

РАЗРАБОТКА НАЛИ-НТЗ-10(6) – ОЧЕРЕДНОЙ ШАГ К ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТИРЕЗОНАНСНЫХ ТН

ЗИХЕРМАН М.Х., АЛЬБЕКОВ В.Х., БАДУЛИН Д.Н.

В октябре 2013 года вступило в действие «Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе», в котором четко прописаны основные требования к электромагнитным трансформаторам напряжения. Данный документ, помимо основных [1], предъявляет к электромагнитным трансформаторам напряжения (ТН) 6–10 кВ ряд корпоративных [2] требований.

К корпоративным требованиям относятся:

- антирезонансность конструкции;
- отсутствие необходимости ремонта в течение всего срока службы;
- применение литых коррозионостойких корпусов;

- пожаро- и взрывобезопасность конструкции;
- наличие отдельной вторичной обмотки для целей учета электроэнергии, с классом точности не ниже 0,5;
- наличие не менее двух вторичных обмоток.

Требование к антирезонансности конструкции ТН довольно сложное и неоднозначное понятие. Оно применимо только к ТН, предназначенным для контроля изоляции сети, и имеющим заземляемую обмотку высокого напряжения. В ноябре 2014 года вышел документ «ФСК ЕЭС» [3], в котором изложены основные причины повреждаемости и изложены требования к конструкции электромагнитных ТН:

- не вызывать самим устойчивого феррорезонанса;
- не повреждаться при длительных однофазных замыканиях сети на землю через перемежающуюся дугу;
- не повреждаться при устойчивом феррорезонансе емкости сети с нелинейной индуктивностью других трансформаторов (силовых или измерительных).

Согласно этому документу [3] и в связи с отсутствием действующей утвержденной методики проверки антирезонансных свойств ТН, каждый производитель должен определить для своего типа ТН степень его устойчивости к каждому виду возможного феррорезонанса и представить потребителю протоколы испытаний.

В соответствии с этими требованиями в 2014 году на производственной базе ООО «НТЗ «Волхов» был разработан и запущен с серийное производство трехфазный антирезонансный трансформатор напряжения НАЛИ-НТЗ-10(6) (далее по тексту – трансформатор) в цельнолитом корпусе. Кроме этого, была разработана методика проведения испытаний на устойчивость к резонансным явлениям и собрана испытательная лаборатория, позволяющая моделировать аварийные режимы работы ТН.

Трансформатор является трехфазным масштабным преобразователем напряжения в сетях 10(6) кВ с неэффективно заземленной нейтралью и предназначен для передачи информации:

- приборам коммерческого учета электроэнергии;
- приборам технического учета электроэнергии и цепей измерения, релейной защиты, автоматики и т.д.;
- приборам контроля изоляции сети.

Основные параметры трансформатора приведены в таблице 1.

Кроме требований, изложенных в [1–3], в конструкции были учтены тенденции к улучшению метрологических характеристик и расширению диапазонов нагрузки вторичных обмоток трансформатора:

- наивысший класс точности вторичной обмотки для коммерческого учета электроэнергии повышен до 0,2;
- наивысшие классы точности обеих основных вторичных обмоток



Рис. 1. НАЛИ-НТЗ-10(6)

(0,2 и 0,5) нормированы при их одновременной нагрузке;

■ увеличен диапазон изменения вторичных нагрузок в пределах установленного класса точности от 0 до 100 % номинального значения. Это освобождает эксплуатацию от необходимости добавлять нагрузку вторичных обмоток ТН при использовании малоомощной микропроцессорной техники во вторичных цепях.

НАЛИ-НТЗ-10(6) представляет собой аппарат, состоящий из двух трансформаторов, расположенных в едином цельнолитом корпусе.

Первый трансформатор (прямой и обратной последовательностей) – выполнен трехфазным трехстержневым и звезда его первичной обмотки (АВСН) включается в сеть. Второй трансформатор (нулевой последовательности) – выполнен однофазным двухстержневым, его первичная обмотка (НХ) включена между нейтралью звезды трехфазного трансформатора и землей.

Магнитопроводы обоих трансформаторов ленточные разрезные, выполнены из анизотропной холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,3 мм. Номинальная индукция в магнитопроводе трехстержневого трансформатора довольно высока и выбрана, исходя из допустимых погрешностей при наибольшем рабочем напряжении прямой последовательности. Номинальная индукция в магнитопроводе трансформатора нулевой последовательности в несколько раз ниже, чтобы он мог успешно противостоять феррорезонансным процессам в канале нулевой последовательности сети. Этот канал образуется между соединенными вместе тремя фазными проводами сети и землей.

Обмотки обоих трансформаторов слоевые и выполнены из медного провода с двойной эмалевой изоляцией и температурным коэффициентом не ниже 180 °С.

Антирезонансные свойства разработанного ТН достигнуты за счет:

■ схемы соединения обмоток (рис. 2), аналогичной схеме ТН типа НАМИ-10, -95 производства Раменского завода «Энергия», хорошо зарекомендовавшего себя в эксплуатации [4];

■ повышения потокосцепления насыщения путем снижения номинальной индукции в трансформаторе нулевой последовательности;

Таблица 1. Основные параметры трансформатора

Наименование параметра	Значение параметра		
Класс напряжения по ГОСТ 1516.3, кВ	6	10	
Наибольшее рабочее напряжение первичной обмотки, кВ	7,2	12	
Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	6	10	
Номинальное напряжение основных вторичных обмоток ($a_1; b_1; c_1$ и $a_2; b_2; c_2; o_2$), В	100		
Номинальное напряжение дополнительной вторичной обмотки ($a_d; x_d$), В	100		
Номинальный класс точности вторичных обмоток в диапазоне нагрузок $0,0 \div 1,0 S_{ном}$:	основной обмотки ($a_1; b_1; c_1$)	0,2	0,5
	основной обмотки ($a_2; b_2; c_2; o_2$)	0,5	0,5
Номинальные трехфазные мощности основных вторичных обмоток, ВА при их одновременной нагрузке при $\cos \varphi = 0,8$:	основной вторичной обмотки ($a_1; b_1; c_1$)	30	60
	основной вторичной обмотки ($a_2; b_2; c_2; o_2$)	60	90
Номинальный класс точности дополнительной вторичной обмотки ($a_d; x_d$)	3Р		
Номинальная мощность дополнительной вторичной обмотки ($a_d; x_d$), ВА	30		
Предельная мощность вне класса точности, ВА:	первичной обмотки (А, В, С);	1000	
	основной вторичной обмотки ($a_1; b_1; c_1$);	450	
	основной вторичной обмотки ($a_2; b_2; c_2; o_2$);	450	
	дополнительной вторичной обмотки ($a_d; x_d$)	100	
Номинальная частота, Гц	50		
Группа соединения обмоток	Y _n /Y/Y _n /П-0		
Габаритные размеры мм	без предохранителей	4400 × 320 × 360	
	с установленными предохранителями	4400 × 320 × 560	
Полная масса трансформатора, не более, кг	без предохранителей	74	
	с установленными предохранителями	78	

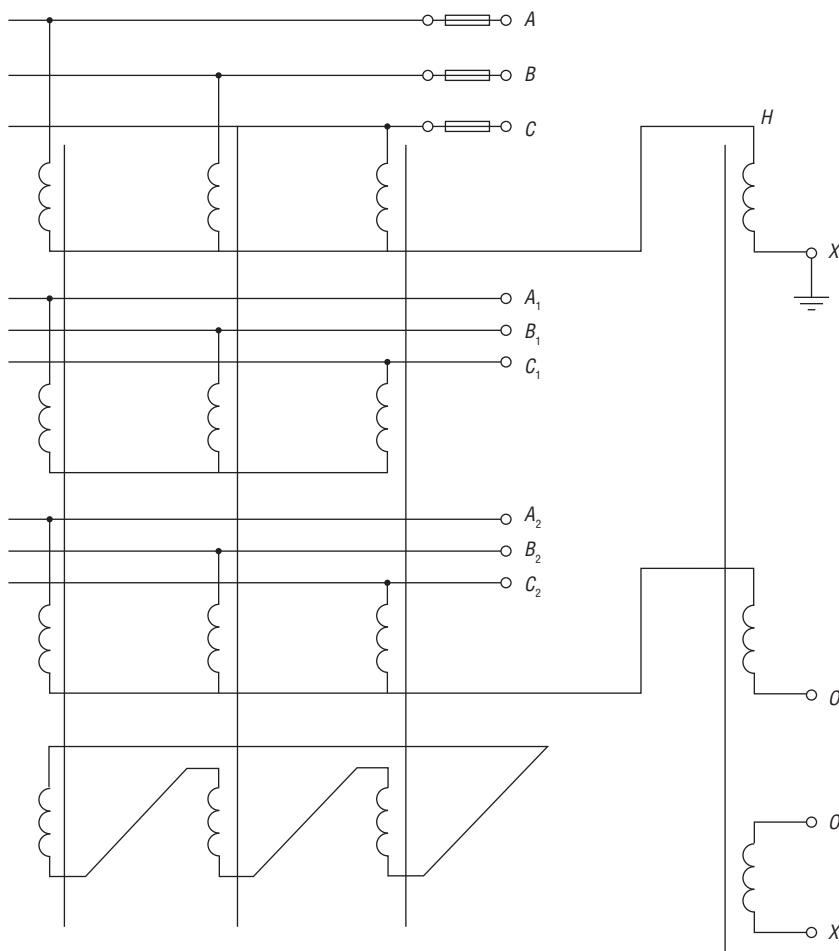


Рис. 2. Электрическая схема соединения обмоток

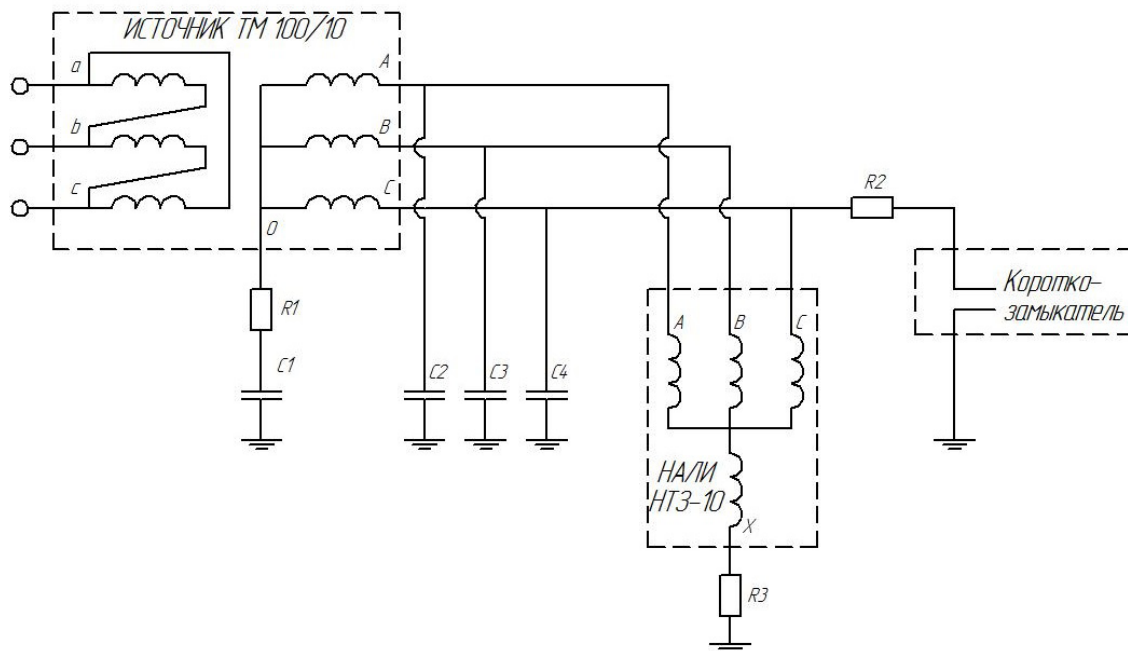


Рис. 3. Схема испытания трансформатора

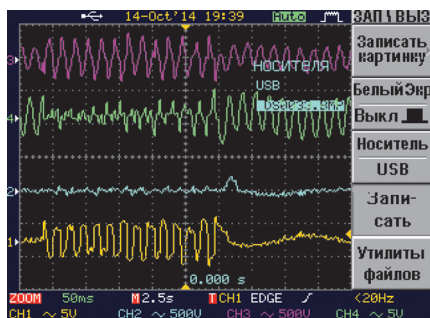


Рис. 4. Осциллограмма однофазного замыкания сети на землю через перемежающуюся дугу

■ отказа от использования гасительных сопротивлений (внешних, внутренних).

Для подтверждения антирезонансных свойств трансформатора были проведены следующие испытания на устойчивость:

- к длительным однофазным замыканиям сети на землю через перемежающуюся дугу;
- к режиму «опрокидывания фазы»;
- к явлению «ложной земли».

Перемежающаяся дуга на ветру представляет собой быстродействующий включатель-выключатель и способна загораться и гаснуть десятки раз в секунду, переводя сеть из симметричного состояния в несимметричное и обратно. При этом происходит заряд емкостей сети, то их последующий разряд через первичные обмотки ТН. Для теплового повреждения

обычных ТН в таком режиме достаточно 15–20 мин.

В обычной трехфазной группе однофазных ТН одна из здоровых фаз (опережающая) получает максимальную тепловую нагрузку и повреждается раньше других.

В трансформаторе НАЛИ-НТЗ-10(6) разряд емкостей сети на землю происходит последовательно через первичные обмотки трехфазного и однофазного трансформаторов. Однофазный трансформатор имеет большой запас по индукции насыщения, и разряд через него начинается не сразу после погасания дуги, а с некоторой задержкой. За время задержки дуга обычно загорается вновь, и разряд емкостей сети через ТН прекращается. В результате, тепловое воздействие тока разряда уменьшается и стойкость ТН к перемежающейся дуге увеличивается.

Испытания трансформатора проводились на полномасштабной трехфазной модели сети с током однофазного замыкания на землю 3,0 А (рис. 3).

Емкость фаз сети на землю моделировалась соответствующими высоковольтными конденсаторами. Номинальное напряжение 10 кВ подавалось на модель от трехфазного трехстержневого повышающего трансформатора ТМ-100/10/0,4. Модель питалась от трехфазной общезаводской сети 0,4 кВ мощностью 630 кВА. Однофазное дуговое замыкание на землю осуществлялось

специальным дуговым замыкателем, представляющим собой подвижную стальную пластину, обдуваемую потоком воздуха с регулируемой скоростью от 0 до 15 м/с. Дуговой процесс фиксировался на четырехлучевом цифровом осциллографе (осциллограмма рис. 4).

На этих осциллограммах приведены три напряжения и один ток. Напряжения на осциллограф подавались от вторичных обмоток трансформатора, а для записи тока в заземленной нейтрали обмоток ВН использовался резистивный шунт R3. Дуговой замыкатель был установлен на фазе С.

На осциллографе в одном кадре удалось последовательно записать три режима: симметричный (1,5 периода), однофазное замыкание фазы С на землю через перемежающуюся дугу (14 периодов) и переходный процесс восстановления симметрии (10 периодов). В режиме однофазного замыкания на землю пробивные напряжения дугового промежутка постепенно повышались от нуля до напряжения погасания дуги. Напряжение «здоровой» фазы В при дуге повышалось от фазного до линейного. Напряжение нулевой последовательности U_0 при отсутствии дуги снижалось до напряжения небаланса (менее 3 В), а при горении дуги повышалось до 100 В (плюс перенапряжение).

Ток (I_0) в нейтрали обмоток ВН трансформатора был близок к нулю,

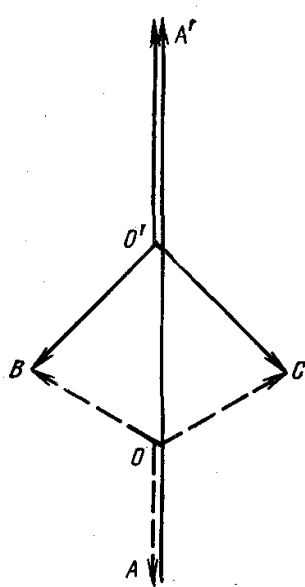


Рис. 5. Векторная диаграмма из [5], поясняющая механизм повышения напряжения при опрокидывании фазы

как в нормальном симметричном режиме, так и в режиме горения перемежающейся дуги. Значительный ток возник только после окончательного погасания дуги и вызван стеканием зарядов емкостей сети через первичные обмотки ТН на землю. Возможны также броски тока в нейтрали при зажигании дуги в одну полярность и т.п. Как показывает практика, подобные броски при горении дуги в реальной сети возникают редко и не представляют серьезной опасности для трансформатора. В результате за время горения перемежающейся дуги в течение одного часа обмотки ТН нагрелись менее чем на 10 °С.

Большую опасность для обычных ТН, контролирующих изоляцию сети, представляет режим опрокидывания фазы у одного из трех фазных напряжений. Возникает он при обрыве одного из проводов сети или перегорании одной из плавких вставок у предохранителя силового потребительского трансформатора 10/0,4 кВ, имеющего обычно изолированную нейтраль обмоток ВН. При заземлении оборванной фазы со стороны потребительского трансформатора он может входить в устойчивый феррорезонанс на частоте 50 Гц с емкостями остальной части сети, включая источник питания и сборные шины вместе с установленным на них ТН.

Этот феррорезонансный процесс сопровождается образованием новой

трехфазной системы напряжений. Новая система может иметь либо прямое, либо обратное чередование фаз, что во многом случайно. В случае прямого чередования фаз опрокидывания не происходит, и процесс сопровождается неопасными повышениями напряжения. В случае обратного чередования фаз опрокидывание произойдет обязательно [5] и будет сопровождаться более чем трехкратным повышением напряжения на оборванной фазе сети. Векторная диаграмма процесса, заимствованная из [5], приведена на рис. 5.

Для сети 10 кВ указанное повышение относительно земли составляет около 20 кВ. Столь высокое напряжение приводит к резкому возрастанию намагничивающего тока в одной из фаз трехфазной группы обычных ТН, с последующим быстрым ее повреждением (десятки секунд). Для потребительского трансформатора, участвующего в феррорезонансе, напротив, особой опасности нет, однако его многочисленные трехфазные двигатели 0,4 кВ вынуждены вращаться в другую сторону.

Трансформатор НАЛИ-НТЗ-10(6) устойчив к повышению фазного напряжения при опрокидывании одной из фаз сети. Такая устойчивость обеспечивается резким снижением номинальной индукции в магнитопроводе трансформатора нулевой последова-

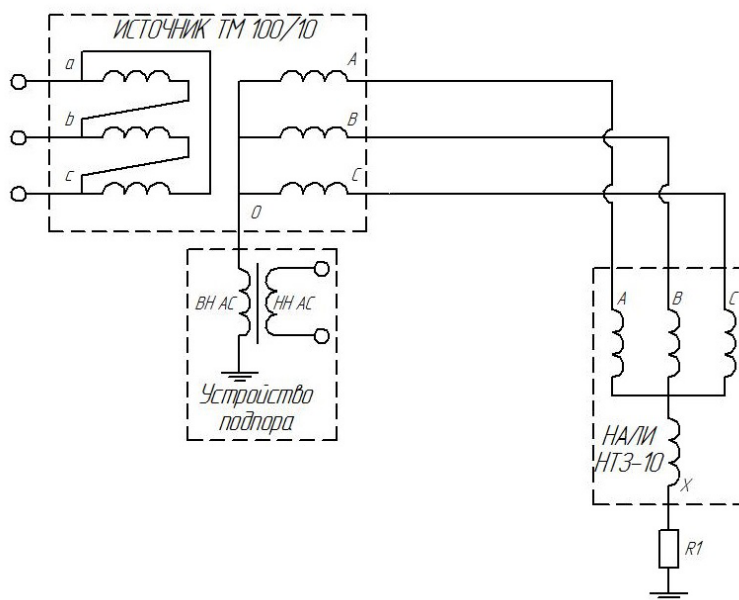


Рис. 6. Схема подпора нейтрали 10 кВ напряжением 16 кВ от постороннего источника

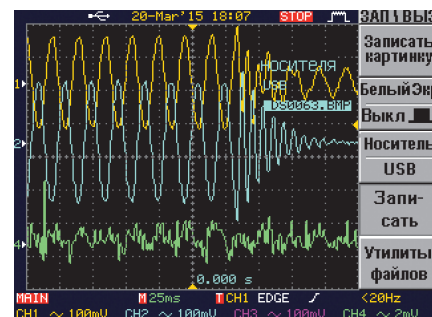


Рис. 7. Осциллограмма отключения опорного напряжения при испытании ТН на устойчивость к опрокидыванию фазы

тельности, на который ложится большая часть приложенного напряжения. Благодаря этому трансформатор нулевой последовательности практически не насыщается и способен длительно выдерживать повышенное напряжение (более одного часа).

Устойчивость трансформатора к режиму опрокидывания фазы напряжения одной из фаз сети проверялась в течение одного часа путем подпора нейтрали 10 кВ питающего трансформатора ТМ 100/10/0,4 напряжением 16 кВ от постороннего источника (рис. 6).

Трехфазный повышающий трансформатор включался в заводскую сеть 0,4 кВ. Трехфазное напряжение 5,8 кВ прямой последовательности сети суммировалось с напряжением 16 кВ подпора и подавалось на три фазы ТН. На рис. 7 приведены осциллограммы од-

Таблица 2. Первичные и вторичные токи (А) при коротких замыканиях на выводах вторичных обмоток

Режим работы первичной сети	Вид к.з.	A	B	C	a ₁	b ₁	c ₁	a ₂	b ₂	c ₂	o ₂	a _н , x _д
Без однофазного замыкания сети на землю	3ф	1,4	1,4	1,4	140	140	140	0	0	0	0	0
	3ф	0,9	0,9	0,9	0	0	0	90	90	90	0	0
	2ф	1,1	1,1	0	110	110	0	0	0	0	0	0
	2ф	0,8	0,8	0	0	0	0	80	80	0	0	0
	1ф	0,3	0,15	0,15	0	0	0	30	0	0	30	0
При однофазном замыкании фазы А на землю	3ф	0,9	0,9	0,9	0	0	0	90	90	90	0	0
	2ф	0,74	0,74	0	0	0	0	74	74	0	0	0
	1ф	0,19	0,37	0,19	0	0	0	0	56	0	56	0
	a _н , x _д	0,15	0,15	0,15	0	0	0	0	0	0	0	26

ного из фазных напряжений ТН и его напряжения $3U_0$. Поскольку между суммируемыми напряжениями существовал угол в 30 градусов, изображенное на осциллограмме фазное напряжение составляло 21 кВ относительно земли. Из осциллограммы следует, что подпорное напряжение после его отключения спадало до нуля не сразу, а путем затухающих колебаний. После этого напряжение источника относительно земли снизилось до 5,8 кВ.

Ненагруженный ТН обычной конструкции представляет собой нелинейную индуктивность, которая иногда вступает в устойчивый феррорезонанс с сетью, емкость которой может варьироваться в широких пределах. Соответственно и феррорезонанс может возникать на разных частотах – от гармонического (50 Гц) до субгармонического (ниже 50 Гц). Все зависит от соотношения сопротивлений ТН и емкости сети. Эти сопротивления всегда имеют разные знаки, но на резонансной частоте становятся близкими между собой по величине.

Как показывает практика, реальные соотношения сопротивлений емкости сети и индуктивности существующих групп однофазных ТН таковы, что в сети 6–10 кВ феррорезонанс охотно возникает на частоте 50 Гц, а в сети 35 кВ – на второй, третьей и т.д. субгармониках. Нелинейные феррорезонансные колебания в трехфазной сети возникают в канале нулевой последовательности и поддерживаются несимметрией в намагничивающих фазных токах ТН при различной степени их насыщения. В сети 6–10 кВ феррорезонанс охва-

тывает область малых значений емкостей, характерных для сборных шин КРУ и т.д. В эксплуатации это явление известно, как «ложная земля». Однако токи в первичных обмотках ТН при этом невелики, и, как правило, не могут вызвать их теплового разрушения.

Трансформатор НАЛИ-НТЗ-10(6) свободен от всех видов феррорезонанса. Это многократно проверялось путем возбуждения переходных процессов на полномасштабных моделях сетей с различными емкостями.

Выходное напряжение ТН подается во вторичные цепи через устройства защиты, призванные отключать короткие замыкания в этих цепях. Обычно это автоматические выключатели, но могут применяться и предохранители. Номинальные токи устройств защиты выбираются по току предельной мощности обмоток ТН, а надежность срабатывания проверяется по току короткого замыкания, который должен быть не меньше определенной величины.

Значения тока короткого замыкания должны сообщаться производителем ТН в сопроводительной документации. Без этого проектанты не смогут грамотно выбрать защитные устройства и обеспечить температурную стабильность как самого ТН, так и его вторичных цепей. Уровень токов короткого замыкания на выводах вторичных обмоток НАЛИ-НТЗ-10(6) при номинальном напряжении в первичной сети приведен в таблице 2. Отсутствие тока на каком-либо выводе говорит о его неучастии в процессе короткого замыкания.

Как следует из таблицы 2, токи короткого замыкания ТН довольно значительны и способны вызвать термические повреждения обмоток. Вторичные защитные устройства препятствуют этому, и потому они необходимы.

ВЫВОДЫ

1. На ООО «НТЗ «Волхов» разработан и поставлен в серийное производство трансформатор напряжения типа НАЛИ НТЗ-10(6), который не только сохранил все антирезонансные свойства ТН типа НАМИ-10, -95, но и, благодаря современным техническим решениям, повысил свою эксплуатационную привлекательность.

2. На ООО «НТЗ «Волхов» существует испытательная база для проведения испытаний ТН классом напряжения 6–35 кВ на устойчивость к резонансным явлениям, которая позволяет моделировать аварийные режимы и испытывать трансформаторы напряжения любых конструкций.

3. Работы по совершенствованию программ и методик испытаний трансформаторов напряжения на устойчивость к резонансным явлениям нужно продолжить. Необходимо создать единый регламентирующий документ, выполнение требований которого будет обязательным для всех производителей ТН, поставляющих свою продукцию на территорию России.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Основные технические требования.
- Положение ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе (Утв. 23.10.2013).
- Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6–750 кВ. СТО «ФСК ЕЭС» 56947007-29.240.10.191. – 2014 (Утв. 19.11.2014).
- Фишман В.С. Трансформаторы напряжения. Способы устранения феррорезонансных явлений. Новости Электротехники № 6 (66), 2010 г.
- Дмоховская Л.Ф. Техника высоких напряжений. 1976 г.



НТЗ ВОЛХОВ
Невский Трансформаторный Завод

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ – НОВЫЕ РЕШЕНИЯ

ООО «Невский Трансформаторный Завод «Волхов»

Адрес: 173008, РФ, г. Великий Новгород, ул. Северная 19, Тел.: +7 (8162) 948-102, 948-103, E-mail: ntvz@ntzv.ru
Москва офис, тел.: +7 (495) 221-52-02 ■ Санкт-Петербург офис, тел.: +7 (812) 677-93-55