УДК 621.314

**ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
С ЕМКОСТНЫМИ ДЕЛИТЕЛЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ
ИСПЫТАНИЙ В УСТАНОВИВШЕМСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ**

Андрианова Людмила Прокопьевна

д-р техн. наук, профессор

Павлова Зухра Хасановна

д-р техн. наук, профессор

Рябишина Лилия Амировна

канд. техн. наук, доцент

Хакимьянов Марат Ильгизович

д-р техн. наук, профессор

Хазиева Регина Тагировна

канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО Уфимский государственный
нефтяной технический университет

Аннотация: В статье приведены: обобщенная структурная схема и компоненты измерительного трехфазного электронного трансформатора напряжения (ЭТН); основные и специфические характеристики ЭТН в нормальном и аварийных режимах работы электрической сети. Рассмотрены переходные режимы, вызванные коммутационными процессами. Для моделирования испытаний переходных режимов вследствие коммутации принята схема замещения ЭТН с учетом параметров сети и нелинейности. Приведены математические соотношения для определения основных характеристик и мгновенной погрешности ЭТН при переходных процессах вследствие короткого замыкания в первичной цепи с остаточным зарядным потенциалом, а также схема и алгоритм работы испытательной установки для малых значений постоянной времени ЭТН. Результаты получены на основе обзора и анализа действующих нормативных документов.

Ключевые слова: Измерительные трансформаторы, электронные трансформаторы напряжения, структура и компоненты, установившееся

состояние, переходный процесс, схема замещения, погрешность коэффициента преобразования, испытание.

PRINCIPLES OF CONSTRUCTING A GENERALIZED MODEL OF MEASURING ELECTRONIC TRANSFORMERS WITH CAPACITIVE VOLTAGE DIVIDERS FOR TESTING IN STEADY-STATE AND TRANSIENT MODES NETWORK

Andrianova Lyudmila Prokofievna
Pavlova Zuhra Khasanovna
Ryabishina Liliya Amirovna
Khakimjanov Marat Ilgizovich
Khazieva Regina Tagirovna

Abstract: The article presents: a generalized block diagram and components of a measuring three-phase electronic voltage transformer(ETN); the main and specific characteristics of ETN in normal and emergency modes of operation of the electric network. Transient modes caused by switching processes are considered. To simulate tests of transient modes due to switching, an ETN replacement scheme is adopted, taking into account network parameters and nonlinearity. Mathematical relations for determining the main characteristics and instantaneous error of the ETN in transient processes due to a short circuit in the primary circuit with a residual charging potential, as well as the scheme and algorithm of the test setup for small values of the ETN time constant are presented. The results were obtained on the basis of a review and analysis of existing regulatory documents.

Key words: Measuring transformers, electronic voltage transformers, structure and components, steady state, transient, substitution circuit, conversion factor error, test.

Электронный трансформатор напряжения (ЭТН) представляет собой устройство, состоящее из одного или более датчиков напряжения, предназначенных для пропорционального преобразования первичного напряжения во вторичное с целью передачи сигнала измерительной информации приборам измерения, защиты, автоматики, сигнализации и управления (рис. 1).

Рис. 1. Структура заземляемого трехфазного ЭТН [2, с. 7]: А, В, С, N... - входы первичного напряжения; а, b, с, n... - выходы вторичного напряжения

Вторичное напряжение ЭТН при рабочих условиях пропорционально первичному и отличается от него углом фазового сдвига, приблизительно равным нулю при соответствующем направлении соединений.

В ЭТН могут использоваться емкостные и резистивно-емкостные делители напряжения и/или оптические устройства, укомплектованные электронными компонентами для передачи и усиления измеренных сигналов [2].

В таблице 1 приведены термины и определения, поясняющие назначение структурных компонентов обобщенной структуры ЭТН.

Таблица 1

Термины и определения структурных компонентов ЭТН

Вторичная цепь	Внешняя цепь, получающая сигналы информации от вторичного конвертера ЭТН.
Место подключения	Место, определенное производителем и применяемое пользователем для подключения электрических кабелей на месте установки или проведения испытаний. При использовании коаксиального кабеля точкой подключения считается только внешний экран.
Первичные входы напряжения:	Входы, на которые подается первичное напряжение к ЭТН.
Первичный датчик напряжения:	Электрическое, оптическое или другое устройство, предназначенное для передачи сигнала к вторичному

	оборудованию напрямую или через первичный конвертер, значение напряжения преобразования которого соответствует напряжению между первичными вводами.
Первичный конвертер:	Устройство, преобразующее сигнал от одного или более первичных датчиков напряжения в сигнал, подходящий для работы устройства сопряжения.
Первичное электропитание:	Электропитание первичного конвертера и/или первичного датчика напряжения (может быть объединено с вторичным электропитанием).
Устройство сопряжения	Устройство, соединяющее первичный конвертер с вторичным на коротких и длинных расстояниях и передающее сигнал от одного к другому. В зависимости от используемой технологии может также использоваться для передачи сигнала мощности.
Вторичный конвертер:	Устройство, преобразующее сигнал, переданный через устройство сопряжения, в величину, пропорциональную напряжению на первичных вводах, и предназначенное для последующего согласования с измерительными приборами, защитными или управляющими устройствами.
Вторичное электропитание:	Электропитание вторичного конвертера (может быть объединено с первичным электропитанием).
Вторичные выводы напряжения:	Выводы для подключения измерительных приборов и защитных или управляющих устройств к цепям напряжения.
Низковольтные компоненты:	Все компоненты, за исключением первичного датчика напряжения

К основным характеристикам ЭТН относятся:

- первичное и вторичное напряжения в установившемся режиме;
- погрешность коэффициента масштабного преобразования напряжения в установившемся режиме;
- угловая погрешность (погрешность угла фазового сдвига напряжения)

Первичное напряжение ЭТН

$$u_1(t) = U_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_1) + U_{1dc} + u_{1res}(t), \quad (1)$$

где U_1 - среднеквадратическое значение первичного напряжения при $U_{1dc} = 0$

и $u_{1res}(t) = 0$;

f - основная частота сети;

U_{1dc} - составляющая напряжения постоянного тока в первичной цепи;

φ_1 - угол фазового сдвига первичного напряжения;

$u_{1res}(t)$ - остаточное напряжение в первичной цепи (утроенное значение напряжения нулевой последовательности), включая гармоническую и субгармоническую составляющие (гармоники и субгармоники);

t - мгновенное значение времени;

Вторичное напряжение ЭТН

$$u_2(t) = U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_2) + U_{2dc} + u_{2res}(t), \quad (2)$$

где U_2 - среднеквадратическое значение вторичного напряжения при $U_{2dc} = 0$

и $u_{2res}(t) = 0$;

f - основная частота сети;

U_{2dc} - составляющая напряжения постоянного тока во вторичной цепи;

φ_2 - угол фазового сдвига вторичного напряжения;

$u_{2res}(t)$ - остаточное напряжение во вторичной цепи (утроенное значение напряжения нулевой последовательности), включая гармоники и субгармоники;

t - мгновенное значение времени.

Погрешность коэффициента масштабного преобразования напряжения в установившемся режиме, ($\delta_{ки}$, %), обусловлена ЭТН при измерении напряжения и возникает при коэффициенте масштабного преобразования (K_u), отличном от номинального коэффициента трансформации ЭТН ($K_{uномТР}$):

$$\delta_{ки} = \left[\frac{K_{uномТР} \cdot U_2 - U_1}{U_1} \right] \cdot 100, \quad (3)$$

где $K_{uномТР}$ - номинальный коэффициент трансформации;

U_1 - действительное первичное напряжение;

U_2 - действительное вторичное напряжение при U_1 , применяемом при рабочих условиях измерений.

Погрешность $\delta_{ки}$ относится только к компонентам, зависящим от номинальной частоты как на первичном, так и на вторичном напряжениях, а не к зависящим от напряжения постоянного тока.

Угловая погрешность ($\Delta\varphi_u$), вызванная смещением фаз (φ_0) и временем задержки (t_3), характеризуется угловой единицей относительно номинальной частоты и выражается в [рад, сантирад, мин].

$$\Delta\varphi_u = \varphi_u - \varphi_0 + 2\pi \cdot f \cdot t_3;$$

$$\Delta\varphi_u = \varphi_2 - \varphi_1 + 2\pi \cdot f \cdot t_3,$$

где t_3 - время передачи и обработки цифровых данных ЭТН.

При нормальных условиях в сети первичное напряжение (U_1) и частота (f) остаются в пределах установленных ограничений за счет работы системы регулирования в сети:

$$0,8 U_{1ном} \leq U_1 \leq 1,2 U_{1ном};$$

$$0,99 f_{\text{ном}} \leq f \leq 0,01 f_{\text{ном}} .$$

Номинальные значения вторичного напряжения ЭТН (U_2), получающегося питание от биполярного источника напряжения, должны быть равны $U_2 = \pm 12$ или $U_2 = \pm 15$ В, что позволяет получать на выходе максимальные значения линейного выходного сигнала, равного $U_2 = \pm 10$ В.

Пример: С учетом коэффициента напряжения $k_1 = 1,9$ и коэффициента, отражающего напряжение смещения, вызванного остаточными зарядами, $k_2 = 2$ и при номинальном среднеквадратическом значении $3,25/\sqrt{3}$ В для заземляемых ЭТН максимальное (пиковое) значение вторичного напряжения равно

$$U_{2\text{макс}} = k_1 \cdot k_2 \cdot 3,25\sqrt{2} / \sqrt{3} = 10,08 \text{ В}.$$

В установившемся состоянии значения составляющей смещения постоянного напряжения ($U_{1\text{dc}}$) и ($U_{2\text{d}}$) остаются неизменным:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U_{1\text{dc}}(t) = U_{1\text{dc}} ;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} U_{2\text{dc}}(t) = U_{2\text{dc}} .$$

В аварийных режимах работы в сети возникают переходные процессы, обусловленные перенапряжением в сетях, короткими замыканиями на землю в трехфазной сети с незаземленной нейтралью, атмосферными разрядами на высоковольтных линиях электропередач, коммутационными процессами.

Для ЭТН с емкостным делителем в качестве датчика высокого напряжения наиболее опасными являются переходные процессы в сети вследствие коммутации, поскольку ЭТН становится объектом образования эффекта остаточного заряда. Во время размыкания линии или кабеля под напряжением в ЭТН, в том числе и на емкостном делителе, может остаться заряженный потенциал. Если линия не заземлена или не разряжается подключенным к ней низкоимпедансным устройством, заряд может сохраняться в течение нескольких дней [2, с. 42]. Сущность этого явления поясняется с помощью схемы (рис. 2).

Рис. 2. Схематическая диаграмма, объясняющая эффект остаточного заряда: [2, с. 42] C_L - емкость линии; U_L - напряжение линии; U_P - напряжение разряда; U_S - напряжение на нагрузке; C_1 - первичный конденсатор делителя; q_1 – заряд конденсатора C_1 ; C_2 - вторичный конденсатор делителя; R_2 - параллельный резистор

Уровень зарядного потенциала зависит от фазы напряжения в момент отключения. Наихудший случай наблюдается при пиковом значении напряжения U_1 , когда первичный конденсатор делителя C_1 заряжен (сохраняя заряд $q_1 = C_1 \cdot U_1$), а вторичный C_2 разряжен параллельным резистором R_2 , подключенным к устройству. Когда линия включена снова, низковольтное внутреннее сопротивление сети разряжает ее мгновенно, что вынуждает заряд q_1 перетекать от C_1 к C_2 . Таким образом, C_2 будет заряжаться при условии:

$$U_2 = -q_1 / (C_1 + C_2) = -U_1 \cdot C_1 / (C_1 + C_2),$$

что приблизительно равно: $-U_1 \cdot (C_1 / C_2)$.

Это напряжение уменьшается по экспоненте с постоянной времени $R_2 \cdot C_2$, наложенной на синусоидальный сигнал, что в результате приводит к существенной погрешности измерения (**рис. 3**). Наихудший эффект от этого апериодического процесса заключается в магнитном насыщении сердечников, встроенных непосредственно в ЭТН или в подключенные к нему устройства защиты.

Рис. 3. Напряжения при наличии эффекта остаточного заряда [2, с.43]: *a* - напряжение на первичных вводах; *б* - напряжение на вторичных выводах

Для исключения этого эффекта рекомендуется использовать смешанный резистивно-емкостной делитель, передающий неискаженный сигнал в течение переходного процесса [2].

Теоретически переходной процесс, возникающий в сети, может быть описан с использованием уравнений (1) и (2) для $u_1(t)$ и $u_2(t)$, в которых параметры f , U_1 , U_2 , U_{1dc} , U_2 , φ_1 , φ_2 определяются для установившегося режима. Внезапное изменение одного или более параметров f , U_1 , U_2 , U_{1dc} , U_2 ,

φ_1 , φ_2 , представленных в уравнениях (1) и (2), создает условия для возникновения переходных процессов.

Представление о качестве работы ЭТН при переходных процессах, полученное на основе сравнения $u_2(t)$ и $u_1(t)$, отражено в таблицах 2, 3.

Таблица 2

Эффект короткого замыкания в первичной цепи [2, с. 44]

$ u(t) $	$t < t_0^*$	$t = t_0$	$t \geq t_0 + (1/f_{\text{ном}})$
$ u_1(t) $	см. уравнение (1)	0	0
	$K_u \cdot U_{1\text{ном}}$	0	0
$ u_2(t) $	см. уравнение (2)	$ u_2(t_0) $	$\leq 0,1 u_2(t < t_0) $
t_0^* - время короткого замыкания.			

Таблица 3

Эффект зарядного потенциала [2, с. 44]

U	$t < t_0^*$	$t = t_0$	$t_0 < t < t_1$	$t \geq t_1^*$
U_1	$K_u \cdot U_{1\text{ном}}$	0	0	$K_u \cdot U_{1\text{ном}}$
$U_{1\text{dc}}$	0	$\pm K_u \cdot U_{1\text{ном}}\sqrt{2}$	$\pm K_u \cdot U_{1\text{ном}}\sqrt{2}$	0
$ u_2(t) $	см. уравнение (2)	$ u_2(t_0) $	$U_{2\text{dc}}(t)$	*
t_0^* - время размыкания автоматического выключателя. t_1^* - время повторного включения автоматического выключателя. * - пределы по [2, п. 13.6.2]				

В таблице 3 представлен наихудший случай, когда происходит размыкание линии при t_0 и ее повторном включении при t_1 с противоположной для U_1 полярностью.

Исследование ЭТН в электрической сети в переходном режиме предлагается согласно [2] проводить моделированием с использованием программы ЕМТР для расчета электромагнитных переходных процессов. Для этого строится модель (схема замещения ЭТН), на основе которой производится проверка корректности поведения автоматического выключателя в электрической сети вместо реальных испытаний.

К модели ЭТН при переходном процессе предъявляются требования:

- возможность ее применения при коротком замыкании первичных вводов и при повторном включении линии с остаточными зарядами;
- модель должна принимать в расчет нелинейность ЭТН;
- модель должна учитывать параметры сети и нелинейность индуктивного магнитного трансформатора (TR).

Этим требованиям соответствует упрощенная схема модели ЭТН при переходном процессе, представленная на **рис. 4**.

Рис. 4. Пример упрощенной схемы-замещения ЭТН [2, с.44]: C_1 , C_2 - компоненты емкостного делителя напряжения; A - идеальный усилитель с единичным усилением напряжения; TR - индуктивный магнитный трансформатор; R_2 - входной импеданс усилителя; R_s - полный эквивалентный импеданс нагрузки выходной цепи усилителя; R_L - нагрузка трансформатора

Мгновенная погрешность коэффициента масштабного преобразования напряжения при переходном процессе, %, определяется формулой [2]

$$\delta_{ku(t)} = \left(\frac{K_{uномТР} \cdot u_2(t) - u_1(t)}{u_1 \cdot \sqrt{2}} \right) \cdot 100, \quad (4)$$

где $K_{uномТР}$ - номинальный коэффициент трансформации.

Формула (4) может быть представлена в следующем виде

$$\delta_{ku(t)} = \left[u_2(t) - \frac{1}{K_{uномТР}} \cdot u_1(t) \right] \cdot \frac{K_{uномТР}}{u_1 \cdot \sqrt{2}} \cdot 100. \quad (5)$$

Используя формулу (3) для определения погрешности коэффициента масштабного преобразования в установившемся режиме, можно выразить U_1 функцией от U_2

$$U_1 = \frac{K_{uномТР} \cdot U_2}{1 + \delta_{ku} / 100},$$

что позволит перейти от (5) к определению $\delta_{ku(t)}$ по формуле

$$\delta_{ku(t)} = \left[u_2(t) - \frac{1}{K_{u_{номТР}}} \cdot u_1(t) \right] \cdot \frac{1}{u_2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \left(1 + \frac{\delta_{ku}}{100} \right) \cdot 100[\%]. \quad (6)$$

Принимая во внимание, что

$$\frac{\delta_{ku}}{100} \ll 1,$$

можно упростить (6) и получить выражение для $\delta_{ku(t)}$ в виде

$$\delta_{ku(t)} = \left[u_2(t) - \frac{1}{K_{u_{номТР}}} \cdot u_1(t) \right] \cdot \frac{1}{u_2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 100[\%]. \quad (7)$$

При испытании на устойчивость к короткому замыканию в первичной цепи при $u_1(t) = 0$ для $t > 0$ формула для погрешности $\delta_{ku(t)}$ будет иметь вид

$$\delta_{ku(t)} = u_2(t) \cdot \frac{1}{u_2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 100 [\%], \quad (8)$$

где $u_2 \cdot \sqrt{2}$ обозначает пиковое значение вторичного выходного напряжения ЭТН для $t < 0$ (до возникновения короткого замыкания).

Повторное включение линии при наличии в ней остаточного заряда:

Для случая, когда $t < 0$:

$$u_1(t) = u_{1dc}(t) + u_{1res}(t);$$

$$u_2(t) = u_{2dc}(t) + u_{2res}(t);$$

Для случая, когда $t \geq 0$:

$$u_1(t) = U_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_1) + u_{1res}(t);$$

$$u_2(t) = U_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_2) + u_{2dc}(t) + u_{2res}(t);$$

$$\delta_{ku(t)} = \left[u_2(t) - \frac{1}{K_{u_{номТР}}} \cdot u_1(t) \right] \cdot \frac{1}{u_2 \cdot \sqrt{2}} \cdot 100[\%]. \quad (9)$$

После подстановки в (9) соотношений $u_1(t)$ и $u_2(t)$ получим для $\delta_{ku(t)}$

$$\delta_{ku(t)} = \delta_{ku(t)ac} + \delta_{ku(t)3r}, \quad (10)$$

где $\delta_{ku(t)ac}$ – модель мгновенной погрешности ЭТН в установившемся режиме,

$$\delta_{ku(t)ac} = \{ [U_2 \sqrt{2} \sin(2\pi f t + \varphi_2) - (U_1 / K_{u_{номТР}}) \sin(2\pi f t + \varphi_1)] / U_2 \} \cdot 100;$$

$\delta_{ku(t)3r}$ – модель мгновенной погрешности ЭТН в переходном режиме,

$$\delta_{ku(t)3r} = \{ [u_{2dc}(t) + u_{2res}(t) - (u_{1res} / K_{u_{номТР}})] / u_2 \cdot \sqrt{2} \} \cdot 100.$$

Составляющая $\delta_{ku(t)ac}$ содержит только синусоидальные компоненты, поэтому представляет модель погрешности ЭТН в установившемся режиме. Если ЭТН отрегулирован, то этой погрешностью можно пренебречь. В этом случае учитывается только погрешность $\delta_{ku(t)3r}$, являющаяся основной составляющей при переходном режиме.

В соответствии с [2] различают два метода испытания ЭТН: для малых (≤ 100 мс) и больших (>100 мс) значений постоянной времени.

В качестве примера на **рис. 5** приведена схема для проведения испытаний ЭТН с малыми значениями постоянной времени. В состав схемы входят высоковольтный эталонный делитель с одинаковыми коэффициентами напряжения (ЭДН), как и у ЭТН, и откалиброванный дифференциальный усилитель (Диф. усилитель) с полосой, определяемой низкочастотным фильтром.

Для обеспечения в 10 раз более медленного спада первичного напряжения, чем вторичного напряжения ЭТН, из-за наличия зарядного потенциала, емкость линии должна быть ≥ 1000 пФ [2].

Алгоритм действий в зависимости от состояния выключателей СВ1, СВ2 на **рис. 5** приведен в таблице 5.

Рис. 5. Схема для испытаний ЭТН с малыми значениями постоянной времени [2, с.47]: СВ1 и СВ2 – выключатели; $e_1(t)$ - источник номинального напряжения и частоты; e_2 - источник напряжения постоянного тока с номинальным пиковым значением, умноженным на коэффициент заземления k ; $C_{\text{лин}}$ - емкость линии; $e_1(t) = U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$; $e_2 = k \cdot U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}$

Таблица 5

Процессы при размыкании и замыкании выключателей СВ1 и СВ2

СВ1 разомкнут; СВ2 замкнут	Зарядка высоковольтных конденсаторов до значения $k_u \cdot U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}$
СВ1 разомкнут; СВ2 разомкнут	Источник высокого напряжения постоянного тока e_2 отключен от цепи e_1
СВ1 замкнут; СВ2 разомкнут	Повторное включение источника напряжения переменного тока с номинальным значением $U_{\text{ном}}$, которое накладывается на зарядный потенциал напряжения постоянного тока.

ЭТН могут включать передачу цифровой информации и обработку данных с задержкой времени. Необходимое для этого время задержки t_3 может быть учтено в уравнении для вторичного напряжения ЭТН с заменой (t) на $(t - t_3)$

$$u_2(t) = U_2 \sqrt{2} \sin(2\pi f(t - t_3) + \varphi_2) + U_{2dc}(t - t_3) + u_{2res}(t - t_3),$$

где t_3 - время задержки.

В стабильном состоянии время запаздывания t_3 должно быть выражено как $\varphi_{23} = 2\pi f t_3$.

Полный угол фазового сдвига φ_u , $\varphi_u = \varphi_2 - \varphi_1$, в данном случае может быть представлен тремя компонентами

$$\varphi_u = \varphi_{0\text{ном}} + \varphi_{23} + \Delta\varphi_u = \varphi_{0\text{ном}} + 2\pi f t_3 + \Delta\varphi_u,$$

где $\varphi_{0\text{ном}}$ - номинальное значение постоянного смещения угла фазового сдвига ЭТН;

φ_{23} - угол фазового сдвига, вызванный временем задержки;

$\Delta\varphi_u$ - погрешность угла фазового сдвига напряжения.

Пределы полного угла фазового сдвига могут быть выражены как

$$-\varphi_{\text{макс}} \leq \varphi_u \leq \varphi_{\text{макс}}.$$

При этом рассматриваются два варианта:

1) Малые значения t_3 , для которых соблюдается условие

$$-\varphi_{\text{макс}} \leq (\varphi_{0\text{ном}} + \varphi_{23}) \leq \varphi_{\text{макс}}.$$

В этом случае t_3 не влияет на точность и им можно пренебречь.

2) Большие значения t_3 приводят к тому, что

$$(\varphi_{0\text{ном}} + \varphi_{23}) \geq \varphi_{\text{макс}}.$$

и в этом случае им нельзя пренебречь.

Если ЭТН предназначен для использования вместе с электронным трансформатором тока (ЭТТ) [3] при измерении энергии, большое значение φ_{23} (общее для обоих трансформаторов) не будет иметь влияния на точность, если оно удовлетворяет следующему условию [2]

$$-\varphi_{\text{макс}} \leq \varphi_u \leq \varphi_{\text{макс}}.$$

Следовательно, значения $\varphi_{0\text{ном}}$, являющиеся номинальным смещением фазы и время задержки t_z , должны быть указаны в паспортных данных ЭТН.

Выводы.

1. Обобщенная модель ЭТН совместно с программным обеспечением ЕМТР предназначена для проведения имитационных испытаний в нормальном и аварийном режимах функционирования ЭТН, заменяя реальные испытания при невозможности их проведения на объекте.

2. Испытание, проводимое с целью определения влияния времени задержки (t_z) на передачу цифровой информации и обработки данных, может быть выполнено без внешней коррекции номинального времени задержки ($t_{z\text{ном}}$) при отсутствии зависимости между номинальным временем задержки ЭТН и ЭТТ.

3. При совместном использовании ЭТН и ЭТТ, имеющих общее номинальное время задержки ($t_{z\text{ном}}$), испытание может быть выполнено с применением устройства задержки времени, установленного на значение

$t_z = \Delta\varphi_u / (2\pi \cdot f_{\text{ном}})$ в соответствии с указанными в паспортных данных значениями $\Delta\varphi_u$ и $f_{\text{ном}}$, встроенного между эталонным трансформатором и дифференциальным усилителем.

Список литературы

1. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions / введ. 01.01. 2015; акт. 01.02. 2020 //- Москва: Стандартинформ, 2014. – 57 с.

2. ГОСТ Р МЭК 60044-7-2010 Трансформаторы измерительные. Часть 7. Электронные трансформаторы напряжения. Instrument transformers Part 8 Electronic current transformers / введ. 23.05.2012; акт. 12.09.2019 // .- Москва: Стандартинформ, 2012. – 58 с.

3. ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010 Трансформаторы измерительные. Часть 8. Электронные трансформаторы тока. IEC 60044-8:2002 Instrument

transformers Part 8: Electronic current transformers (IDT) / введ. 23.12.2012; акт. 12.09.2019 // .- Москва: Стандартинформ, 2012. – 101 с.

© Л.П. Андрианова, З.Х. Павлова, Л.А. Рябишина, М.И. Хакимьянов,
Р.Т. Хазиева, 2020