

ЕЛЕКТРОТЕХНИКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.4

Саенко Ю. Л.¹, Попов А. С.²

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ГОРЕНИЯ ДУГИ НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ

В статье рассмотрено влияние характера горения дуги на повреждаемость трансформаторов напряжения контроля изоляции. Показано, что при несимметричной дуге имеет место подмагничивание сердечника постоянным током, что является причиной повреждения трансформатора напряжения.

Ключевые слова: трансформатор напряжения, перенапряжение, дуговое замыкание, спектральный анализ, подмагничивание, кривая намагничивания.

Саенко Ю.Л. Попов А.С. Вплив характеру горіння дуги на пошкоджувальність трансформаторів напруги контролю ізоляції. У статті розглянуто вплив характеру горіння дуги на пошкоджувальність трансформаторів напруги контролю ізоляції. Показано, що за несиметричної дуги має місце підмагнічування осердя постійним струмом, що є причиною пошкодження трансформатора напруги.

Ключові слова: трансформатор напруги, перенапруга, дугове замикання, спектральний аналіз, підмагнічування, крива намагнічення.

Y.L. Sayenko, A.S. Popov. Influence of character of arc burning upon failure rate of voltage transformer used for insulation control. The influence of arc burning upon failure rate of transformers, used for control of insulation. It was shown that at asymmetrical arc there happens to be magnetic bias on the rod by direct current, this causing failure of voltage transformers

Keywords: voltage transformer, overvoltage, arcing fault, spectral analysis, magnetization, magnetization curve.

Постановка проблемы и анализ последних публикаций. В настоящее время достаточно остро стоит проблема высокой повреждаемости трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ). В общей сложности по данным Минэнерго Украины в сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью эксплуатируется более десяти тысяч трансформаторов напряжения (ТН) со средней ежегодной повреждаемостью 6-10%. Исследованию эффективности мер, направленных на снижение аварийности ТНКИ посвящено немало работ, например [1-4]. Среди причин повреждения ТН можно выделить существование в сети феррорезонансных явлений, перевозбуждение ТН повышенным напряжением. Исходя из этого разрабатываются и внедряются соответствующие меры, предупреждающие повреждение ТН. Однако, как показал анализ существующих публикаций, влиянию характера горения дуги на режим работы ТНКИ не уделено должного внимания, в ряде случаев имеет место неверная трактовка полученных результатов. Соответственно, делаются неверные выводы и предлагаются неэффективные меры по предотвращению повреждения ТН.

Целью настоящей работы является исследование влияния характера горения дуги на повреждаемость ТНКИ. Для решения поставленной задачи использовалась методика компьютерного моделирования в среде МАТЛАВ. При этом в работе внимание уделено не только ТН традиционного типа (НТМИ, ЗНОМ, ЗНОЛ), но и серийно выпускаемым антирезонансным трансформаторам (НАМИ, НАМИТ, НАЛИ-СЭЩ). Приведенные результаты представляют достаточно значимый научно-практический интерес и могут быть полезны как эксплуатационному персоналу, так и конструкторам ТН.

Изложение основного материала. Расчетная схема замещения исследуемой сети пред-

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

ставлена на рис. 1. В ней E_a, E_b, E_c – ЭДС источника питания; $R_{\text{н}}$ и $L_{\text{н}}$ – активное сопротивление и индуктивность рассеивания питающего трансформатора; $C_{\text{ф}}$ и $C_{\text{мф}}$ – эквивалентная фазная и междуфазная емкость сети; R_a – эквивалентная активная проводимость сети на землю; $R_{\text{д}}$ – активное сопротивление, моделирующее сопротивление дуги.

В качестве базовой была принята сеть 6 кВ с параметрами $R_{\text{н}}=0,163$ мОм, $L_{\text{н}}=0,86$ мГн, $C_{\text{ф}}=1$ мкФ. Коэффициент успокоения был принят равным 0,03, соотношение фазной к междуфазной емкости принято равным $C_{\text{мф}}=1/3C_{\text{ф}}$ согласно [5]. Приведенные в данной работе результаты получены для конкретных параметров сети ($R_{\text{н}}, L_{\text{н}}, C_{\text{ф}}$), однако общие закономерности были проверены и для других параметров сетей.

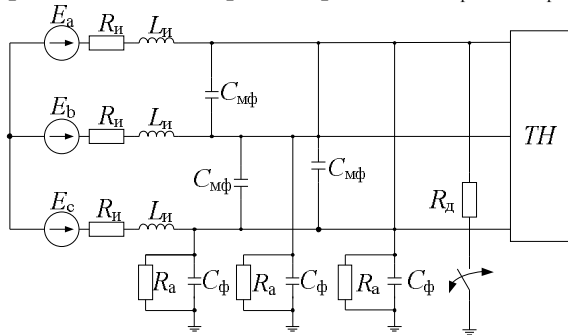


Рис. 1 – Расчетная схема замещения исследуемой сети в режиме ОДЗ

Для того чтобы разобраться с механизмом повреждения и принципом действия защиты различных типов ТНКИ от токовых перегрузок, обратимся к принципиальной схеме соединения обмоток трансформаторов (рис. 2). ТН типа НТМИ-6(10) (рис. 2а) представляет собой группу трех однофазных трехобмоточных трансформаторов, заключенных в одном баке. Высоковольтная нейтраль трансформатора заземлена. Этим обеспечивается возможность измерения фазных напряжений и, соответственно, контроль изоляции сети. Однако наличие заземленной обмотки приводит к тому, что ТН подвержен воздействию разного рода негативных явлений. Это в первую очередь феррорезонанс и перевозбуждение. Встроенной защиты от этих явлений данный ТН не имеет.

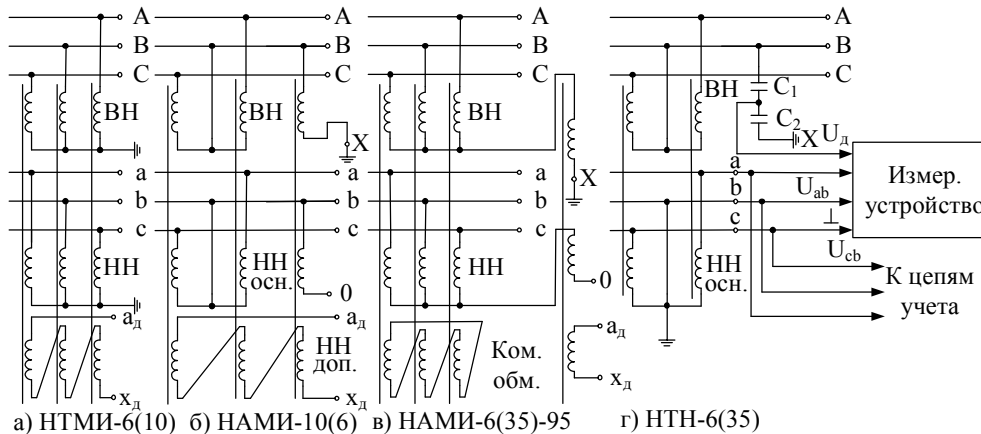


Рис. 2 – Принципиальная схема соединения обмоток трансформаторов напряжения

Антирезонансный ТН типа НАМИ-10(6) (рис. 2б) представляет собой два однофазных трансформатора, включенных на линейное напряжение по схеме открытого треугольника и один однофазный трансформатор нулевой последовательности (ТНП), включенный на фазное напряжение и предназначенный для контроля изоляции. Отсутствие быстрой насыщаемости заземленного трансформатора делает ТНКИ данного типа более устойчивым к перевозбуждению при дуговых замыканиях. Однако, как показал опыт эксплуатации, ТН данного типа также подвержен явлению феррорезонанса и перевозбуждению при перемежающихся дуговых замыканиях [2,3] (повреждается заземленная фаза В).

Антирезонансный трансформатор НАМИ-6(35)-95 (рис. 2в) состоит из двух трансформаторов – одного трехфазного трехстержневого, который питает цепи учета электроэнергии, и однофазного ТНП, который включен между нейтралью первичной обмотки трехфазного ТН и землей, и служит для измерения напряжения нулевой последовательности. Антирезонансные свойства этого ТН обусловлены трехстержневой конструкцией магнитопровода. При таком исполнении поток нулевой последовательности замыкается по немагнитной среде. Вследствие чего этот поток имеет небольшое значение, а индуктивность нулевой последовательности велика и линейна. ТН данного типа более устойчив к перевозбуждению при дуговых замыканиях,

чем ТН НТМИ. Это объясняется ненасыщающимся ТНП в нейтрали ТН с сопротивлением порядка 200-300 кОм. Однако полной антирезонансностью этот ТН не обладает. Это подтверждается исследованиями [3], согласно которым ТН данного типа подвержен явлению «ложной земли» при коммутации сетей с малой емкостью (сотни пФ).

Антирезонансные ТН типа НАМИТ-6(10) и НАЛИ-СЭЩ-6(10) достаточно схожи между собой по конструкции и принципу действия. Три однофазных трехобмоточных трансформатора собраны в группу по аналогии с НТМИ. Контроль изоляции ведется с обмотки разомкнутого треугольника. В нейтраль ВН включен ТНП. В нормальном режиме его вторичная обмотка замкнута и ТНП имеет только активное сопротивление порядка 6 кОм. При возникновении в сети однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) вторичная обмотка ТНП размыкается, ее сопротивление увеличивается до 300 кОм. Это приводит к срыву феррорезонанса и недопущению повреждения перевозбуждением. Полной антирезонансностью эти ТН не обладают [3]. Они также подвержены явлению «ложной земли» при коммутации сетей с малой емкостью. Следует отметить, что при таком режиме ТНКИ, как правило, не повреждаются.

Одной из наиболее совершенных конструкций антирезонансного ТН является нерезонирующий трансформатор напряжения (НТН) (рис. 2г) [1]. Отсутствие гальванической связи ТН с землей исключает как ФРП, так и возможность повреждения перевозбуждением. Для измерения фазных напряжений и, соответственно, контроля изоляции достаточно иметь информацию об одном фазном напряжении и двух междуфазных.

При теоретических исследованиях эффективности применения тех или иных типов ТН основное внимание, как правило, уделяется стойкости ТН к перевозбуждению при дуговых перенапряжениях и к феррорезонансу. Как показали наши исследования, характер горения дуги

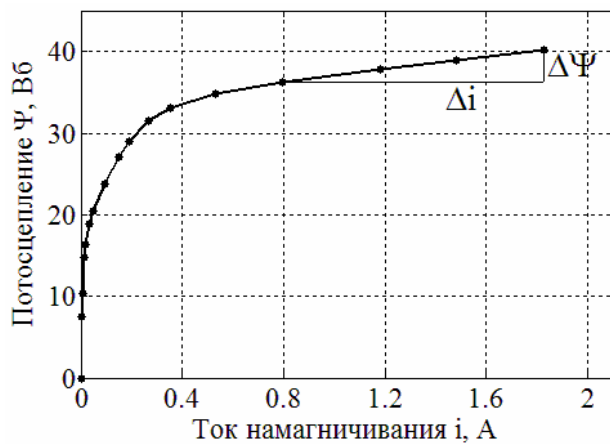


Рис. 3 – Вебер-амперная характеристика фазы ТН типа НТМИ-6

самым существенным образом влияет на режим работы ТНКИ, а именно, на величину тока в обмотке и, соответственно, на повреждаемость ТН при нестационарных режимах. При этом основным параметром ТН является вебер-амперная характеристика. Кривая намагничивания фазы НТМИ-6 без учета индуктивности рассеивания приведена на рис. 3.

Данная зависимость получена экспериментальным путем. Погрешность измерения потокосцепления равна 1,8%, тока намагничивания – 2%. В расчетах активное сопротивление обмотки ВН принималось равным 1,2 кОм, индуктивность рассеивания – 4,5 Гн. Номинальное потокосцепление равно 15,6 Вб. Индуктивность рассеивания определена по результатам опыта КЗ с учетом до-

пущения равенства приведенных индуктивных сопротивлений первичной и вторичной обмотки. В глубоком насыщении характеристика намагничивания имеет наклон и не параллельна оси абсцисс (см. рис. 3). Соответственно, динамическая индуктивность намагничивающего контура в насыщении не равна нулю и может быть определена как $L_{нас}^{дин} = \Delta\Psi / \Delta i = 3,8 / 1 = 3,8 Гн$.

Для режима однофазного дугового замыкания (ОДЗ) возможны два варианта горения дуги – устойчивая и перемежающаяся. Устойчивая дуга по своему воздействию на ТН схожа с металлическим замыканием и не представляет опасность для ТН. Гораздо большую опасность несут нестабильно горящие дуги, которые импульсами воздействуют на ТН, насыщая его магнитную систему. Основным фактором, определяющим величину тока в обмотке, является кратность перенапряжений при ОДЗ. На рис. 4 приведены расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ТН типа НТМИ при симметричном дуговом замыкании. Механизм зажигания и погасания дуги реализован согласно теории Петерсена. Замыкание происходит в фазе А. Максимальная кратность перенапряжений составила $2,7U_{\phi}$. При этом рабочая точка на кривой намагничивания находится в глубоком насыщении. Ток в этом случае ограничивается в основном индуктивностью рассеивания и динамической индуктивностью насыщения сердечника.

Среднеквадратическое значение тока в фазе С значительно превышает ток термической стойкости (0,25-0,3А) и равно 0,85 А.

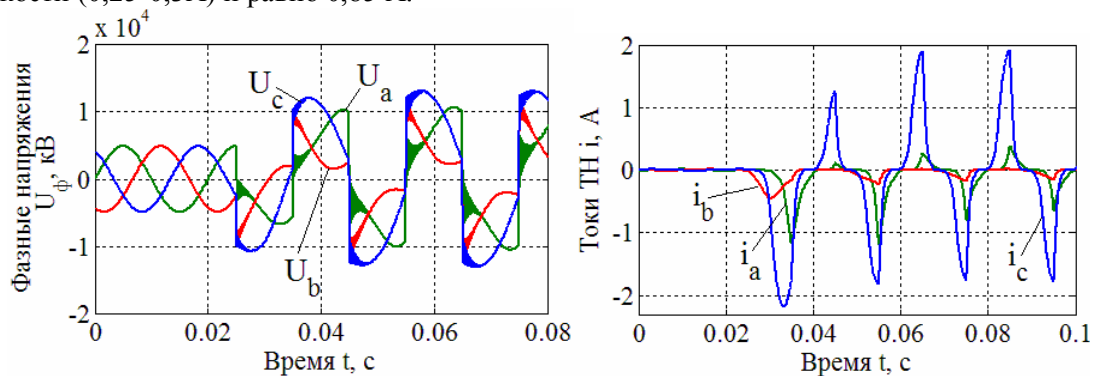


Рис. 4 – Расчетные осциллограммы фазных напряжений и токов в обмотке ТН при симметричном ОДЗ

Характерным является тот факт, что при сравнительно равных кратностях перенапряжений по фазам (2,13; 2,45; 2,69) действующее значение токов по фазам значительно отличается (0,19А; 0,03А; 0,85А) и имеет ярко выраженный максимум в фазе, предшествующей аварии (фазе С). В первую очередь это объясняет спектральный состав фазных напряжений при ОДЗ, который приведен на рис. 5.

В спектре присутствуют все нечетные гармоники. Из него следует, что максимальное значение напряжения промышленной частоты приходится на фазу С ($2,9U_{\phi}$). Воздействие такого напряжения приведет к глубокому насыщению сердечника. В общем случае при определении тока в нелинейной индуктивности необходимо

учитывать не только амплитудно-частотные характеристики фазного напряжения, но и фазочастотные.

Наши исследования показали, что при симметричном дуговом замыкании с достаточной для инженерных расчетов точностью об опасности воздействия тока на ТН при перевозбуждении можно судить лишь по величине кратности перенапряжения при ОДЗ. Установлено, что для ТН типа НТМИ-6 опасность с точки зрения повреждения при перевозбуждении представляет кратности $2,6U_{\phi}$ и выше.

Более устойчивы к воздействию симметричных дуговых замыканий являются антирезонансные ТН типов НАМИ, НАМИТ (рис. 2в). В первую очередь это объясняется наличием ненасыщающейся индуктивности в нейтрали ТН с сопротивлением порядка 300 кОм. При перенапряжениях заметного насыщения магнитной системы ТНКИ не происходит.

Несколько иная ситуация наблюдается при несимметричной дуге, при которой величина напряжения зажигания положительной и отрицательной полярности фазного напряжения поврежденной фазы различны. Частным случаем несимметричной дуги является однополярная дуга, которая зажигается и гаснет один раз за период. Этот режим горения дуги представляет наибольшую опасность для всех электромагнитных ТН, которые имеют связь с землей. Расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН при однополярной дуге приведены на рис. 6.

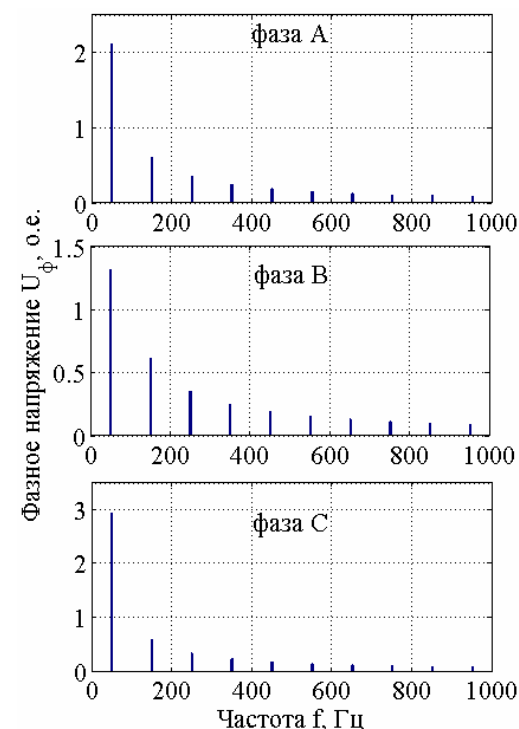


Рис. 5 – Амплитудно-частотный спектр фазных напряжений при симметричном ОДЗ

Рис. 6 – Расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН при однополярной дуге

Ток носит ярко выраженный однополярный характер. Характерным для этого случая является тот факт, что действующие значения тока по фазам примерно равны между собой (0,81А; 0,77А; 0,91А). В работах [2, 4] существование значительных токов в обмотке ВН при однополярной дуге объясняется существованием в сети феррорезонансных явлений. Однако это мнение ошибочно.

Из осциллограмм фазных напряжений после возникновения ОДЗ видно, что площадь положительной и отрицательной полуволны различны (несимметрия относительно оси абсцисс).

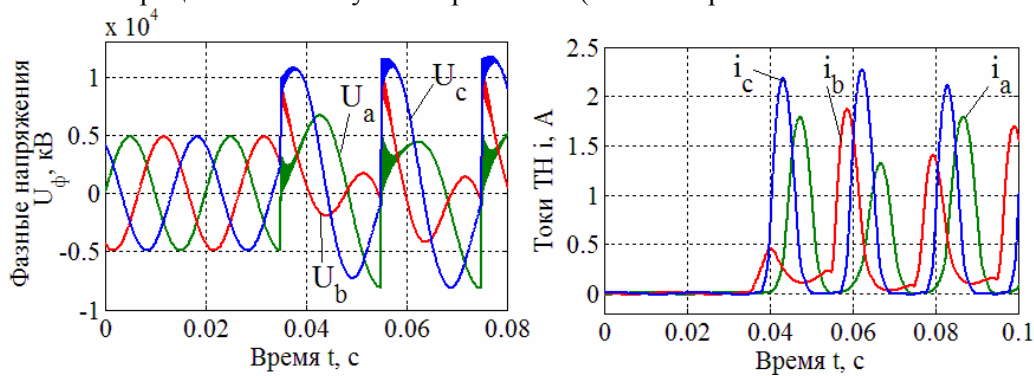


Рис. 6 – Расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ТН при однополярной дуге



Рис. 7 – Амплитудно-частотный спектр фазного напряжения при однополярной дуге

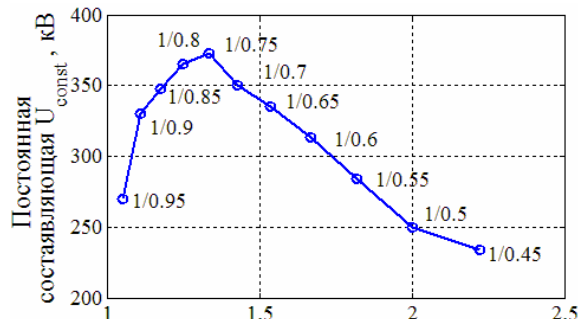


Рис. 8 – Зависимость постоянной составляющей от отношения напряжения пробоя положительной и отрицательной полуволны U^+/U^- , о.е.

Отношение напряжения пробоя положительной и отрицательной полуволны U^+/U^- , о.е.

При несимметричных дугах протекание опасных, с точки зрения термической стойкости

Следовательно, в фазных напряжениях присутствует постоянная составляющая, причем эта величина во всех фазах одинакова. Амплитудный спектр фазы В приведен на рис. 7, из которого следует, что величина постоянной составляющей равна 650 В. В данном случае имеет место подмагничивание сердечника ТН постоянным током, причем величина этого тока определяется величиной постоянного напряжения и активного сопротивления контура.

Для данного случая ток подмагничивания равен $650/1200=0,54$ А. При воздействии постоянного тока такой величины рабочая точка на кривой намагничивания будет в глубоком насыщении со всеми вытекающими последствиями. Кроме того, такой ток сам по себе представляет опасность для обмотки ВН.

При существовании двухполярной несимметричной дуги в спектре фазных напряжений также имеет место постоянная составляющая, которая подмагничивает сердечник. Однако ее величина несколько меньше соответствующей ей величины при однополярной дуге. В общем случае величина постоянной составляющей определяется отношением величины напряжения пробоя положительной (U^+) и отрицательной (U^-) полуволны. Как показали наши исследования (рис. 8), зависимость величины постоянной составляющей от отношения U^+/U^- имеет нелинейный характер.

Возможность подмагничивания при несимметричной дуге в первую очередь следует учитывать при проектировании ТН. Для обеспечения ненасыщаемости антирезонансных ТН при существовании несимметричных дуг особое внимание следует уделить величине активного сопротивления ТНП, которое в сумме с активным сопротивлением обмотки ВН ограничивает постоянный ток. Так, например, при моделировании однополярной дуги с ТН типа НАМИ-6-95 (рис. 2в), у которого $R_{вн}=0,8$ кОм, $R_{тнп}=1,5$ кОм оказалось, что величина постоянной составляющей в нейтрали равна 1,1 А. Такой ток в первую очередь представляет опасность для ТНП и непременно приведет к его повреждению. Кроме того, подмагничивание ТНП ухудшает защитные свойства последнего в борьбе с перевозбуждением, поскольку насыщенный магнитопровод обладает малым индуктивным сопротивлением.

обмоток, токов наблюдается и в фазных обмотках антирезонансных ТН, однако максимальное его значение будет в нейтрали, т.е. в обмотке ТНП, поскольку в нейтрали токи суммируются. Собственно говоря, этим и объясняется тот факт, что в антирезонансных ТН, как правило, повреждается именно ТНП. Так, например, при моделировании воздействия несимметричной дуги $U+/U- = 1/0,8$ на ТН типа НАМИ-6-95 оказалось, что среднеквадратическое значение тока в обмотках ВН не превышает 0,17 А и не опасно, в то время как ток в нейтрали равен 0,37 А.

Затронув особенности горения дуги нельзя не уделить внимания вероятности появления такого события, как несимметричная дуга. Как показал многолетний опыт осциллографирования дуговых процессов авторов [4-7], при перемежающейся дуге зажигание ее может быть как одинаковым, так и разным для положительной и отрицательной полярности напряжения. Так, например, согласно зависимости числа пробоев от момента замыкания, приведенной в [6], пробой в момент максимума напряжения (или близкий к нему) поврежденной фазы наблюдался всего в 21% случаев. Соответственно, можно говорить о том, что несимметричная дуга – событие весьма вероятное.

Ситуация с возникновением однополярной дуги несколько иная. Как правило, на ее возникновение влияние оказывает именно ТНКИ. При воздействии перенапряжения на ТН и его насыщении его результирующая индуктивность уменьшается, и он выступает в роли дугогасящего реактора. Таким образом, проявляется так называемый компенсационный эффект ТН при ОДЗ [8].

Выводы

1. При несимметричных дугах в спектре фазных напряжений появляется постоянная составляющая и имеет место подмагничивание сердечника постоянным током. Наиболее опасна однополярная дуга, при которой величина постоянной составляющей в спектре фазных напряжений максимальна. Выпускаемые на сегодняшний день антирезонансные ТН электромагнитного типа не способны длительно выдерживать несимметричные дуги, и повреждению подвержены именно ТНП этих трансформаторов. Примеры подобного несовершенства следует учитывать на стадии проектирования ТН путем увеличения активного сопротивления обмотки ТНП.
2. Применение антирезонансного ТН типа НТН позволяет избежать повреждения последнего при различных нестационарных процессах. Положительный опыт эксплуатации этого ТН позволяет говорить его высокой надежности.

Список использованных источников:

1. Журахівський А.В. Уведення в експлуатацію та випробування нерезонуючого трансформатора напруги 6-10 кВ / А.В. Журахівський, Ю.А. Кенс, Р.В. Мединський, Н.Р. Засідкович // *Енергетика и электрификация*. – 2001. – №8. – С. 17-22.
2. Журахівський А.В. Моделювання ферорезонансних процесів в мережах 35 кВ з трансформаторами напруги типу НАМИ-35 / А.В. Журахівський Ю.А. Кенс, О.М. Равлик, Н.Р. Засідкович // *Вісник ВПШ*. – 2000. – №4. – С. 56-61.
3. Лавров Ю.А. Современные антирезонансные трансформаторы напряжения / Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев // *Новости электротехники*. – 2009. – №5(59).
4. Лихачев Ф.А. Компенсация емкостных токов в сетях 6-10 кВ / Ф.А. Лихачев, В.И. Бойко, В.М. Змиевский, Д.И. Панасюк // *Электрические станции*. – 1978. – №10. – С. 62-66.
5. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 С.
6. Ширковец А.И. Исследование переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ ТЭЦ металлургического комбината с комбинированным заземлением нейтрали / А.И. Ширковец, Л.И. Сарин, М.В. Ильиных, Э.В. Буянов // *Энергетика и электрификация*. – 2008. – №8. – С. 39-47.
7. Качесов В.Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях / В.Е. Качесов, В.Н. Ларионов, А.Г. Овсянников // *Электрические станции*. – 2002. – №8. – С. 38-45.
8. Волошек И.В. Компенсационный эффект трансформаторов напряжения при переходных процессах дугового замыкания на землю / И.В. Волошек // *Изв. Вузов. Энергетика*. – 1988. – №3. – С. 43-46.