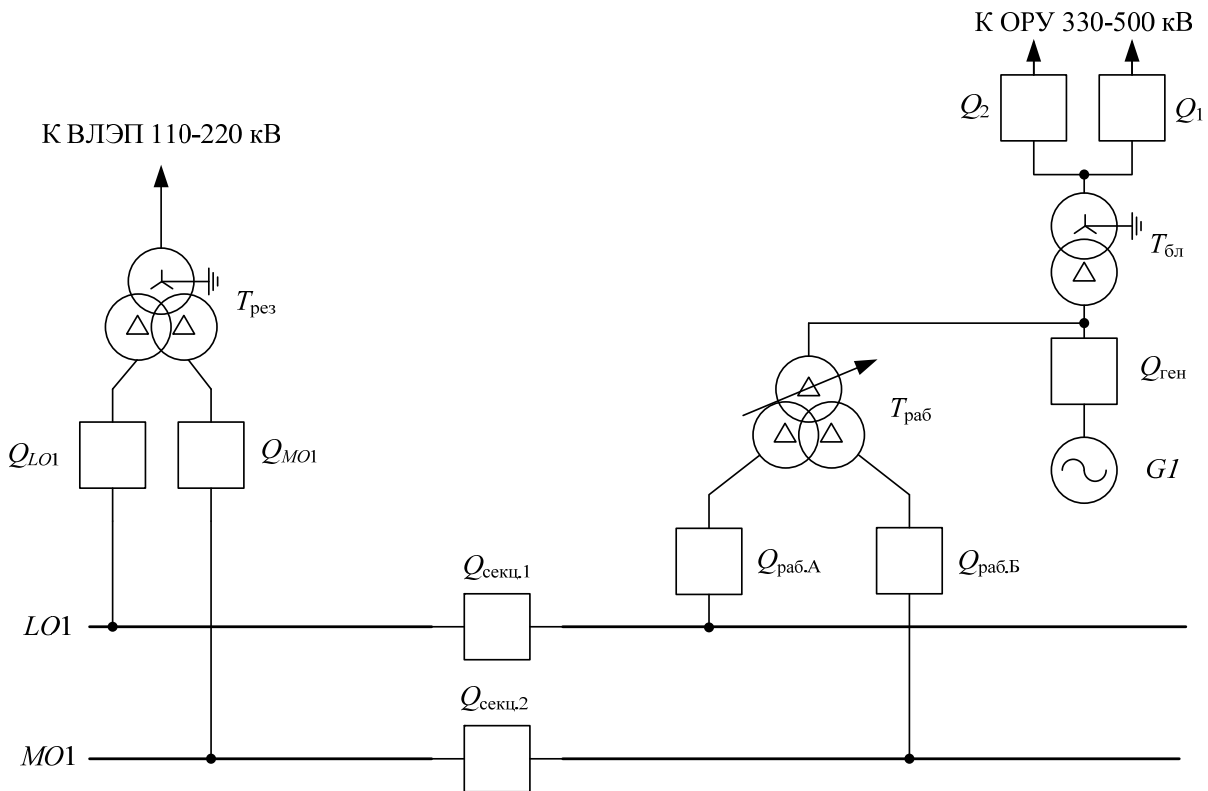


Рис. 1. Схема питания сети собственных нужд ТЭС

В работах авторов [3] исследованы феррорезонансные перенапряжения в контуре нулевой последовательности сетей с изолированной нейтралью. Согласно данным математического моделирования кратности феррорезонансных перенапряжений могут составлять $2U_\phi$ и выше, что с учетом длительности данных процессов представляет серьезную угрозу для изоляции сети. Особую опасность представляют субгармонические феррорезонансные процессы (ФРП), при которых возможны массовые выходы из строя ТНКИ и ложная работа защит от ОЗЗ.

На сегодняшний день развито научное направление, объединяющее математическое моделирование переходных процессов и совершенствование алгоритмов работы устройств релейной защиты. В работах [4, 5] результаты математического моделирования использованы для обучения и тестирования устройств релейной защиты, а также для выявления режимов, в которых защиты действует некорректно. При комплексном подходе к подобному способу тестирования устройств релейной защиты в математической модели должны быть корректно учтены параметры измерительных трансформаторов тока и напряжения [6]. Особое внимание следует уделить частотным характеристикам измерительных трансформаторов [7]. Поскольку переходные процессы в контуре нулевой последовательности развиваются в частотном

диапазоне единицы-десятки кГц, поэтому проявление нелинейностей в частотных характеристиках может оказать существенное влияние на работу релейной защиты.

Не смотря на значительное число публикаций в данной области существующим математическим моделям присущи некоторые недостатки, снижающие точность и достоверность полученных результатов. К таким относятся неточный учет нелинейных свойств трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), а именно определение вебер-амперной характеристики расчетным путем; пренебрежение случайным характером заземляющей дуги, неучет места замыкания по длине кабеля и др.

Цель

Целью статьи является математическое моделирование переходных процессов в сети с изолированной нейтралью с учетом экспериментально определенных параметров ТНКИ, случайного характера заземляющей дуги, а также исследование поведения направленной защиты от ОЗЗ при дуговых замыканиях на землю.

Изложение основного материала

Моделирование переходных процессов в контуре нулевой последовательности позволяет определить уровень перенапряжений в зависимости от места ОЗЗ, оценить влияние таких

факторов как параметры сети, место замыкания на землю, режим горения дуги на кратности перенапряжений без прибегания к мониторингу переходных процессов в действующей сети. В данной работе моделирование выполнено в среде MATLAB/Simulink, в качестве исходной схемы выбрана сеть 6 кВ с изолированной нейтралью и трансформаторами напряжения контроля изоляции типа НТМИ-6-66.

Схема замещения сети приведена на рис. 2. Система представлена тремя симметричными источниками ЭДС за активным сопротивлением и индуктивностью источника $R_{ист}$ и $L_{ист}$; ТНКИ активным сопротивлением обмотки высокого напряжения (ВН) $R_{вн}$ и результирующей нелинейной индуктивностью намагничивания $L_{\mu}(i)$; кабельная линия учтена серией последовательных Т-образных звеньев, что необходимо для приближенного учета распределенности параметров и места ОЗЗ; ключ K и линейное сопротивление R_d моделируют перемежающуюся дугу.

Вебер-амперная характеристика ТНКИ определена экспериментально путем разряда конденсатора на основную вторичную обмотку трансформатора [8]. Полученная кривая намагничивания приведена на рис. 3.

Точный учет нелинейных свойств ТНКИ весьма важен при исследовании переходных процессов в контуре нулевой последовательности. Во-первых, это позволяет исследовать ФРП и эффективность мер их гашения. Во-вторых, при повышении фазных напряжений проводимость ТНКИ существенно увеличивается, поэтому при дуговых перенапряжениях свободные заряды стекают через заземленные обмотки ВН измери-

тельных трансформаторов, тем самым снижая перенапряжения. Неучет данных нелинейных проводимостей приводит к завышенным кратностям дуговых перенапряжений при расчетах.

Учет линии электропередачи цепочкой Т-образных участков позволяет учесть место замыкания (начало или конец кабеля, ОЗЗ в двигателе и т.д.), что также во многом определяет кратности дуговых перенапряжений. При значительной удаленности места ОЗЗ от источника питания активное сопротивление в цепи источник – место повреждения демпфирует переходные процессы ОЗЗ, поэтому результирующие кратности перенапряжений снижаются. При некотором критическом активном сопротивлении в цепи ОЗЗ переходный процесс дугового замыкания может иметь апериодический характер, кратности перенапряжения в этом случае будут минимальными. Поскольку частота свободных составляющих при дуговых ОЗЗ колеблется в диапазоне от единиц до десятков кГц, дополнительный демпфирующий эффект на перенапряжения обусловлен поверхностным эффектом в линии и увеличением ее активного сопротивления [9].

Рассмотрим особенности возбуждения и протекания ФРП. Толчком к возникновению феррорезонанса служит появление различного рода несимметрии в контуре нулевой последовательности. К таковым относят ОЗЗ и однофазные дуговые замыкания (ОДЗ), включение или отключение участка сети, включение ТНКИ, включение ненагруженных шин с ТНКИ, внешнее перенапряжение.

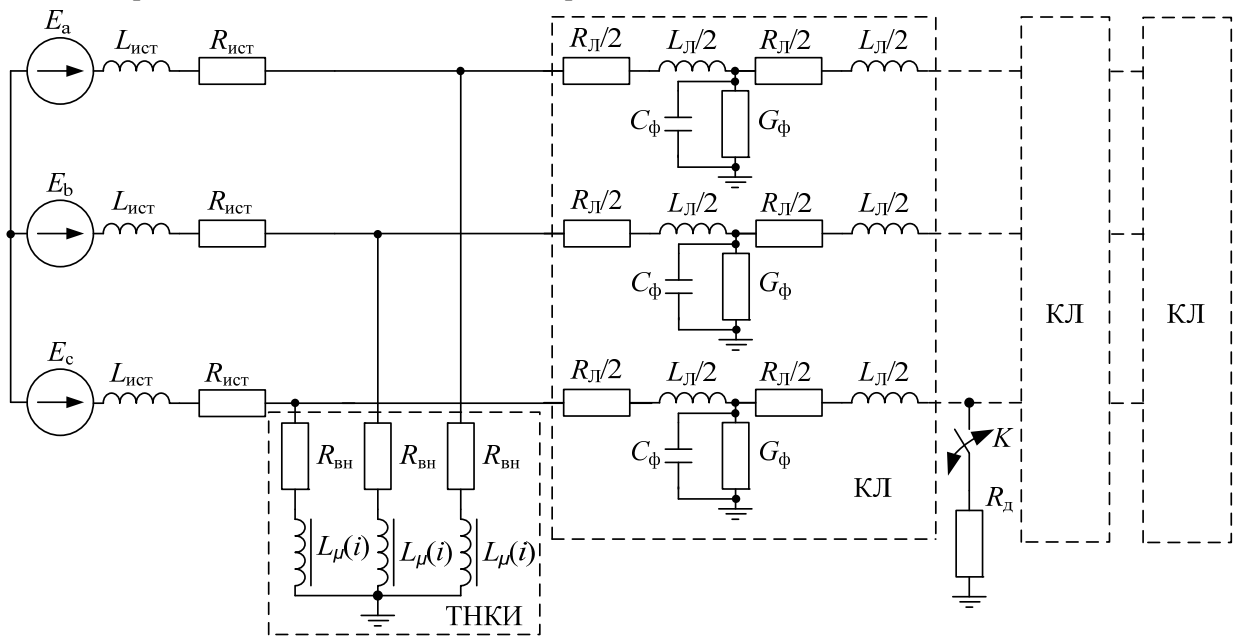


Рис. 2. Схема замещения исследуемой сети

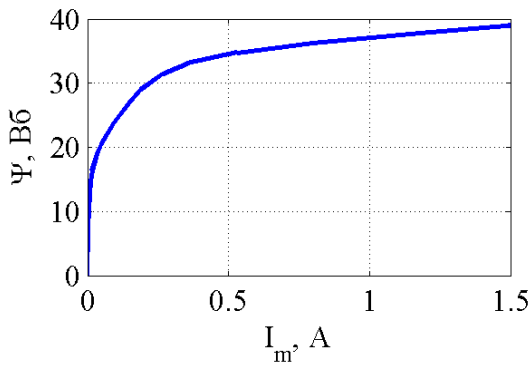


Рис. 3. Вебер-амперная характеристика ТН типа НТМИ-6

Все вышеперечисленные режимы приводят к появлению напряжения смещения нейтрали и избыточного заряда на емкости нулевой последовательности сети. С момента исчезновения несимметрии в контуре нулевой последовательности сети (например, после самоустранения ОЗЗ) возникает процесс разряда емкости сети через активную проводимость изоляции сети на землю и заземленные обмотки ВН ТНКИ. Пример незатухающего обмена энергией между емкостью нулевой последовательности сети и нелинейной индуктивностью ТНКИ приведен на рис. 4, на котором изображены расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН ТНКИ для случая самоустранения дугового замыкания на землю. Данный случай относится к субгармоническому ФРП на частоте 25 Гц и является наиболее распространенным [3].

Опасность длительного субгармонического ФРП заключается в воздействии перенапряжений на изоляцию сети (кратность порядка $1,8 U_{\phi}$), а также протекании сверхтоков в обмотке ВН ТНКИ и последующем его повреждении.

Расчеты показали, что область устойчивого субгармонического ФРП при одном ТНКИ типа НТМИ-6 заключена в диапазоне изменения фазной емкости сети 0,085-0,62 мкФ, что соответствует емкостному току ОЗЗ 0,27-2 А. Увеличение числа параллельно работающих ТНКИ пропорционально расширяет область существования феррорезонанса, поэтому при проектировании следует использовать трансформаторы напряжения с заземленной обмоткой ВН только при необходимости. На рис. 5 приведена зависимость области существования устойчивого субгармонического феррорезонанса от количества параллельно работающих ТНКИ.

Стоит отметить, что развитие ФРП также возможно на промышленной частоте и на высших гармонических составляющих [10]. Данные случаи наиболее характерны для сети с суммарной фазной емкостью на землю 0,08 мкФ и менее, что соответствует емкости ненагруженных шин и оборудования или непротяженной воздушной сети. Кратность феррорезонансных перенапряжений при этом оказывается выше, чем при субгармонических ФРП. В тоже время условия гашения такого феррорезонанса оказываются более легкими, поскольку активная мощность, которую следует ввести в контур нулевой последовательности для срыва колебаний, оказывается ниже, чем для случая субгармонического ФРП [10].

На рис. 6 приведены расчетные кривые фазных напряжений при включении ненагруженной секции шин с ТНКИ. Суммарная фазная емкость сети составила 0,08 мкФ. ФРП развивается на частоте 150 Гц, действующие значения токов в обмотке ВН ТНКИ не при этом превышают 50 мА, что не представляет опасности для ТНКИ.

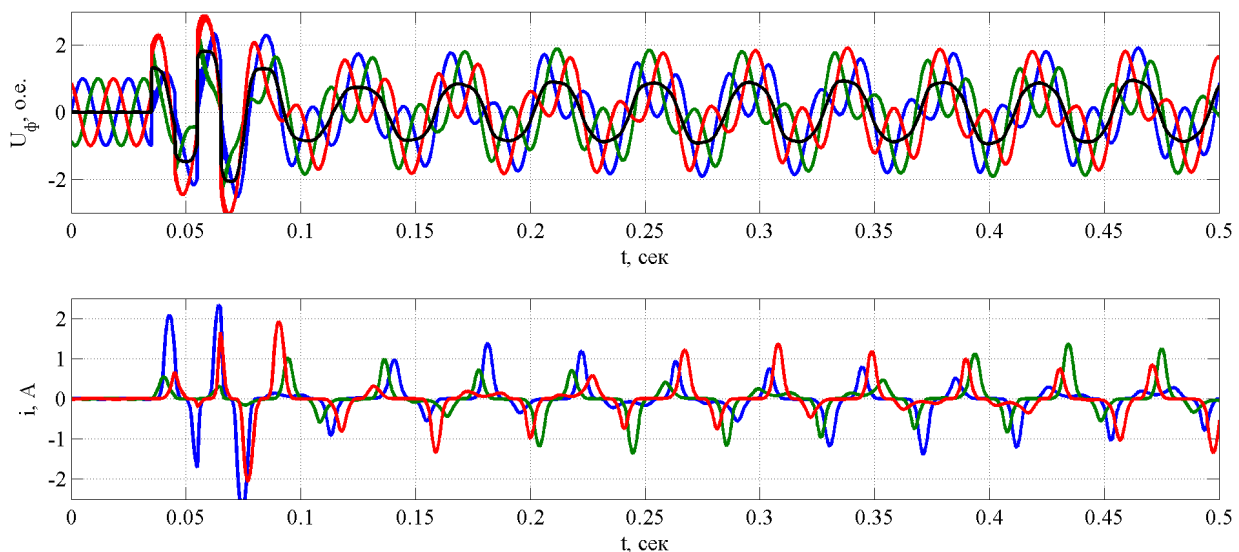


Рис. 4. Расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН ТНКИ при ФРП, возникшем в результате самоустранения ОЗЗ

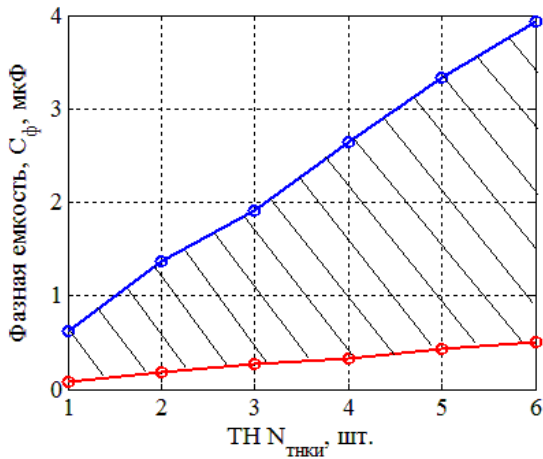


Рис. 5. Название рисунка

Как видно из результатов, кратности перенапряжений в этом случае составляют $2,36U_{\phi}$. Стоит отметить, что при моделировании неучтена вторичная нагрузка ТНКИ, которая оказывает демпфирующий эффект на ФРП. Это в первую очередь относится к феррорезонансам, развивающимся на частотах 50 Гц и выше. При нагрузке 100 ВА и более феррорезонансы на частотах 50 Гц и выше становятся затухающими. Опасность ФРП для сетей собственных нужд поясняется тем, что ложное напряжение нулевой последовательности заставляет оперативный персонал выполнять поочередные отключения фидеров 6 кВ с целью определения поврежденного присоединения. Распространены случаи, когда отключение одного из фидеров приводит к нарушению феррорезонансных условий и исчезновению напряжения нулевой последовательности. В результате данное присоединение ложно считается поврежденным. Также известны случаи ложной работы направленных и ненаправленных защит от ОЗЗ при существовании ФРП.

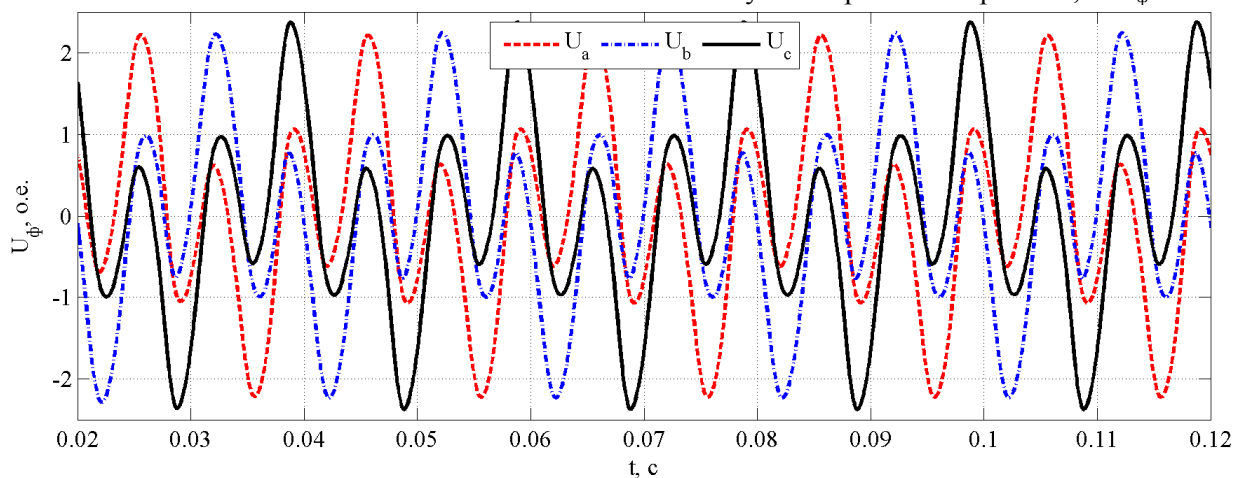


Рис. 6. Расчетные кривые фазных напряжений при ФРП на частоте 150 Гц, возникшем при включении ненагруженных шин с ТНКИ

Рассмотрим особенности протекания процессов ОДЗ в сетях собственных нужд ТЭС. Как было отмечено выше, токи ОЗЗ в таких сетях зачастую не превышают 10 А. Процесс ОЗЗ чаще всего начинается с неустойчивого, так называемого дугового замыкания. В процессе загорания погасания дуги в контуре нулевой последовательности возникают переходные процессы заряда разряда емкости сети, которые накладываясь на ЭДС источника питания, формируют результирующие перенапряжения.

Анализ опытных осциллограмм процессов ОДЗ в сети с изолированной нейтралью и кабелями с ПВХ изоляцией показал, что гашение тока ОЗЗ происходит при третьем, реже при втором переходе высокочастотной составляющей тока нулевой последовательности через ноль. Напряжение пробоя изменяется случайным образом, причем, чем оно выше, тем выше кратность дуговых перенапряжений. В разработанной математической модели стохастическое поведение заземляющей дуги учтено случайным изменением напряжения пробоя, закон распределения которого принят нормальным.

На рис. 7 приведена расчетная кривая фазных напряжений и тока ОЗЗ при ОДЗ. Параметры закона распределения напряжения пробоя: математическое ожидание напряжения пробоя $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$, среднеквадратическое отклонение напряжения пробоя $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$. Пробои происходят один раз за полупериод. Расчет переходных процессов при вариации параметров закона распределения напряжения пробоя показал, что результирующие кратности перенапряжения при прочих неизменных параметрах сети пропорциональны напряжению пробоя. Максимальные кратности перенапряжений, полученные при моделировании, составили $3,2U_{\phi}$, и соответствуют напряжению пробоя $1,52 U_{\phi}$.

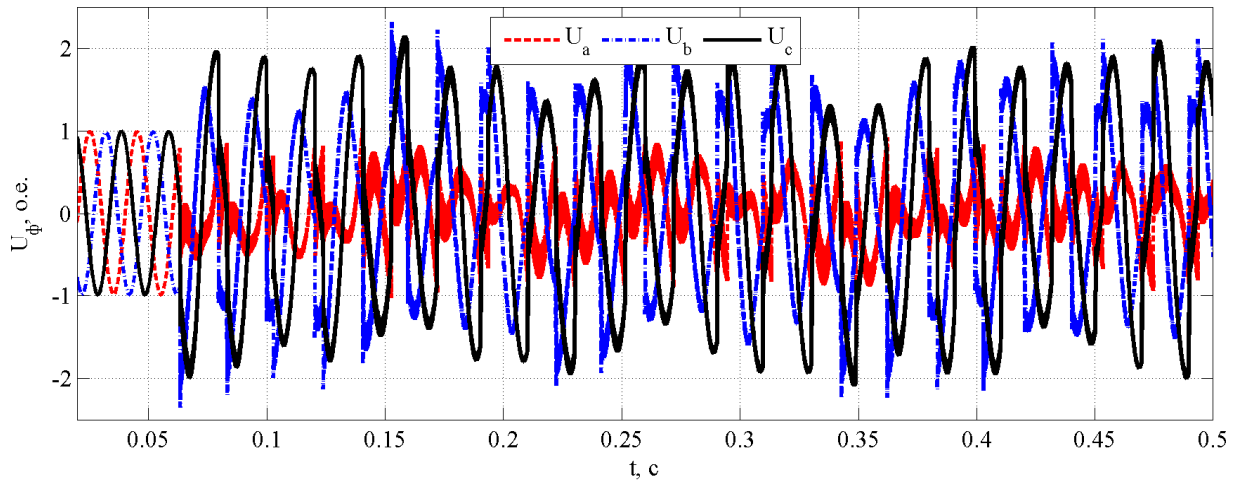


Рис. 7. Расчетные кривые фазных напряжений при ОДЗ с учетом случайного изменения напряжения пробоя

Кратности перенапряжений оказываются тем ниже, чем выше активное сопротивление в цепи от источника до места ОЗЗ и хуже состояние изоляции сети (выше активная проводимость сети на землю G_{ϕ}).

На рис. 8 приведена эмпирическая плотность распределения вероятностей (а) и функция распределения вероятностей (б) кратности перенапряжений при $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$ и $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$. Как видно из результатов, закон распределения кратности перенапряжений также оказывается нормальным. При этом с вероятностью 95% кратность перенапряжений не превысит $2,23U_{\phi}$.

На рис. 9 приведена опытная осциллограмма тока нулевой последовательности при перемежающемся ОДЗ в сети собственных нужд ТЭС, которое перешло в междуфазное короткое замыкание с последующим повреждением и отключением двигателя.

Для защиты от перемежающихся ОДЗ разработан специальный вид защиты INTRPTEF1 (шифр по стандарту МЭК 61850). Однако не все терминалы обладают данной защитой. Классическая токовая ненаправленная защита не почувствовала неустойчивое замыкание (см. рис. 9), что привело к повреждению двигателя. Рассмотрим поведение направленной защиты от ОЗЗ DEFxPDEF терминала фирмы АВВ серии REM 615 при перемежающемся ОДЗ. Как известно, ток нулевой последовательности поврежденного присоединения при ОЗЗ течет от шин к кабелю, ток нулевой последовательности неповрежденного фидера течет от кабеля к шинам. На этом признаке построен алгоритм определения поврежденного присоединения. Из всех существующих алгоритмов измерения тока и напряжения нулевой последовательности для направленной защиты от ОЗЗ рекомендуется применять режим Фурье.

На рис. 10 (а) приведены расчетные кривые фазных углов напряжения нулевой последовательности и токов нулевой последовательности поврежденного и неповрежденных фидеров при перемежающемся ОДЗ (присоединение 3 является поврежденным). На рис. 10 (б) приведена векторная диаграмма, соответствующая рис. 10 (а), при этом значения амплитуд и фаз получены как средние значения на расчетном интервале 1 с.

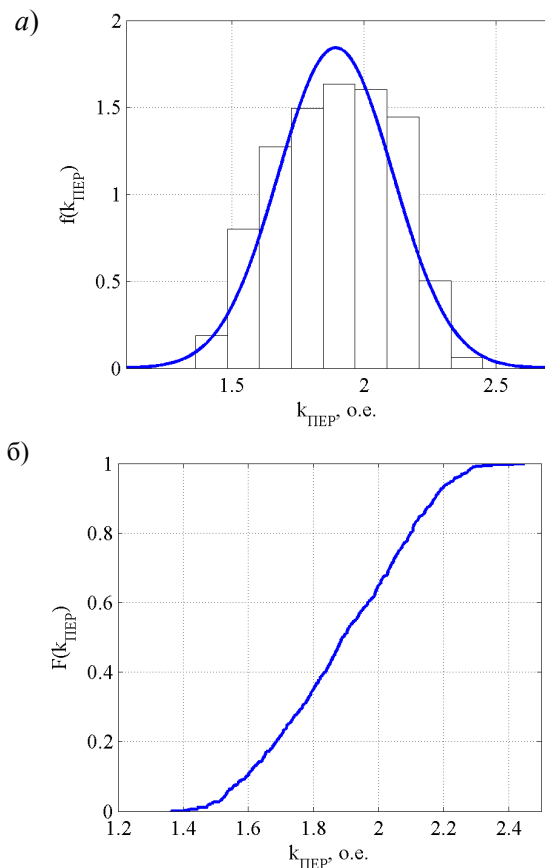


Рис. 8. Плотность распределения вероятностей (а) и функция распределения вероятностей (б) кратностей перенапряжений при ОДЗ с параметрами $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$ и $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$

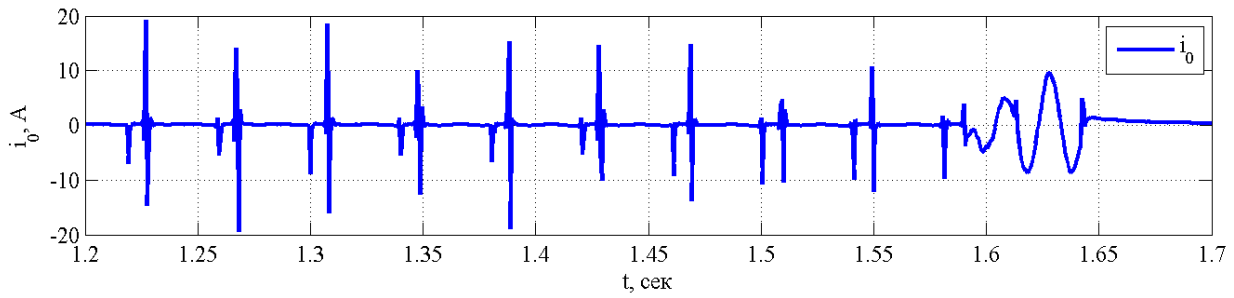


Рис. 9. Опытная осциллограмма тока нулевой последовательности при перемежающемся ОДЗ, перешедшем в междуфазное короткое замыкание

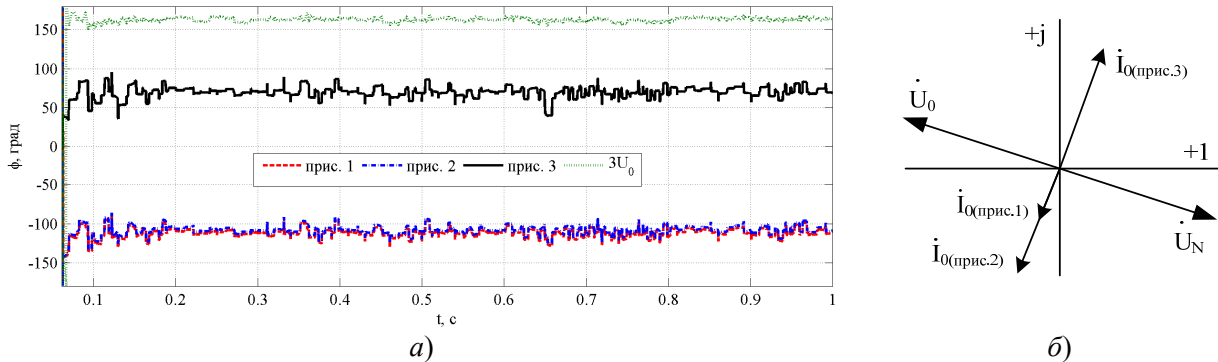


Рис. 10. Временные диаграммы изменения фаз напряжения и токов нулевой последовательности поврежденно-го и неповрежденных присоединений при ОДЗ (а), а также векторная диаграмма для данного случая (б)

Как следует из результатов, на всем интервале перемежающегося ОДЗ ток нулевой последовательности поврежденного фидера отстает от напряжения нулевой последовательности, в то время как токи нулевой последовательности неповрежденных фидеров опережают напряжение нулевой последовательности.

Таким образом, при корректной настройке направленной защиты от ОЗЗ она может эффективно работать при неустойчивых замыканиях. При этом стоит отметить, что при моделировании трансформаторы тока нулевой последовательности и ТНКИ приняты идеальными, в реальности же вносимые ими искажения могут привести к некорректной работе защиты. Поэтому в качестве перспективного направления дальнейших исследований в данной области следует считать исследование динамических режимов функционирования устройств релейной защиты с учетом нелинейных свойств измерительных трансформаторов.

Выводы

1. В сетях собственных нужд ТЭС развитию аварийной ситуации зачастую предшествует появлению несимметрии в контуре нулевой последовательности. К таковым относится появление феррорезонансных явлений и процессов

ОДЗ. Расчеты показали, что область существования устойчивого феррорезонанса пропорциональна количеству параллельно работающих ТНКИ, причем на один трансформатор приходится фазная емкость 0,085-0,62 мкФ, что соответствует емкостному току ОЗЗ 0,27-2 А.

2. Исследования с учетом случайного характера заземляющей дуги показали, что кратность дуговых перенапряжений в значительной мере определяется напряжением пробоя, причем чем выше $U_{пр}$, тем выше перенапряжения. При нормальном законе распределения напряжения пробоя кратность дуговых перенапряжений также нормально распределена. Значительное демпфирующее влияние на кратности перенапряжений оказывает активное сопротивление в цепи от источника питания до места ОЗЗ, поэтому при значительной удаленности места ОЗЗ от источника кратность дуговых перенапряжений может не превышать $2U_{ф}$.

3. Результаты математического моделирования переходных процессов могут быть использованы для оценки корректности работы устройств релейной защиты на стадии их разработки без применения натуральных экспериментов. Данное направление открывает широкие перспективы для совершенствования алгоритмов работы устройств релейной защиты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абасова Э. М. Собственные нужды тепловых электростанций / Э. М. Абасова, Ю. М. Голоднов, В. А. Зильберман, А. Г. Мурзаков. М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 272 с.
2. Сивокобыленко В. Ф. Анализ процессов дуговых замыканий на землю в сетях собственных нужд ТЭС и АЭС / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, Махинда Сильва // 36. наук. пр. ДонДТУ, Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонДТУ. – 2000. – Випуск 17. – С. 129 – 133.
3. Журахівський А. В. Ферорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги / А. В. Журахівський, Ю. А. Кенс, А. Я. Яцейко, Р. Я. Масляк // Технічна електродинаміка. – 2010. – №2. – С. 73 – 77.
4. Kezunovic M. Modeling, developing and testing protective relays using MATLAB, programmable relays and digital simulators / M. Kezunovic, B. Kasztenny, Z. Galijasevic // Third International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS). Vasteras, Sweden. – 1999. – pp. 1 – 6.
5. Kezunovic M. User-friendly, open-system software for teaching protective relaying application and design concepts / M. Kezunovic // IEEE Transactions on Power Systems. – No. 3. – 2003. – pp. 986 – 992.
6. Tziouvaras D. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers / D. Tziouvaras, McLaren, P. Alexander, G. Dawson // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 15, Jan. – No. 1. – 2000. – pp. 62 – 72.
7. Eming L. On-line identification of frequency response of current transformers using a correlation method / L. Eming, J.M.K. MacAlpine, L. Yanbing // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Hong Kong, China. – 1997. – pp. 2701 – 2704.
8. Саенко Ю.Л. Математические аспекты выбора емкости конденсатора для определения вебер-амперной характеристики измерительных трансформаторов напряжения / Ю.Л. Саенко, А.С. Попов // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. Збірник наукових праць. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2011. – №2 (23). – С. 253 – 258.
9. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М.: Энергия. – 1971. – 152 с.
10. Саенко Ю. Л. Определение условий гашения феррорезонансных колебаний в сетях с изолированной нейтралью / Ю. Л. Саенко, А. С. Попов // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2014. – №1(84). – С. 15 – 22.

Поступила в печать 21.05.2015.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

© Саенко Ю. Л., Попов А. С., 2015

REFERENCES

1. Abassova E.M., Golodnov Yu. M., Zilberman V. A., Murzakov A. G. Sobstvennye nuzhdy teplovykh elektrostansiy [Own needs of the thermal power stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 272 p.
2. Sivokobylenko V. F., Lebedev V. K., Mahinda Silva. Analiz protsessov dugovykh zamykaniy na zemlyu v setyah sobstvennykh nuzhd TES i AES [Analysis of the processes arc earth fault in the networks own needs TPP and NPP]. Zbirnyk naukovykh prats DonNTU, Serii «Elektrotehnika i energetyka» [Collection of scientific papers DonNTU, series "Electrical and Power Engineering"], 2000, No. 17, pp. 129 – 133.
3. Zhurakhivskiy A. V., Kens Yu. A., Yatseyko A. Ya., Masliak R. Ya. Ferorezonansni protsesy v elektychnykh merezhakh z riznotypnyimi trasformatoramy naprugy [Ferroresonance processes in electrical networks 10 kV with different types of voltage transformers]. Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamic], 2010, No. 2. pp. 73 – 77.
4. Kezunovic M. Kasztenny B., Galijasevic Z. Modeling, developing and testing protective relays using MATLAB, programmable relays and digital simulators. Third International Conference on Digital Power System Simulators (ICDS). Vasteras, Sweden, 1999, pp. 1 – 6.
5. Kezunovic M. User-friendly, open-system software for teaching protective relaying application and design concepts. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, No. 3, pp. 986 – 992.
6. Tziouvaras D., McLaren, Alexander P., Dawson G. Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, Vol. 15, No. 1. pp. 62 – 72.
7. Eming L. MacAlpine J.M.K., Yanbing L. On-line identification of frequency response of current transformers using a correlation method. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Hong Kong, China, 1997, pp. 2701 – 2704.
8. Sayenko Yu. L., Popov A. S. Matematicheskie aspekty vybora emkosti kondensatora dlya opredeleniya veber-ampernoj kharakteristiki izmeritelnykh transformatorov napryazheniya [Mathematical aspects of choosing the capacity for determination saturation characteristic of measuring voltage transformers]. Visnyk Pryazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. Zbirnyk naukovykh prats [Collection of scientific papers "Pryazovskiy State Technical University", series "Technical science"], 2011, No. 2, pp. 253 – 258.
9. Lihachov F. A. Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytralyu i kompensatsiey emkostnykh tokov [Earth faults in networks with insulated neutral and capacitive current compensation]. Moscow, Energiya Publ., 1971, 152 p.
10. Sayenko Yu. L., Popov A. S. Opredelenie usloviy gasheniya ferorezonansnykh kolebaniy v setyakh s izolirovannoy neytralyu [Determination the conditions of damping the ferroresonance oscillations in networks with insulated neutral point]. Visnyk Kremenchutskogo natsionalnogo universytetu imeni Mykhayla Ostrogradskogo [Scientific Journal "Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University"], 2014, No. 1, pp. 15 – 22.

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

Надежность работы сетей собственных нужд тепловых электростанций определяет работоспособность сложного технологического цикла, которым является производство электроэнергии. Аварийное отключение механизмов собственных нужд приводит к снижению мощности, выдаваемой в сеть генераторами, а иногда требует полного сброса нагрузки и отключения генератора. Основными потребителями собственных нужд являются высоковольтные двигатели, повреждение которых чаще всего начинается с возникновения однофазного замыкания на землю.

Целью работы является исследование переходных процессов в контуре нулевой последовательности сетей собственных нужд тепловых электростанций, выявление особенностей протекания данных процессов, факторов, влияющих на результирующие кратности дуговых перенапряжений. Для исследования переходных процессов использована математическая модель, созданная в пакете MATLAB/Simulink. Параметры измерительного трансформатора напряжения (ТН) определены экспериментально.

Результаты исследований показали, что в сетях с током замыкания на землю порядка 5 А возможно возникновение феррорезонансных явлений. Область существования устойчивого феррорезонанса определяется количеством параллельно работающих ТН. При этом на один ТН зона существования субгармонического феррорезонанса соответствует емкости сети 0,085-0,62 мкФ. Исследованы процессы однофазного дугового замыкания с учетом стохастического поведения заземляющей дуги. Доказано, что кратность дуговых перенапряжений пропорциональна напряжению пробоя. При нормальном законе распределения напряжения пробоя кратности перенапряжений также распределены нормально. Исследованы режимы работы микропроцессорной направленной защиты от однофазных замыканий на землю в режиме дугового замыкания. Доказано, что при корректной настройке данной защиты она способна действовать селективно при неустойчивых замыканиях. Перспективным направлением дальнейших теоретических и практических исследований в этой области является экспериментальное определение частотных характеристик измерительных трансформаторов тока и напряжения и исследование переходных процессов с учетом нелинейных свойств измерительных трансформаторов.

Ключевые слова: феррорезонанс; контур нулевой последовательности; однофазное замыкание на землю; стохастическое моделирование; спектральный анализ; функция распределения вероятностей; плотность распределения вероятностей.

УДК 621.311

Ю. Л. САЄНКО (ДВНЗ «ПДТУ»), А. С. ПОПОВ (ПАТ «ДОНБАСЕНЕРГО», СБТЭС)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська 7, м. Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Публічне акціонерне товариство «ДОНБАСЕНЕРГО», Старобешівська теплова електрична станція, вул. Станційна 1, смт. Новий Світ, Старобешевський район, Донецька обл., Україна, 87230, тел.: (06253)7-22-78, e-mail: artempopov9@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-1131-0568

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОНТУРІ НУЛЬОВОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ МЕРЕЖ ВЛАСНИХ ПОТРЕБ ТЕС

Надійність роботи мереж власних потреб теплових электростанцій визначає працездатність складного технологічного циклу, яким є виробництво електроенергії. Аварійне відключення механізмів власних потреб призводить до зниження потужності, що видається в мережу генераторами, а іноді вимагає повного скидання навантаження і відключення генератора. Основними споживачами власних потреб є високовольтні двигуни, пошкодження яких найчастіше починається з виникнення однофазного замикання на землю.

Метою роботи є дослідження перехідних процесів в контурі нульової послідовності мереж власних потреб теплових электростанцій, виявлення особливостей протікання даних процесів, факторів, що впливають на результируючі кратності дугових перенапруг. Для дослідження перехідних процесів використана математична модель, створена в пакеті MATLAB/Simulink. Параметри вимірювального трансформатора напруги (ТН) визначені експериментально.

Результати досліджень показали, що в мережах із струмом замикання на землю близько 5 А можливе виникнення феррорезонансним явищ. Область існування стійкого феррорезонансу визначається кількістю паралельно працюючих ТН. При цьому на один ТН зона існування субгармонійного феррорезонансу відповідає ємності мережі 0,085-0,62 мкФ. Досліджено процеси однофазного дугового замикання з урахуванням стохастичної поведінки заземлюючої дуги. Доведено, що кратність дугових перенапруг пропорційна напрузі пробоя. При нормальному законі розподілу напруги пробоя кратності перенапруг також розподілені нормально. Досліджено режими роботи мікропроцесорного спрямованого захисту від однофазних замикань на землю в режимі дугового замикання. Доведено, що при правильному налаштуванні даного захисту він здатен діяти селективно при нестійких замиканнях. Перспективним напрямом подальших теоретичних та практичних досліджень у цій галузі є експериментальне визначення частотних характеристик вимірювальних трансформаторів струму та напруги і дослідження перехідних процесів з урахуванням нелінійних властивостей вимірювальних трансформаторів.

Ключові слова: феррорезонанс; контур нульової послідовності; однофазне замикання на землю; стохастичне моделювання; спектральний аналіз; функція розподілу ймовірностей; щільність розподілу ймовірностей.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

© Саєнко Ю. Л., Попов А. С., 2015

UDC 621.311

YU. L. SAYENKO (SHEI «PSTU»), A. S. POPOV (PJSK «DONBASENERGO»), SbTPP)

State Higher Educational Institution «Pryazovskyi State Technical University», Universytetska Str. 7, Mariupol, Ukraine, 87500, tel: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9729-4700

Public joint-stock company «DONBASENERGO», Starobeshivska thermal power plant. Stantsiina Str. 1, urban-type settlement Novyi Svit, Starobeshevskiy district, Donetska region, Ukraine, 87230, tel.: (06253) 7-22-78, e-mail: artempopov9@gmail.com, ORCID: orcid.org/0000-0003-1131-0568

NUMERICAL ANALYSIS OF TRANSIENTS IN THE ZERO SEQUENCE CIRCUIT NETWORKS OF AUXILIARY TPP

The reliability of the network's auxiliary of thermal power plants determines the performance of a complex technological cycle, which is the production of electricity. Emergency turning off of mechanisms of auxiliary reduces the power delivered to the network from generators, and it sometimes requires a full load dropping and turning off of the generator. The main consumers of auxiliary are high-voltage engines, whose damage most frequently begins with the appearance of a single-phase earth fault.

The purpose of the article is a study of transients in the zero sequence circuit networks of auxiliary of thermal power plants, revealing the features of the flow of these processes, the factors affecting the resulting arc overvoltages. In order to study transients it is used the mathematical model created in the package MATLAB/Simulink. Parameters of voltage transformer (VT) are determined experimentally.

The results of studies showed that in networks with earth fault current about 5 A it's possible occurrence of ferroresonance phenomenon. The domain of existence of steady ferroresonance depends by the number of parallel working VT. In this case the domain of existence of subharmonic ferroresonance corresponds to the capacity of network 0,085-0,62 μF related to one VT. The processes of single-phase arc fault taking into account the stochastic behavior of the grounding arc were investigated. It is proved that the frequency rate of arc overvoltages is proportional to breakdown voltage. At the Gaussian distribution of breakdown voltage the frequency rate of arc overvoltages are also distributed Gaussian function. The operation modes of the microprocessor directed protection from single-phase ground fault in the arcing fault mode were investigated. It's proved that the correct setting of this protection is able to act selectively in the unstable faults. Long-term direction of further theoretical and practical research in this area is the experimental determination of the frequency characteristics of the measuring current and voltage transformers and research of transients with the nonlinear properties of the measuring transformers.

Keywords: ferroresonance; the circuit of zero sequence; single phase ground fault; stochastic modeling; spectral analysis; the probability distribution function; probability density function.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*