

Проверка антирезонансных свойств трансформаторов напряжения на экспериментально-испытательном стенде 6 – 35 кВ в контексте требований нового стандарта

ЖУЙКОВ А. В.; antonzhuykov23@gmail.com

КУБАТКИН М. А.; mkubatkin@yandex.ru

МАТВЕЕВ Д. А.; daniil.matveev@gmail.com

НИУ «Московский энергетический институт»

111250, Москва, Красноказарменная ул., 14

НИКУЛОВ И. И., ОАО «Раменский электротехнический завод «Энергия»

140105, Московская обл., г. Раменское, ул. Левашова, 21

nikulov@ramenergy.ru

ФРОЛОВ М. В.; frolovmikv@gmail.com

НИУ «Московский энергетический институт»



А. В. Жуйков



М. А. Кубаткин



Д. А. Матвеев



И. И. Николов



М. В. Фролов

Феррорезонансные явления — одна из основных причин снижения надёжности электрических сетей 6 – 35 кВ с изолированной нейтралью. Проблема возникновения феррорезонанса может быть устранена применением антирезонансных трансформаторов напряжения, в конструкции которых предусмотрены технические решения для подавления резонансных колебаний. Отечественная промышленность производит несколько модификаций таких трансформаторов, но они не все являются антирезонансными в широком диапазоне ёмкостных токов сети. До недавнего времени в нормативных документах отсутствовали технические требования к их антирезонансным свойствам. В ноябре 2018 г. утверждён предварительный национальный стандарт на индуктивные трансформаторы напряжения, впервые содержащий требования к антирезонансным трансформаторам напряжения и соответствующие методы испытаний. Представлены результаты экспериментальной проверки метода испытаний трансформаторов напряжения 6 – 35 кВ в режиме имитации перебегающих дуговых однофазных замыканий на землю и сделаны предложения по корректировке стандарта.

Ключевые слова: феррорезонанс, электрические сети с изолированной нейтралью, антирезонансные трансформаторы напряжения, технические требования к трансформаторам напряжения.

Феррорезонансные явления — одна из основных причин снижения надёжности электрических сетей 6 – 35 кВ с изолированной нейтралью. Эти явления возникают в контурах, образованных ёмкостями сети и нелинейными индуктивностями намагничивания трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ), если в конструкции последних не приняты меры по предотвращению феррорезонанса или эти меры недостаточно эффективны при данном значении ёмкости сети.

На рис. 1 приведена схема электрической сети с ТНКИ, дополнительная обмотка которого соединена в разомкнутый треугольник для измерения напряжения нулевой последовательности. Обмотка высшего напряжения (ВН) ТНКИ включена между фазами сети и землёй, и оказывается соединённой параллельно с фазными ёмкостями

сети $S_{\text{Ф}}$, образуя контур нулевой последовательности. Внутренние сопротивления сети значительно меньше индуктивных сопротивлений намагничивания ТНКИ и сопротивлений фазных ёмкостей на частотах в десятки и сотни герц, поэтому можно считать, что в контуре нулевой последовательности сети три фазные ёмкости и три индуктивности намагничивания соединены параллельно. Именно в этом контуре могут возникнуть феррорезонансные колебания.

Для возникновения феррорезонанса необходимо, чтобы магнитный поток хотя бы в одном из стержней ТНКИ оказался в области насыщения стали. Основной предпосылкой для этого в электрических сетях является отключение (или самопогасание дуги) однофазных замыканий на землю (ОЗЗ).

Причина возникновения феррорезонанса проиллюстрирована на рис. 2, где приведены расчётные осциллограммы для модели сети рис. 1 в цикле зажигания – гашения дуги ОЗЗ. После замыкания фазы А на землю в момент времени t_3 начинается переходный процесс, в ходе которого напряжение повреждённой фазы стремится к нулю, напряжения на неповреждённых фазах — к линейным напряжениям, напряжение смещения нейтрали — к напряжению, противофазному ЭДС фазы А. Ток замыкания i_3 в переходном процессе стремится к установившемуся синусоидальному ёмкостному току ОЗЗ. В момент времени t_4 ток в месте замыкания подходит к нулевому значению, и дуга гаснет. При этом на фазных ёмкостях сети остаётся заряд нулевой последовательности, создающий постоянное смещение нейтрали.

Также на рис. 2 построены осциллограммы магнитных потоков в стержнях магнитопровода ТНКИ в предположении, что сталь не насыщается. Видно, что под действием постоянного напряжения смещения нейтрали магнитные потоки начинают неограниченно возрастать. В реальных условиях при насыщении стали магнитопровода ТНКИ произойдет значительное уменьшение дифференциальной индуктивности намагничивания, провоцирующее резкий разряд фазных ёмкостей. Если потери в разрядном контуре будут недостаточны для апериодического процесса, то он станет затухающим, но колебательным, с постепенно уменьшающейся частотой. При некотором значении частоты энергия, поступающая в контур из сети, окажется достаточной для компенсации потерь, и в схеме возникнет феррорезонансный процесс.

Отметим, что для насыщения стали необязательно, чтобы смещение нейтрали было большим. Если в результате гашения дуги или отключения ОЗЗ выключателем смещение нейтрали оказалось меньше фазного напряжения сети, насыщение стали магнитопровода всё равно произойдёт, но с большей временной задержкой. Поэтому большинство отключений как металлических, так и дуговых ОЗЗ, являются потенциальным источником феррорезонансных процессов.

Требования к антирезонансным свойствам трансформаторов напряжения

Трансформаторы напряжения (ТН), препятствующие устойчивому существованию феррорезонанса, называются антирезонансными, и производители таких аппаратов добавляют к их условному обозначению букву «А». Однако до настоящего времени в государственных стандартах на ТН отсутствовала процедура проверки их антирезонансных свойств. В 2016 г. Техническим комитетом по стандартизации «Электроэнергетика» (ТК016) Росстандарта была инициирована разработка новой серии государственных стандартов на измерительные трансформаторы тока и напряжения. Третья часть серии (Технические

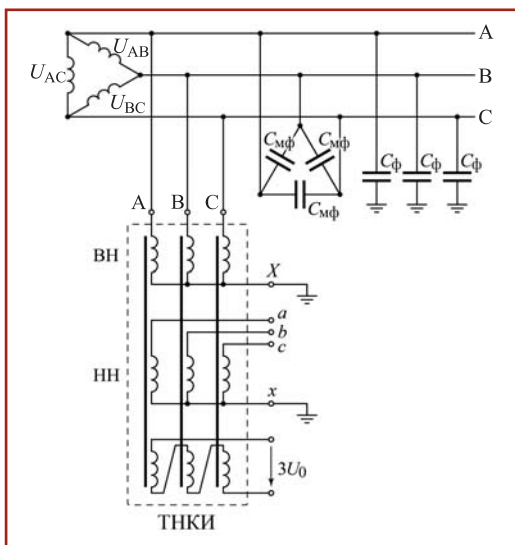


Рис. 1. Схема электрической сети с ТНКИ традиционной конструкции:

ВН — обмотка высшего напряжения; НН — обмотка низшего напряжения; U_{AC} , U_{BC} , U_{AB} — междуфазные напряжения эквивалентного источника сети; А, В и С — линейные выводы обмотки ВН; X — нейтральный вывод обмотки ВН; a, b и c — линейные выводы обмотки НН; x — нейтральный вывод обмотки НН; $3U_0$ — утроенное напряжение нулевой последовательности на выводах дополнительной обмотки низшего напряжения, соединённой в разомкнутый треугольник; C_{ϕ} — ёмкость фазы сети на землю; $C_{мф}$ — межфазная ёмкость сети

условия на индуктивные трансформаторы напряжения) была разработана ООО «Эльмаш (УЭТМ)» и утверждена в качестве предварительного национального стандарта (ПНСТ) [1] в ноябре 2018 г. В нём содержатся требования к антирезонансным трансформаторам и методы их испытаний.

В стандарте дано следующее определение антирезонансного трансформатора — это трансформатор напряжения, устойчиво работающий при наличии в сети феррорезонансных

явлений. Поэтому критерием наличия у ТН антирезонансных свойств принято не исключение феррорезонанса, а способность выдерживать возникающие при нём воздействия. В частности, в соответствии с требованиями стандарта завод-изготовитель должен установить предельно допустимый ток первичной обмотки. Отметим, что этот ток отличается от предельно допустимого нагрузочного тока, так как при феррорезонансе большой ток протекает только по первичной обмотке ТН. Предельно

допустимый ток этой обмотки предложено определять с помощью дополнительного испытания — приложением к обмотке ВН постоянного напряжения, при котором значения температур в установившемся режиме соответствуют допустимым значениям по условию длительного нагрева по ГОСТ 8024 [2]. Установившиеся действующие значения фазных напряжений при феррорезонансе в сети с изолированной нейтралью не должны превышать наибольшего рабочего линейного напряжения ТН.

Для ТН 6 – 35 кВ антирезонансные свойства должны подтверждаться для условий:

- существования в сети перемежающихся дуговых ОЗЗ;
- возможного возникновения явления «ложной земли» (при включении ненагруженных шин);
- явления «опрокидывания фазы» [3].

В статье рассмотрен первый режим испытаний.

Испытания ТН в режиме имитации перемежающихся дуговых ОЗЗ должны проводиться по трёхфазной схеме, в которой ёмкости кабелей или ВЛ моделируются конденсаторами, для не менее чем 16 значений, равномерно распределённых по всему регламентированному диапазону.

При использовании конденсаторов при ОЗЗ через место замыкания проходит кратковременный (единицы или десятки микросекунд) импульсный ток разряда конденсатора замыкаемой

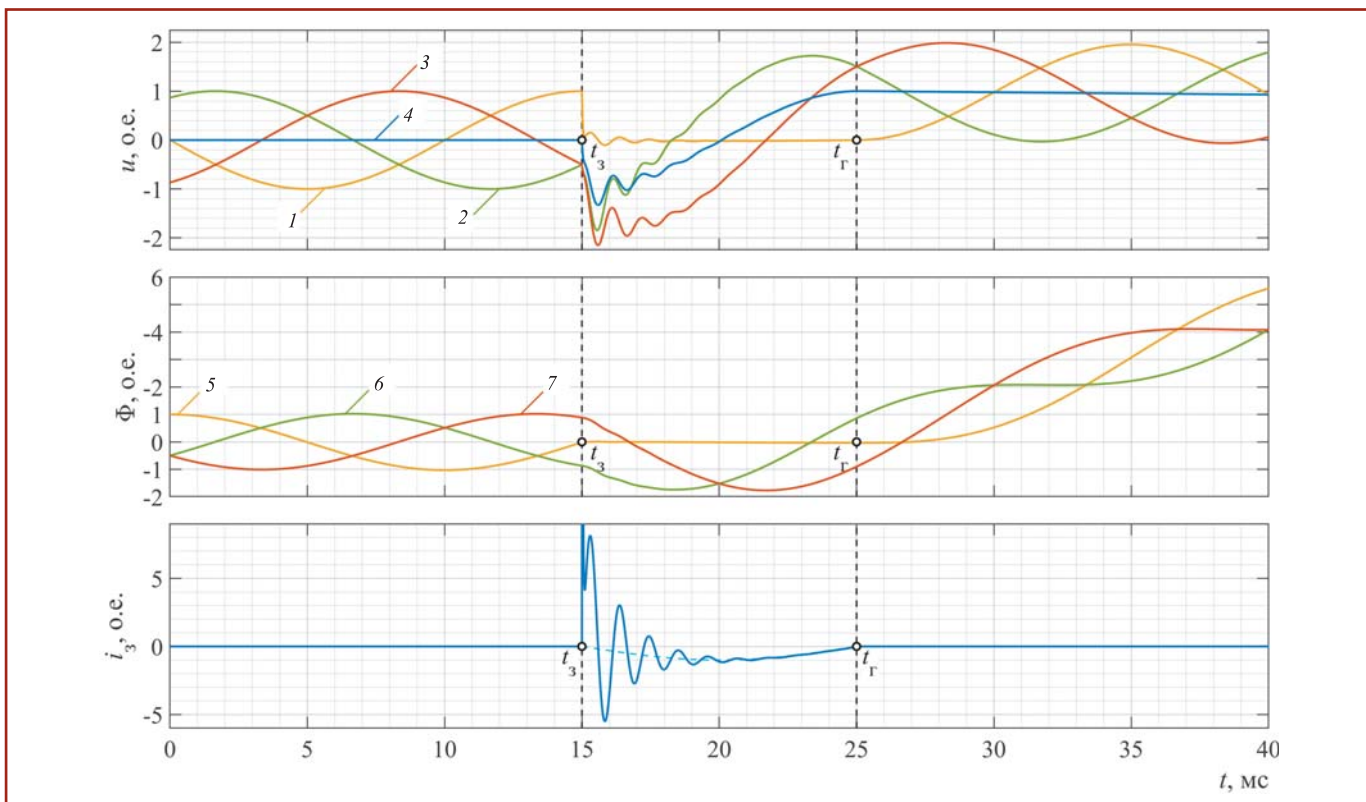


Рис. 2. Стилизованные осциллограммы переходного процесса в цикле зажигания – гашения дуги в сети с изолированной нейтралью:

1 — напряжение фазы А; 2 — напряжение фазы В; 3 — напряжение фазы С; 4 — напряжение смещения нейтрали; 5 — магнитный поток в стержне магнитопровода с фазой А обмотки ВН ТНКИ; 6 — магнитный поток в стержне магнитопровода с фазой В обмотки ВН ТНКИ; 7 — магнитный поток в стержне магнитопровода с фазой С обмотки ВН ТНКИ; t_3 — момент замыкания на землю фазы А; t_r — момент гашения дуги замыкания на землю фазы А; i_3 — ток в месте замыкания

Рис. 3. Схема экспериментально-испытательного стенда 6 кВ:

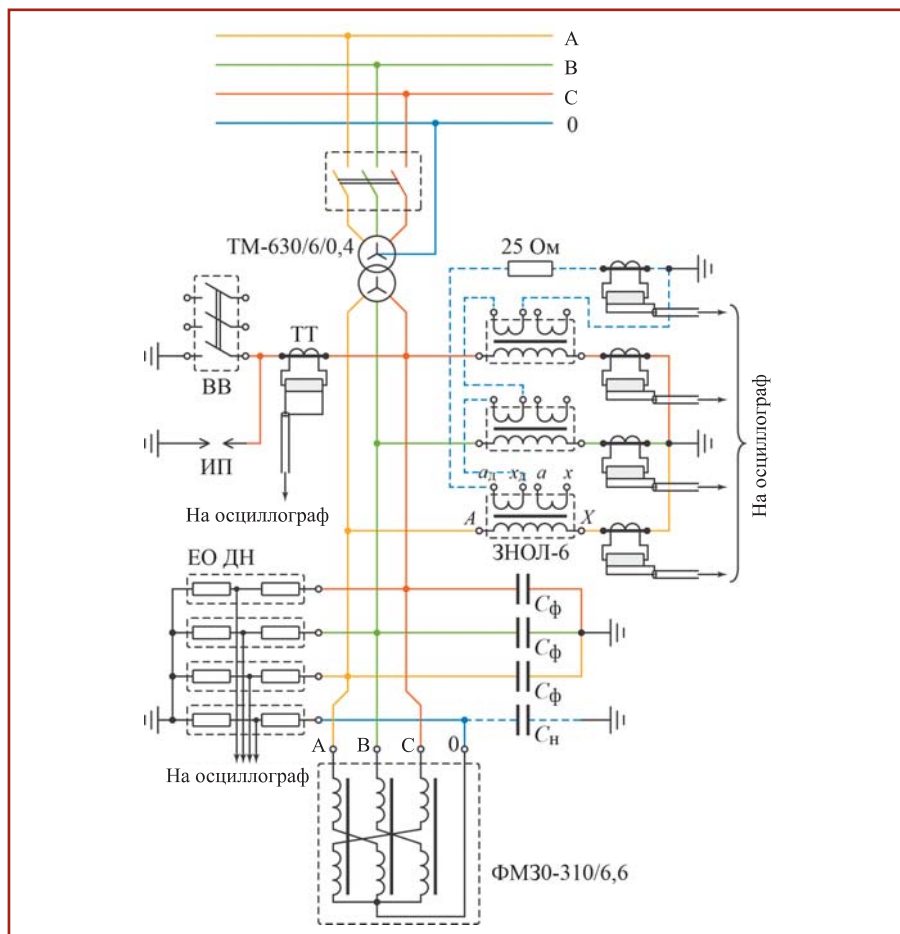
ВВ — вакуумный выключатель; ИП — искровой промежуток; ТТ — трансформатор тока; ЕО ДН — ёмкостно-омические делители напряжения; C_{ϕ} — ёмкость конденсатора, включаемого между фазой установки и землёй; C_n — ёмкость конденсатора, включаемого между нейтральной точкой установки и землёй; A и X — линейный и нейтральный выводы обмотки ВН трансформатора ЗНОЛ-6; a и x — линейный и нейтральный выводы основной обмотки НН трансформатора ЗНОЛ-6; a_d и x_d — линейный и нейтральный выводы дополнительной обмотки НН трансформатора ЗНОЛ-6

фазы. Максимальное значение этого тока равно отношению напряжения на конденсаторе в момент замыкания к активному сопротивлению разрядного контура и составляет единицы килоампер. В реальных сетях такой ток формируется в волновом процессе разряда кабелей и ВЛ и имеет другой характер. Тем не менее, это отличие не имеет решающего значения, так как на феррорезонансные процессы ток начальной стадии ОЗЗ практически не оказывает влияния.

Для сокращения длительности импульсного тока ОЗЗ и упрощения варьирования ёмкости нулевой последовательности сети C_0 при разработке стандарта было принято решение сосредоточить часть фазных ёмкостей в нейтральной точке испытательной схемы с помощью конденсаторов суммарной ёмкостью C_n , а фазные конденсаторы использовать с минимальной ёмкостью C_{ϕ} . Ёмкость нулевой последовательности при этом составляет $C_0 = 3C_{\phi} + C_n$. При отсутствии конденсаторов в нейтральной точке ёмкости фазных конденсаторов определяют нижнюю границу диапазона изменения суммарной ёмкости нулевой последовательности.

К сожалению, в настоящей редакции стандарта таблица с диапазоном ёмкостей для определения антирезонансных свойств [1, табл. 7] приведена с ошибками для ТН с номинальными напряжениями 6 – 35 кВ. Фазные ёмкости C_{ϕ} установлены одинаковыми и равными 0,1 мкФ для всех классов напряжения 6 – 35 кВ. Диапазоны изменения ёмкости в нейтрали сети C_n соответствуют ёмкостным токам ОЗЗ 0,44 – 0,62 А для сетей 6 кВ, 0,73 – 0,74 А для сетей 10 кВ и 2,5 – 10 А для сетей 35 кВ. В первую очередь должна быть увеличена правая граница этих диапазонов — до 30 А для сетей 6 кВ и до 20 А для сетей 10 кВ, что соответствует допустимым ёмкостным токам замыкания на землю для сетей с изолированной нейтралью [4, п. 1.2.16].

В стандарте отмечено, что трансформатор может быть устойчив к феррорезонансу только в определённом диапазоне ёмкостей сети. В этом случае производитель должен указать в эксплуатационной документации диапазон ёмкостей сети, для которого выполняются условия устойчивости, и подтвердить его испытаниями.



Экспериментально-испытательный стенд 6 – 35 кВ

Для проведения испытаний был использован трёхфазный экспериментально-испытательный стенд ОАО «РЭТЗ Энергия». Завод располагает возможностью проведения таких испытаний для ТН классов напряжения 6, 10 и 35 кВ. Схема стенда для испытания ТН типа ЗНОЛ на класс напряжения 6 кВ приведена на рис. 3.

Источником напряжения 6 кВ служит силовой трансформатор мощностью 630 кВА. Для подключения конденсаторов, обеспечивающих требуемое значение ёмкости нулевой последовательности, используется нейтралеобразующий фильтр нулевой последовательности ФМ30-310/6,6. Однофазное замыкание на землю организуется либо вакуумным выключателем ВВ-TEL, либо с помощью искрового промежутка. Для измерения напряжений используются ёмкостно-омические делители напряжения (ЕО ДН). Существует возможность включения в разомкнутый треугольник дополнительных вторичных обмоток ТН демпфирующего резистора 25 Ом.

Стандарт устанавливает следующую процедуру для испытания антирезонансных ТН на устойчивость к воздействию перемежающейся дуги. К испытываемому трансформатору (или трёхфазной группе ТН) прикладывают рабочее напряжение, после чего включают уст-

ройство, имитирующее перемежающуюся дугу между одной из фаз и землёй. Продолжительность горения дуги при замыкании — не менее 1 с, количество замыканий — от 25 до 30, напряжение в момент замыкания — 0,8 – 0,9 от амплитудного значения, количество опытов — не менее 20. В протокол испытаний заносятся:

- напряжение фазы, замыкаемой на землю через имитирующее устройство;
- напряжение фазы, не участвующей в замыкании на землю;
- ток в нейтрали первичных обмоток испытываемого трансформатора.

Трансформатор считают выдержавшим испытание, если ни в одном из опытов действующее значение тока не превышает предельного допустимого значения, установленного производителем.

Некоторые результаты измерений

Объём статьи не позволяет полностью охарактеризовать результаты испытаний, которые проводились на экспериментально-испытательной площадке завода. Приведём только некоторые результаты, которые указывают на направления дальнейшего совершенствования стандарта.

На рис. 4 приведена осциллограмма напряжений u_A , u_B , u_C и u_n при испытаниях трансформатора НАМИ-10-95 с номинальным напряжением обмотки ВН 6 кВ (далее для краткости именуемого

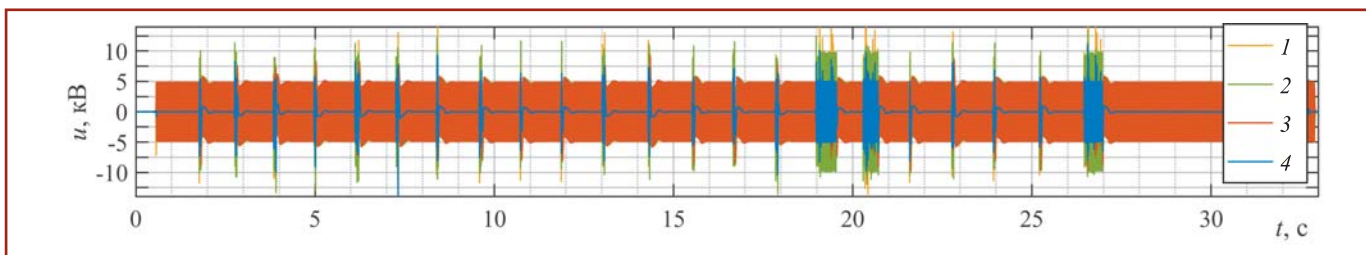


Рис. 4. Напряжения в фазах и смещение нейтрали при испытании трансформатора НАМИ 6 кВ ($C_0 = 4,8$ мкФ):
1 — напряжение фазы А; 2 — напряжение фазы В; 3 — напряжение фазы С; 4 — напряжение смещения нейтрали

НАМИ-6) в режиме перемежающихся дуговых замыканий с ёмкостью $C_0 = 4,8$ мкФ, что соответствует ёмкостному току ОЗЗ $I_c = 5,2$ А. За 25 секунд проведено 22 дуговых замыкания.

Замыкания организовывались касанием штангой высоковольтного электрода. При удалении штанги от электрода дуга погасала, что сопровождалось несколькими повторными зажиганиями с нарастающими напряжениями повторных пробоев. Перенапряжения, сопровождающие повторные зажигания дуги, в этом опыте достигали $2,9U_{ф}$. В трёх случаях из 22 длительность горения дуги составляла примерно 0,5 с, несмотря на удаление штанги от электрода на расстояние, превышающее 100 мм. Такой эффект наблюдался только в случае подключения конденсаторов в нейтральную точку сети через фильтр ФМ30.

Дело в том, что индуктивность рассеяния фильтра, будучи включённой последовательно с дуговым промежутком, осложняет гашение дуги. Так, при $C_0 = 24,8$ мкФ, что соответствует $I_c = 27$ А, погасить дугу, ток которой протекает по индуктивности фильтра, в условиях имеющейся электродной системы вообще не представляется возможным — длина устойчиво горящей дуги достигает 1 м. Если использовать только фазные конденсаторы, то дуга гаснет достаточно легко на малых межэлектродных расстояниях. Поэтому рекомендуется в следующей редакции стандарта указать, что в случае

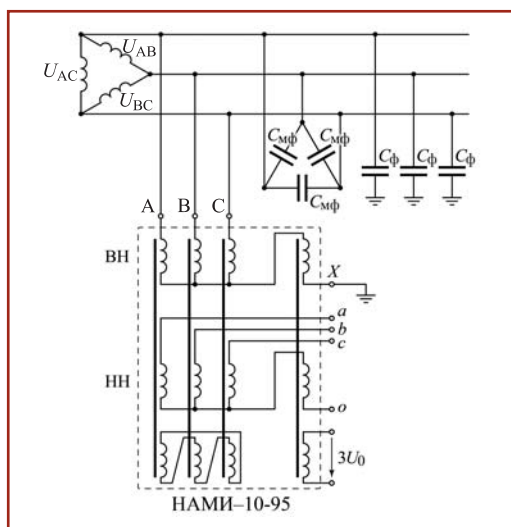


Рис. 5. Схема электрической сети с ТНП типа НАМИ-10-95:

о — нейтральный вывод обмотки НН; $3U_0$ — утроенное напряжение нулевой последовательности на выводах дополнительной обмотки низшего напряжения, соединённой в разомкнутый треугольник

устойчивого горения дуги следует отключить конденсатор в нейтрали и обеспечить необходимую ёмкость нулевой последовательности только конденсаторами в фазах.

Ни в одном из экспериментов с трансформаторами НАМИ не было зарегистрировано феррорезонансных явлений. Это обусловлено конструкцией трансформатора (рис. 5), в которой трёхфазный магнитопровод в схеме нулевой последовательности не насыщается из-за наличия дополнительной обмотки, соединённой в замкнутый треугольник. Напряжение смещения нейтрали прикладывается к трансфор-

матору нулевой последовательности (ТНП), который играет основную роль в демпфировании колебаний.

Процесс можно наблюдать на рис. 6, где приведены осциллограммы напряжений и тока нулевой последовательности, протекающего через нейтральный вывод Х ТНП при отключении металлического ОЗЗ. Видно, что после отключения в схеме возникает напряжение смещения нейтрали, равное амплитуде фазного напряжения источника (отключение вблизи нуля тока ОЗЗ). Пока это напряжение постоянно, в ТНП нарастает магнитная индукция, и при переходе стали в насыщенное состояние происхо-

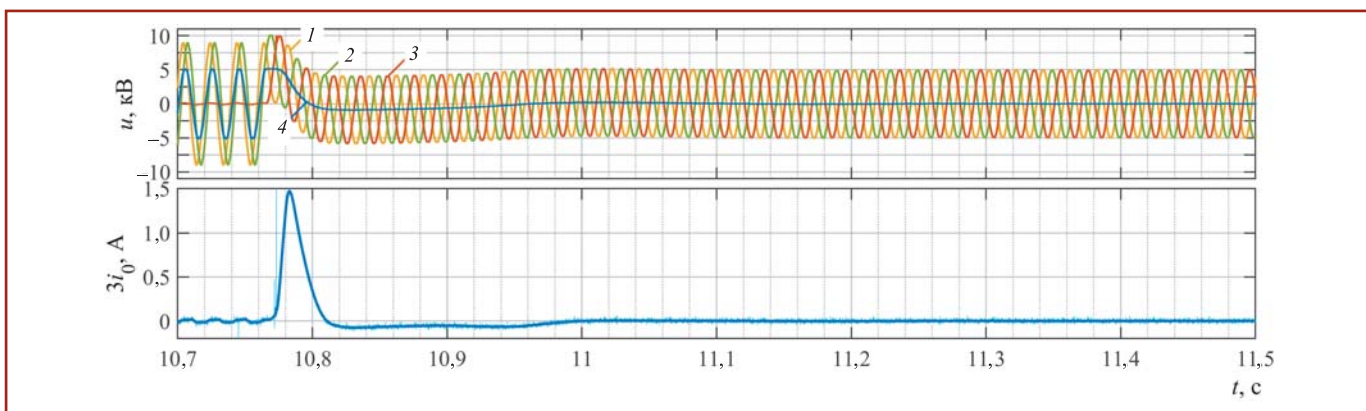


Рис. 6. Осциллограммы напряжений в испытательной схеме и тока через трансформатор НАМИ при отключении металлического ОЗЗ ($C_0 = 4,8$ мкФ):

1 — напряжение фазы А; 2 — напряжение фазы В; 3 — напряжение фазы С; 4 — напряжение смещения нейтрали; $3i_0$ — утроенное значение тока нулевой последовательности схемы

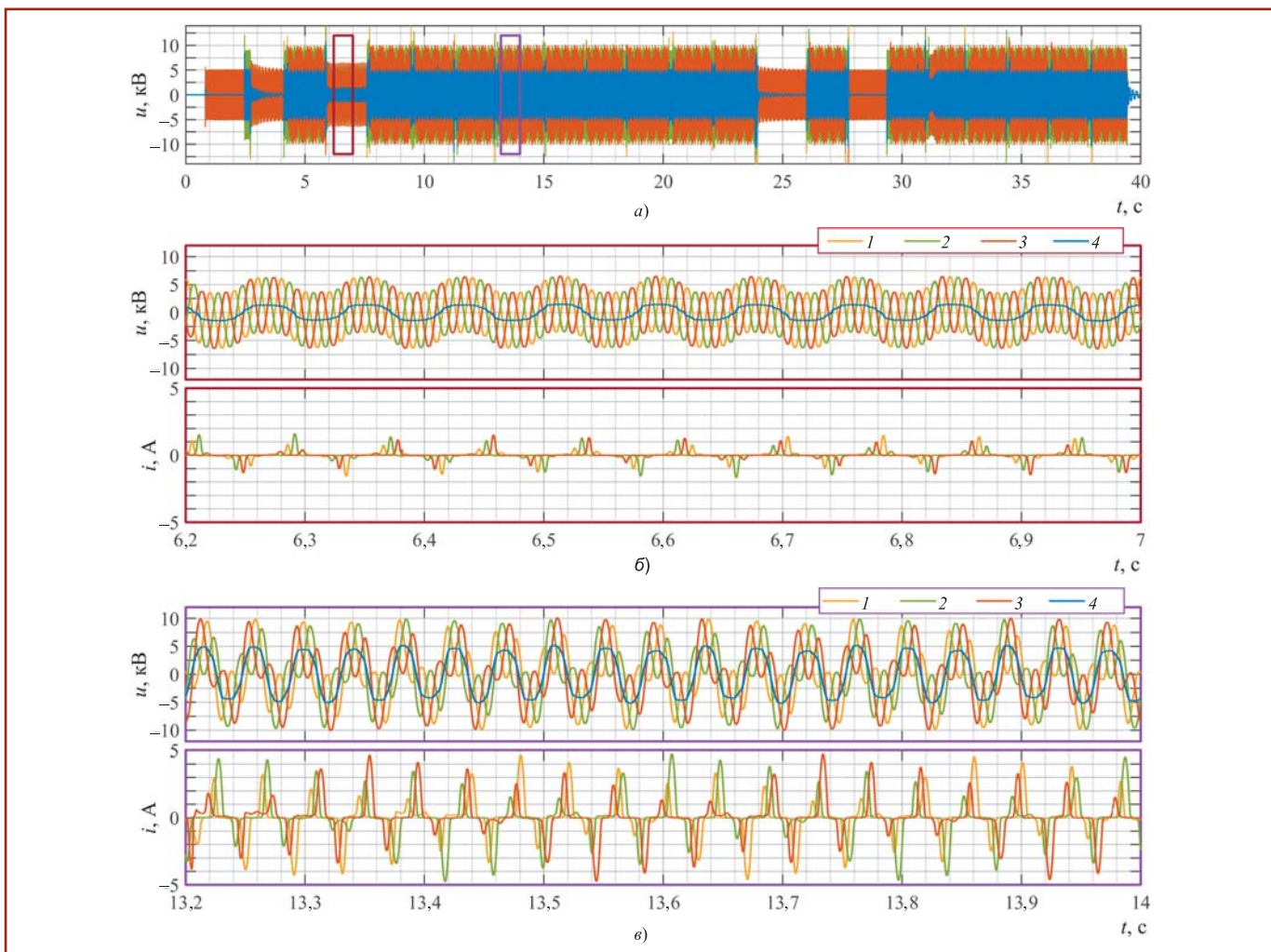


Рис. 7. Осциллограммы напряжений в испытательной схеме и токов через трансформаторы ЗНОЛ-6 в режиме имитации перемежающегося дугового ОЗЗ ($C_0 = 4,8$ мкФ):

а — в течение всего испытания; б — устойчивый феррорезонанс на частоте 12,5 Гц; в — устойчивый феррорезонанс на частоте 25 Гц; 1 — на-
пряжение (ток) фазы А; 2 — напряжение (ток) фазы В; 3 — напряжение (ток) фазы С; 4 — напряжение смещения нейтрали

дит разряд ёмкостей. Потери в обмотках и в магнитопроводе ТНП оказываются настолько большими, что обеспечивают рассеяние значительной части энергии, запасённой в ёмкости нулевой последовательности сети, за один импульс тока насыщения. Подобная картина наблюдается для всех значений C_0 , соответствующих допустимым ёмкостным токам ОЗЗ электрических сетей 6 кВ с изолированной нейтралью.

На рис. 7 приведены осциллограммы испытаний группы однофазных трансформаторов типа ЗНОЛ-6, не являющихся антирезонансными, при $C_0 = 4,8$ мкФ. На рис. 7, а показаны напряжения на протяжении всего опыта. Всего проведено 21 дуговое замыкание. В трёх случаях возникшие при погасании дуги колебания затухали, в 17 случаях формировался устойчивый феррорезонансный процесс на частоте $50/2 = 25$ Гц (рис. 7, в), и в одном случае — на частоте $50/4 = 12,5$ Гц (рис. 7, б). Расчётные действующие значения токов обмоток ВН трансформаторов ЗНОЛ-6 приведены в табл. 1. Действующее значение тока на частоте 25 Гц составило 1,32 А для обмотки ВН

трансформатора фазы А, 1,39 А — для трансформатора фазы В и 1,34 А — для трансформатора фазы С, что превышает номинальный ток плавкой вставки (0,5 А) предохранительного устройства, которым комплектуются трансформаторы ЗНОЛ-6.

Отметим, что нынешняя редакция стандарта не регламентирует процедуру оценки действующего значения тока, протекающего через обмотки ТН. Представляется, что действующее значение тока должно определяться интегрированием за все время испытания. Однако при этом оценка оказывается

заниженной по сравнению с воздействиями, которые могут происходить в реальных условиях. Если бы замыкание было не перемежающимся, а однократным, и в схеме возник устойчивый феррорезонанс, то его термическое воздействие было бы больше.

Обоснуем необходимость определения действующего значения тока по участку осциллограммы, соответствующему наиболее тяжёлому феррорезонансному режиму, на примере осциллограмм, полученных при $C_0 = 0,73$ мкФ и приведённых на рис. 8. В двух случаях из 20 зарегистрирован незатухающий

Таблица 1

Расчётные действующие значение токов обмоток ВН трансформаторов ЗНОЛ-6 при имитации перемежающегося дугового ОЗЗ ($C_0 = 4,8$ мкФ), А

| Интервал интегрирования для нахождения действующего значения | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
|---|--------|--------|--------|
| Участок осциллограммы от 1-го замыкания до отключения питания (весь опыт) | 1,17 | 1,22 | 1,16 |
| Участок осциллограммы с установившимся феррорезонансом на частоте 12,5 Гц | 0,26 | 0,31 | 0,27 |
| Участок осциллограммы с установившимся феррорезонансом на частоте 25 Гц | 1,32 | 1,39 | 1,34 |

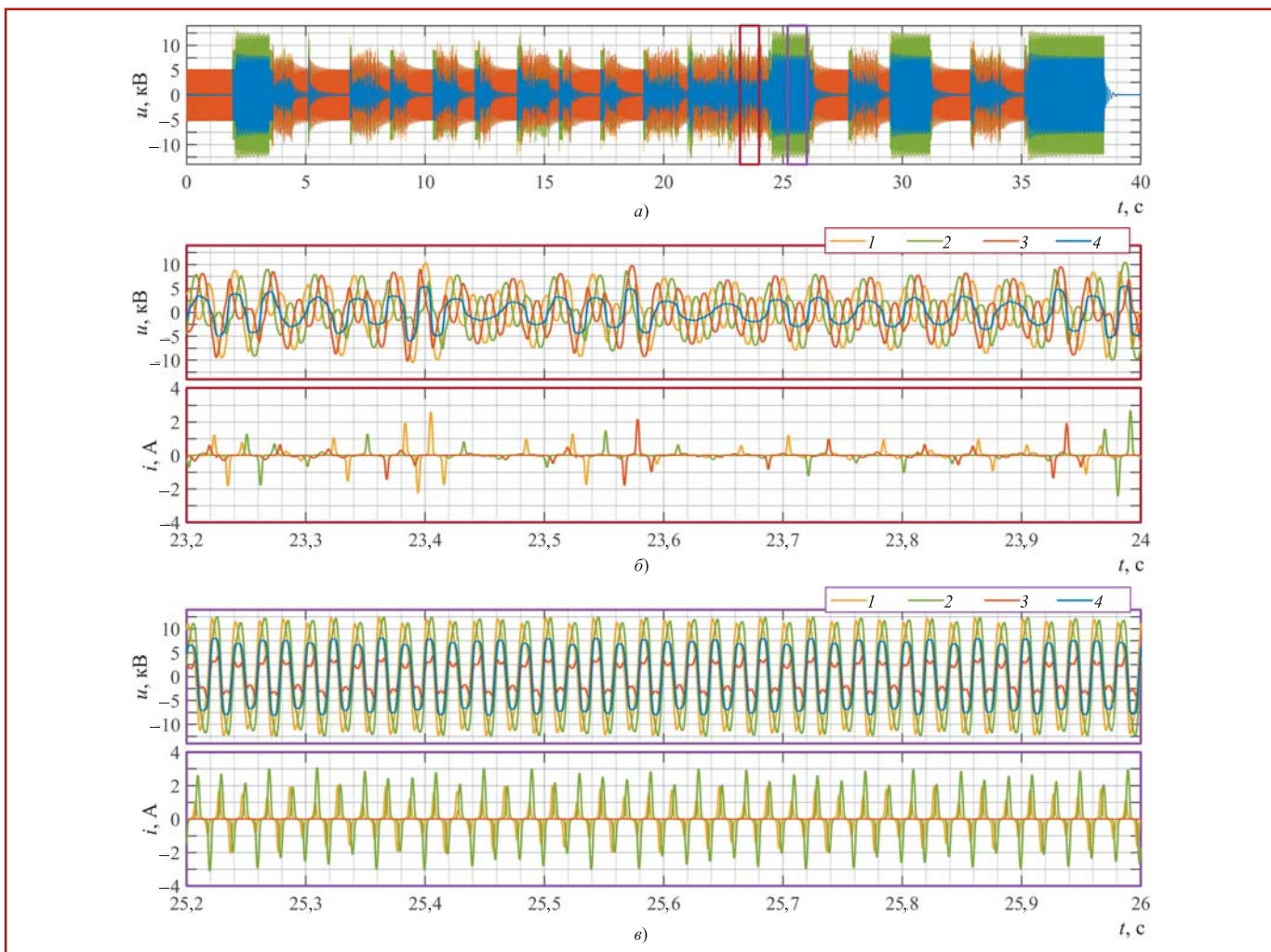


Рис. 8. Осциллограммы напряжений в испытательной схеме и токов через трансформаторы ЗНОЛ-6 в режиме имитации перемежающегося дугового ОЗЗ ($C_0 = 0,73 \text{ мкФ}$):

а — в течение всего испытания; б — незатухающий хаотический феррорезонансный процесс; в — устойчивый феррорезонанс на частоте 50 Гц; 1 — напряжение (ток) фазы А; 2 — напряжение (ток) фазы В; 3 — напряжение (ток) фазы С; 4 — напряжение смещения нейтрали

хаотический феррорезонансный процесс (рис. 8, б), в 14 случаях — затухающий процесс, и только в четырёх случаях — устойчивый феррорезонанс на частоте 50 Гц (рис. 8, в), сопровождающийся током 1,15 А в обмотке ВН трансформатора фазы В (табл. 2). Однако уже одного случая возникновения устойчивого феррорезонанса на частоте 50 Гц в эксплуатации будет достаточно либо для повреждения ТН, либо для перегорания предохранителя.

Поэтому представляется целесообразным скорректировать методику ис-

пытаний и критерий успешности испытаний. В испытаниях вместо обеспечения большого числа последовательных дуговых замыканий следует находить наиболее тяжёлый и устойчивый феррорезонансный режим, и для него сопоставлять действующее значение тока с предельно допустимым. Если же устойчивый феррорезонанс не возникает, то действующее значение тока можно определять за всё время испытания с имитацией перемежающейся дуги. Для конструкций антирезонансных ТН с предохранителями следует отдельно оговорить, что перегорание предохра-

нителя во время испытаний является признаком его неуспешности.

Также желательно исключить требование к длительности горения дуги в течение 1 с, так как феррорезонансные явления во время горения дуги не возникают, а обеспечить её устойчивое горение при малых ёмкостях сети оказывается физически невозможно. Авторы статьи рекомендуют ограничить длительность дуговых замыканий до времени 0,1 с, что соответствует пяти периодам промышленной частоты.

В некоторых случаях феррорезонанс возникает на частотах, не кратных 50 Гц. Пример такого процесса показан на рис. 9. В этом случае действующие значения токов, протекающих по обмоткам ТН следует определять за время, равное периоду огибающей амплитуд (штриховая линия на осциллограмме тока рис. 9, б).

Однако всё изложенное об устойчивом феррорезонансном режиме, лишается практического смысла при учёте следующего обстоятельства. Во всех случаях устойчивого феррорезонанса (на частотах от 12,5 до 50 Гц) было зарегистрировано смещение нейтрали,

Таблица 2

Расчётные действующие значение токов обмоток ВН трансформаторов ЗНОЛ-6 при имитации перемежающегося дугового ОЗЗ ($C_0 = 0,73 \text{ мкФ}$), А

| Интервал интегрирования для нахождения действующего значения | Фаза А | Фаза В | Фаза С |
|---|--------|--------|--------|
| Участок осциллограммы от 1-го замыкания до отключения питания (весь опыт) | 0,36 | 0,58 | 0,16 |
| Участок осциллограммы с незатухающим хаотическим феррорезонансом | 0,34 | 0,37 | 0,25 |
| Участок осциллограммы с установившимся феррорезонансом на частоте 50 Гц | 0,66 | 1,15 | 0,003 |

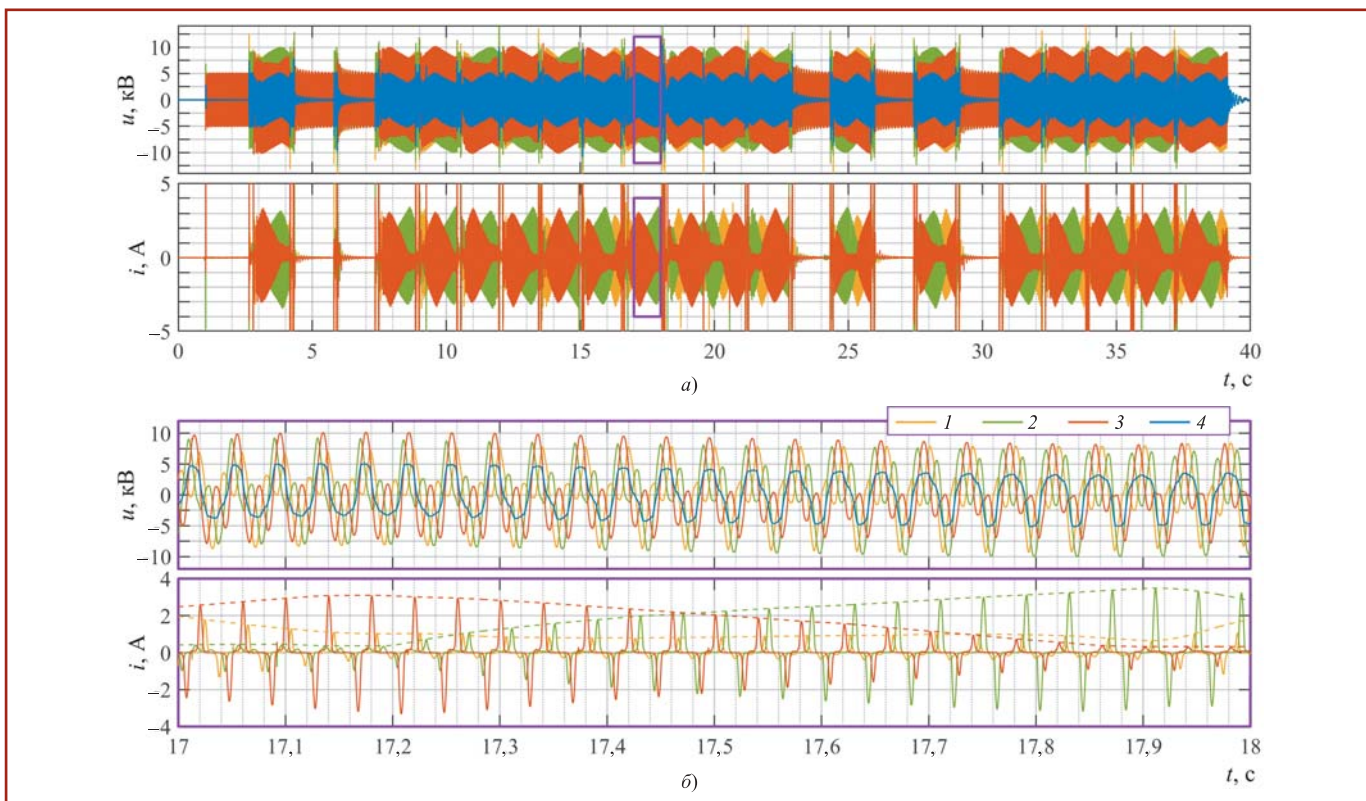


Рис. 9. Осциллограммы напряжений в испытательной схеме и токов через трансформаторы ЗНОЛ-6 в режиме имитации перемежающегося дугового ОЗЗ ($C_0 = 2,2 \text{ мкФ}$):

a — в течение всего испытания; *b* — устойчивый феррорезонанс на частоте, не кратной 50 Гц; 1 — напряжение (ток) фазы А; 2 — напряжение (ток) фазы В; 3 — напряжение (ток) фазы С; 4 — напряжение смещения нейтрали

составляющее десятки процентов от номинального фазного напряжения сети. Даже если ток в первичной обмотке ТН не превышает предельно допустимое значение по условию термической стойкости, допускать такой режим в эксплуатации нельзя. В соответствии с действующими нормами длительно допустимое напряжение смещения нейтрали не должно превышать 15 % фазного напряжения сети. Поэтому, одним из критериев успешности испытаний, по нашему мнению, должно являться полное отсутствие устойчивого феррорезонанса во всем нормированном диапазоне ёмкостей сети.

Для трансформаторов ЗНОЛ-6 были также проведены испытания при подключении к выводам «разомкнутого треугольника» дополнительных вторичных обмоток демпфирующего резистора 25 Ом. Результаты показали, что эффективность резисторов ограничена: из пяти значений имитируемой ёмкости нулевой последовательности сети, для которых при отсутствии резистора был зафиксирован устойчивый феррорезонанс, исключить опасные феррорезонансные явления удалось только при $C_0 = 0,73 \text{ мкФ}$. При больших значениях C_0 в опытах наблюдался устойчивый феррорезонанс. Данный результат подтвердил качественные соображения, высказанные в [5] об эффективности резисторов только для сетей с малыми ёмкостными токами ОЗЗ. В настоящей работе эффективность резисторов

была подтверждена только для токов I_c менее 0,8 А.

В заключение отметим, что разработка и утверждение ПНСТ 319–2018 — большой шаг вперёд на пути к повышению надёжности сетей 6 – 35 кВ с изолированной нейтралью. Сетевым компаниям рекомендуется устанавливать в сети только антирезонансные ТН, прошедшие испытания в соответствии с этим стандартом. Тогда перед сменой статуса стандарта на ГОСТ Р в него удастся внести полноценные коррективы с учётом практики его применения.

Выводы

1. На испытательном стенде ОАО «РЭТЗ Энергия» проведены экспериментальные испытания трёхфазной группы однофазных трансформаторов напряжения ЗНОЛ-6 и антирезонансных трансформаторов напряжения НАМИ-6.

2. Подтверждены антирезонансные свойства трансформаторов типа НАМИ во всем диапазоне ёмкостных токов сети.

3. Для трансформаторов типа ЗНОЛ в режиме имитации перемежающихся дуговых замыканий зарегистрированы устойчивые и затухающие феррорезонансные процессы на частотах от 12,5 до 50 Гц.

4. В новой редакции стандарта [1] необходимо расширить диапазон значений имитируемой ёмкости нулевой последовательности сети и разрешить использовать конденсаторы только

в фазах испытательной схемы без подключения конденсатора в нейтральную точку схемы. При имитации дуговых замыканий рекомендуется сократить время существования замыкания до 0,1 с. Критерии успешности испытаний должны быть дополнены требованиями отсутствия устойчивого феррорезонанса и перегорания предохранителей, если они входят в комплект поставки трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПНСТ 319–2018. Трансформаторы измерительные. Часть 3. Технические условия на индуктивные трансформаторы напряжения. — М.: Стандартинформ, 2018.
2. ГОСТ 8024–90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 1990.
3. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / под общей ред. Д. В. Разевига. — М.: Энергия, 1976. — 488 с.
4. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. — СПб.: ДЕАН, 2013. — 706 с.
5. Поляков В. С. Условия возникновения и существования феррорезонанса в цепях с электромагнитными измерительными ТН // Энергоэксперт. 2014. № 1. С. 29 – 36.