

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО АВТОТРАНСФОРМАТОРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СЕТЯХ SMART GRID

Бржезицкий В. А., Гаран Я. А., Троценко Е. А.

## 1. Введение

Интеллектуальные системы управления электроэнергетическими объектами (Smart Grid) получили свое распространение после того, как электронные компоненты, предназначенные для аналогово-цифрового преобразования (АЦП) электрических сигналов, достигли уровня, позволяющего с допустимой минимальной погрешностью воспроизводить в цифровом виде электрические сигналы, получаемые от первичных масштабных преобразователей напряжения и тока. С тех пор микроэлектронная элементная база, используемая в Smart Grid, постоянно совершенствуется, увеличивается частота дискретизации сигналов, количество бит архитектуры микроконтроллеров АЦП, устойчивость к радиопомехам, уменьшается стоимость производства такого цифрового оборудования. Однако слабым звеном в Smart Grid до сих пор остаются первичные (высоковольтные) масштабные преобразователи напряжения и тока, поскольку любые высокоточные АЦП всего лишь преобразовывают сигналы вторичных цепей измерительного высоковольтного оборудования. При этом дополнительную погрешность измерений, а также снижение надежности Smart Grid обуславливают делители напряжения на входах АЦП, необходимость применения которых вызвана тем, что серийные высоковольтные трансформаторы напряжения, как правило, проектируются с вторичными цепями, рассчитанными на номинальные выходные напряжения порядка 100 вольт.

Альтернативным решением в данной ситуации могут быть высоковольтные автотрансформаторы напряжения, выходная часть обмотки которых может быть рассчитана на несколько номинальных выходных напряжений. Поскольку высоковольтные автотрансформаторы напряжения практически не использовались в электроэнергетике, научные исследования их характеристик, параметров работы в режимах, близких к режиму холостого хода (что характерно для нагрузки подключаемой на их выход цифровой техники) в публикациях не исследовались. Также не отражены в публикациях расчеты влияния подключаемой на выход высоковольтного измерительного автотрансформатора напряжения нагрузки на его коэффициент масштабного преобразования. Совокупность этих факторов определяет актуальность исследования особенностей характеристик высоковольтных автотрансформаторов напряжения при их использовании в качестве первичных масштабных преобразователя напряжения в сетях Smart Grid.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

Объектом исследования является математическая модель активной части высоковольтного измерительного автотрансформатора напряжения. В контексте данного исследования необходимо решить задачу определения зависимости коэффициента масштабного преобразования высоковольтного автотрансформатора напряжения от параметров его активной части, значения приложенного напряжения, параметров нагрузки данного автотрансформатора. При этом, особенностью данного исследования является то, что режим работы исследуемого высоковольтного автотрансформатора напряжения является близким к режиму холостого хода. Исследуемая математическая модель является развитием ранее выполненного исследования, посвященного детализации системы уравнений трансформатора [1].

## **3. Цель и задачи исследования**

*Целью исследования* является выяснение потенциальной возможности постепенной замены в сетях Smart Grid высоковольтных трансформаторов напряжения на высоковольтные автотрансформаторы напряжения.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Создать математическую модель активной части высоковольтного автотрансформатора напряжения в виде системы уравнений, позволяющей детализировать параметры обмотки до уровня единичных витков (групп витков).

2. Определить факторы, влияющие на распределение напряжения по виткам обмотки высоковольтного автотрансформатора напряжения в режимах, близких к режиму холостого хода.

3. Сопоставить результаты теоретических расчетов с использованием разработанной математической модели высоковольтного автотрансформатора напряжения с результатами экспериментальных исследований.

## **4. Исследование существующих решений проблемы**

С момента обоснования важности интеллектуального управления электроэнергетическими объектами и сетями множество публикаций на эту тему освещали как важность Smart Grid, так и особенности функционирования таких систем [2–4]. Среди положительных факторов применения Smart Grid в электроэнергетике указывается важность мониторинга перетекания мощности по участкам сети [5, 6], коммерческого учета электроэнергии [7, 8], контроля качества электроэнергии [9]. Отдельная проблема в исследованиях Smart Grid – это вопрос о точности и надежности первичных преобразователей напряжения и тока. Этот вопрос исследовался, например, в [6, 10], однако в данных источниках не рассматривался принципиальный вопрос возможности замены высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения на высоковольтные автотрансформаторы напряжения, имеющие несколько низких (порядка единиц вольт) номинальных выходных напряжений. Вопросы моделирования активной части высоковольтных трансформаторов напряжения рассматриваются в [11]. В [1] предложена математическая модель активной части трансформатора (с нагрузкой), позволяющая детализировать

распределение напряжения по виткам обмоток до уровня единичных витков. Тем не менее, аналогичное рассмотрение моделирования автотрансформатора напряжения с нагрузкой в литературе отсутствует. В [12] рассматривается влияние емкостных токов в обмотке высоковольтного автотрансформатора напряжения на распределение напряжения по виткам, отмечается, что чем выше класс напряжения, тем больше влияние этих токов в режимах, близких к режиму холостого хода. Совокупность рассмотренных материалов указывает на актуальность рассматриваемых задач в контексте возможной интеграции высоковольтных автотрансформаторов напряжения в Smart Grid.

## **5. Методы исследований**

Для решения поставленных задач были использованы методы: математического моделирования на персональном компьютере с использованием программного обеспечения, реализующего метод конечных элементов. Основным материалом исследований является система уравнений высоковольтного автотрансформатора напряжения, детализированная до уровня единичных витков (групп витков) его обмотки.

## **6. Результаты исследований**

Из рассмотренных литературных источников наиболее сходная задача рассмотрена в [1], где предложена система уравнений трансформатора, позволяющая детализировать распределение напряжения по обмоткам трансформатора до уровня единичных витков (групп витков). Предложенная авторами в [1] система уравнений учитывает подключаемую ко вторичной обмотке трансформатора напряжения нагрузку, характеристики магнитной системы, индуктивность рассеяния, активные сопротивления, напряжения и токи отдельных витков (или групп витков) обмоток. Такая система уравнений может быть преобразована в аналогичную систему уравнений для автотрансформатора напряжения. Преимущество системы уравнений, позволяющих детализировать распределение напряжения по виткам обмотки высоковольтного автотрансформатора напряжения, состоит в том, что она позволяет учитывать неравномерное распределение потокоцепления магнитных потоков рассеяния с витками обмотки. Это позволит на этапе проектирования выбирать соотношение витков обмотки автотрансформатора и ее выходных частей для получения больших значений коэффициентов масштабного преобразования напряжения. Такие коэффициенты свойственны системам с подключаемыми на выход высоковольтного автотрансформатора напряжения цифровыми устройствами, не имеющими дополнительного делителя напряжения на входе, что способствует повышению точности таких высоковольтных комбинированных измерительных устройств, а также их надежности.

В [11] рассматривалось влияние расположения витков высоковольтного трансформатора напряжения на значение приведенной эквивалентной индуктивности рассеяния обмоток, которая используется в расчетных схемах замещения трансформатора при проектировании. Как показано авторами в [11], теоретически возможно представить вторичную обмотку трансформатора

напряжения двумя витками (или группами витков), расположенными таким образом, чтобы значение приведенной эквивалентной индуктивности рассеяния для первичной и вторичной обмоток соответствовало заранее определенному значению, в том числе, и нулевому. Подобные исследования являются также весьма актуальными для высоковольтного автотрансформатора напряжения, для которого выходная часть его обмотки может составлять единицы витков, а номинальный коэффициент масштабного преобразования напряжения достигать десятков тысяч единиц.

Система уравнений, предложенная в [1], после ее преобразования для однофазного трансформатора напряжения, обмотки которого имеют группу соединения 1/1-0, может быть описана формулами (1)–(6) с использованием комплексного представления величин:

$$\dot{U}_{i1} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) - j \cdot \omega \cdot \dot{I}_2 \cdot M_{i2}) \cdot W_{i1}; \quad (1)$$

$$\dot{U}_{k2} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} - \dot{I}_2 \cdot (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{k1}) \cdot W_{k2}; \quad (2)$$

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \sum_1^n (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1} - \dot{I}_2 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^n M_{i2} \cdot W_{i1}; \quad (3)$$

$$\dot{U}_2 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_2 - \dot{I}_2 \cdot \sum_1^m (r_{k2} + j \cdot \omega \cdot L_{k2}) \cdot W_{k2} + \dot{I}_1 \cdot j \cdot \omega \cdot \sum_1^m M_{k1} \cdot W_{k2}; \quad (4)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 - \dot{I}_2 \cdot W_2}{\dot{R}_{mag}}; \quad (5)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{\dot{Z}_L}, \quad (6)$$

где  $W_1$  – число витков первичной обмотки трансформатора;

$W_2$  – число витков вторичной обмотки трансформатора;

$n$  – количество групп витков, на которые разбивается первичная обмотка;

$m$  – количество групп витков, на которые разбивается вторичная обмотка;

$\dot{\Phi}$  – основной магнитный поток в магнитопроводе, вызываемый током  $\dot{I}_1$ ,

протекающим в первичной обмотке, и током  $\dot{I}_2$ , протекающим во вторичной обмотке трансформатора;

$\omega$  – угловая частота напряжения, подаваемого на первичную обмотку трансформатора;

$\dot{U}_1$  – заданное напряжение на первичной обмотке;

$\dot{U}_2$  – напряжение на вторичной обмотке;

$\dot{U}_{i1}$  – напряжение на  $i$ -группе витков первичной обмотки;

$\dot{U}_{k2}$  – напряжение на  $k$ -группе витков вторичной обмотки;

$W_{i1}$  – количество витков в  $i$ -группе витков первичной обмотки (при этом  $W_{11} + W_{21} + \dots + W_{i1} + \dots + W_{n1} = W_1$ );  $W_{k2}$  – количество витков в  $k$ -группе витков вторичной обмотки (при этом  $W_{12} + W_{22} + \dots + W_{k2} + \dots + W_{m2} = W_2$ );

$r_{i1}, r_{k2}$  – активные сопротивления  $i$ -витка первичной обмотки и  $k$ -витка вторичной обмотки, соответственно;

$L_{i1}$  – частичная индуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{i1}$ , сцепленному с  $i$ -витком первичной обмотки, при протекании по ней тока 1 А;

$L_{k2}$  – частичная индуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{k2}$ , сцепленному с  $k$ -витком вторичной обмотки, при протекании по ней тока 1 А;

$M_{i2}$  – частичная взаимоиנדуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{i2}$ , сцепленному с  $i$ -витком первичной обмотки, при протекании по вторичной обмотке тока 1 А;

$M_{k1}$  – частичная взаимоиנדуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{k1}$ , сцепленному с  $k$ -витком вторичной обмотки, при протекании по первичной обмотке тока 1 А;

$\dot{R}_{mag}$  – комплексное магнитное сопротивление магнитопровода основному магнитному потоку;

$\dot{Z}_L$  – заданное комплексное сопротивление нагрузки, присоединенной ко вторичной обмотке трансформатора.

Значения  $\Phi_{i1}, \Phi_{i2}, \Phi_{k2}, \Phi_{k1}$  получают путем численного интегрирования, выполняемого с помощью персонального компьютера, при использовании картины магнитного поля рассеяния, в соответствии с рекомендациями, изложенными в [11]. Комплексное магнитное сопротивление основному магнитному потоку определяется с использованием данных характеристик трансформаторной стали, типа и геометрических параметров магнитопровода по существующим методикам. Это же сопротивление может быть получено экспериментальным путем (с использованием магнитопровода трансформатора), в соответствии с действующими стандартами.

Уравнения (1) – (6) можно видоизменить и использовать для определения параметров высоковольтного автотрансформатора напряжения. Для этого в модели автотрансформатора напряжения из высоковольтной обмотки выделим ее выходную часть (обозначим ее как обмотку **3**), на выход которой подсоединяют низковольтную нагрузку (например, анализаторы напряжения, вольтметры, АЦП) с общим сопротивлением нагрузки  $\dot{Z}_L$ . Пусть эта обмотка содержит группы витков с обозначением  $s = 1, 2 \dots p$ . Оставшуюся (входную) часть высоковольтной обмотки автотрансформатора напряжения обозначим как обмотку **1**, которая содержит группы витков с обозначением  $i = p+1, p+2 \dots n$  (всего  $n - p$ ). Учитывая согласованное направление токов в обмотках **1** и **3**, вместо (1) – (6) можем записать систему уравнений:

$$\dot{U}_{i1} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_1 \cdot (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_3 \cdot M_{i3}) \cdot W_{i1}; \quad (7)$$

$$\dot{U}_{s3} = (j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} + \dot{I}_3 \cdot (r_{s3} + j \cdot \omega \cdot L_{s3}) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_1 \cdot M_{s1}) \cdot W_{s3}; \quad (8)$$

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{11} + \dot{I}_3 \cdot \dot{Z}_{13}; \quad (9)$$

$$\dot{U}_3 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_3 + \dot{I}_3 \cdot \dot{Z}_{33} + \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_{31}; \quad (10)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{\dot{I}_1 \cdot W_1 + \dot{I}_3 \cdot W_3}{\dot{R}_{mag}}; \quad (11)$$

$$\dot{I}_{3L} = \frac{\dot{U}_3}{\dot{Z}_L}; \quad (12)$$

$$\dot{I}_{3L} + \dot{I}_3 = \dot{I}_1; \quad (13)$$

$$\dot{U}_1 + \dot{U}_3 = \dot{U}_0, \quad (14)$$

где:  $\dot{U}_{i1}$  – напряжение на  $i$ -группе витков обмотки **1**;

$\dot{U}_{s3}$  – напряжение на  $s$ -группе витков обмотки **3**;

$L_{i1}$  – частичная индуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{i1}$ , сцепленному с  $i$ -витком обмотки **1**, при протекании по ней тока 1 А;

$L_{s3}$  – частичная индуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{i3}$ , сцепленному с  $s$ -витком обмотки **3**, при протекании по ней тока 1 А;

$M_{i3}$  – частичная взаимоиנדуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{i3}$ , сцепленному с  $i$ -витком обмотки **1**, при протекании по обмотке **3** тока 1 А;

$M_{s1}$  – частичная взаимоиנדуктивность рассеяния, соответствующая магнитному потоку рассеяния  $\Phi_{s1}$ , сцепленному с  $s$ -витком обмотки **3**, при протекании по обмотке **1** тока 1 А;

$W_{i1}$  – количество витков в  $i$ -группе обмотки **1** (при этом  $W_{(p+1)1} + W_{(p+2)1} + \dots + W_{i1} + \dots + W_{n1} = W_1$ , где  $W_1$  – общее количество витков в обмотке **1**);  $W_{s3}$  – количество витков в  $s$ -группе обмотки **3** (при этом  $W_{13} + W_{23} + \dots + W_{s3} + \dots + W_{p3} = W_3$ , где  $W_3$  – общее количество витков в обмотке **3**);

$\dot{I}_1, \dot{I}_3$  – токи обмоток **1** и **3**;  $r_{i1}, r_{s3}$  – активные сопротивления  $i$ -витка и  $s$ -витка обмоток **1** и **3**;  $\dot{I}_{3L}$  – ток нагрузки;

$\dot{U}_0$  – входное (задаваемое) напряжение, приложенное к последовательно соединенным обмоткам **1** и **3** высоковольтного автотрансформатора напряжения, при этом  $\dot{U}_0 = \dot{U}_1 + \dot{U}_3$ , где  $\dot{U}_1$  – напряжение на обмотке **1** и  $\dot{U}_3$  – напряжение на обмотке **3**. Параметры  $\dot{Z}_{11}, \dot{Z}_{13}, \dot{Z}_{31}, \dot{Z}_{33}$  определяются соотношениями:

$$\dot{Z}_{11} = \sum_{i=p+1}^n (r_{i1} + j \cdot \omega \cdot L_{i1}) \cdot W_{i1}; \quad \dot{Z}_{13} = j \cdot \omega \cdot \sum_{i=p+1}^n M_{i3} \cdot W_{i1}; \quad \dot{Z}_{31} = j \cdot \omega \cdot \sum_{s=1}^p M_{s1} \cdot W_{s3};$$

$$\dot{Z}_{33} = \sum_{s=1}^p (r_{s3} + j \cdot \omega \cdot L_{s3}) \cdot W_{s3}. \text{ Остальные параметры в (7 – 14) аналогичны параметрам в уравнениях (1 – 6).}$$

Система уравнений (7) – (14) содержит  $n$  неизвестных  $\dot{U}_{i1}$ ,  $\dot{U}_{s3}$ , а также  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{U}_3$ ,  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_3$ ,  $\dot{I}_{3L}$ ,  $\dot{\Phi}$  при общем количестве уравнений  $n + 6$ , и является разрешимой.

В режиме холостого хода высоковольтного автотрансформатора напряжения (при  $\dot{Z}_L \rightarrow \infty$ ), основными факторами, влияющими на распределение напряжения по его виткам, являются векторы противо-ЭДС ( $j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi}$ ) и частичные индуктивности и взаимоиндуктивности рассеяния для каждой группы витков обмоток. Это является следствием того, что обычно диаметр обмоточного медного провода выбирают завышенным из соображений механической прочности при намотке, поэтому активная составляющая сопротивления групп витков обмоток, в сравнении с указанными выше факторами влияния, невелика, и ею можно пренебречь.

В этом случае во всей обмотке высоковольтного автотрансформатора напряжения с количеством витков  $W_0 = W_1 + W_3$  (как и в ее частях **1** и **3**) протекает один и тот же ток холостого хода  $\dot{I}_0$ . В связи с этим уравнения (9 – 10) преобразуются к виду:

$$\dot{U}_1 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_1 + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_0 \cdot \sum_{i=p+1}^n (L_{i1} + M_{i3}) \cdot W_{i1}; \quad (15)$$

$$\dot{U}_3 = j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_3 + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_0 \cdot \sum_{s=1}^p (L_{s3} + M_{s1}) \cdot W_{s3}. \quad (16)$$

Определим масштабный коэффициент – отношение входного и выходного напряжений высоковольтного автотрансформатора напряжения в виде:

$$K_{ATV} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_3}{\dot{U}_3}, \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{U}_3 &= \dot{U}_0 = \\ &= j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot (W_1 + W_3) + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_0 \cdot \left[ \sum_{s=1}^p (L_{s3} + M_{s1}) \cdot W_{s3} + \sum_{i=p+1}^n (L_{i1} + M_{i3}) \cdot W_{i1} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Можно показать [11], что выражение в квадратных скобках (18) равно сумме  $\sum_{i=1}^n L_{ji} \cdot W_{ji}$ , где  $ji$  – обобщенная нумерация вышеупомянутых групп обмоток **3** и **1**, а  $L_{ji} \cdot W_{ji}$  – частичные индуктивности рассеяния их групп витков при протекании во всей обмотке автотрансформатора напряжения тока 1 А.

В этом случае выражение (17) преобразуется к виду:

$$K_{AT} = \frac{j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_0 + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_0 \cdot \sum_{i=1}^n L_{ji} \cdot W_{ji}}{j \cdot \omega \cdot \dot{\Phi} \cdot W_3 + j \cdot \omega \cdot \dot{I}_0 \cdot \sum_{i=1}^p L_{ji} \cdot W_{ji}} = \frac{W_0 \cdot \left( \dot{\Phi} + \frac{1}{W_0} \cdot \dot{I}_0 \cdot \sum_{i=1}^n L_{ji} \cdot W_{ji} \right)}{W_3 \cdot \left( \dot{\Phi} + \frac{1}{W_3} \cdot \dot{I}_0 \cdot \sum_{i=1}^p L_{ji} \cdot W_{ji} \right)}. \quad (19)$$

Из (19) следует, что условием идеальности масштабного преобразования напряжения автотрансформатором  $K_{ATV} = \frac{W_0}{W_3}$  является равенство:

$$\frac{1}{W_0} \cdot \sum_{i=1}^n L_{ji} \cdot W_{ji} = \frac{1}{W_3} \cdot \sum_{i=1}^p L_{ji} \cdot W_{ji} \quad \text{или}$$

$$\frac{1}{W_0} \cdot \sum_{i=1}^n L_{ji} \cdot W_{ji} - \frac{1}{W_3} \cdot \sum_{i=1}^p L_{ji} \cdot W_{ji} = \frac{1}{W_0} \cdot \left( \sum_{i=1}^n L_{ji} \cdot W_{ji} - \frac{W_0}{W_3} \cdot \sum_{i=1}^p L_{ji} \cdot W_{ji} \right) = \frac{1}{W_0} \cdot Ls'_{eqv} = 0,$$

где приведенная эквивалентная индуктивность рассеяния автотрансформатора напряжения равна:

$$Ls'_{eqv} = \sum_{i=1}^n L_{ji} \cdot W_{ji} - \frac{W_0}{W_3} \cdot \sum_{i=1}^p L_{ji} \cdot W_{ji}. \quad (20)$$

Использование системы уравнений (7)–(14) и методики, изложенной в [11], позволило разработать высоковольтный автотрансформатор напряжения класса 10 кВ с максимальным рабочим напряжением 19 кВ и классом точности 0,05. Особенностью данного автотрансформатора напряжения является возможность получения 4 номинальных выходных напряжений ( $100 / 3$ ,  $100 / \sqrt{3}$ , 100, 300 В) для его 3 номинальных входных напряжений (3, 6, 10 кВ) На рис. 1 представлен внешний вид данного автотрансформатора напряжения.

Разработанный и изготовленный высоковольтный автотрансформатор напряжения класса 10 кВ метрологически аттестован и внедрен в Государственном предприятии «Укрметртестстандарт» (г. Киев, Украина) в составе Вторичного эталона высокого напряжения переменного тока частоты 50 Гц класса 110 кВ.

Результаты экспериментальных исследований высоковольтного автотрансформатора напряжения, спроектированного и созданного на основе теоретических положений, изложенных выше, позволяют сделать вывод об эффективности



развитых в исследовании теоретических положений, при учете, как дополнительного фактора, влияния емкостных токов, в соответствии с [12].



**Рис. 1.** Высоковольтный автотрансформатор напряжения класса 10 кВ. Вид со стороны обмоток 3, 6 кВ.

Широкий диапазон входных и выходных напряжений и высокий класс точности описанного выше высоковольтного автотрансформатора напряжения позволяет сделать вывод о возможности разработки и изготовления высоковольтных автотрансформаторов напряжения с рядом любых номинальных коэффициентов масштабного преобразования напряжения. Согласно проведенным исследованиям, наибольшей точности масштабного преобразования напряжения можно достичь в режимах, максимально приближенных к режиму холостого хода высоковольтного автотрансформатора напряжения. Поскольку цифровые электронные приборы, подключаемые на выход высоковольтных трансформаторов напряжения, как правило, вызывают минимальные токи нагрузки, методика, изложенная в [11], в совокупности с предложенной системой уравнений автотрансформатора, позволит перейти к проектированию высоковольтных автотрансформаторов напряжения, предназначенных для использования в сетях Smart Grid.

## **7. SWOT-анализ результатов исследований**

*Strengths.* Положительной стороной данного исследования является возможность математического моделирования различных режимов работы высоковольтных автотрансформаторов напряжения, определения их параметров и характеристик. Данная возможность позволяет на этапе проектирования дорогостоящего высоковольтного измерительного

электрооборудования с высокой точностью прогнозировать его характеристики, с учетом особенностей его нагрузки в эксплуатации.

*Weaknesses.* Слабая сторона данного исследования состоит в том, что в настоящее время практически отсутствует нормативная документация по использованию высоковольтных автотрансформаторов напряжения в качестве первичных преобразователей напряжения в высоковольтных измерительных системах.

*Opportunities.* К дополнительным возможностям, которые предоставляет данное исследование, относятся возможность определения влияния величины и характера нагрузки на коэффициент масштабного преобразования напряжения высоковольтного измерительного автотрансформатора. Также данное исследование позволяет для каждой конкретной модели автотрансформатора напряжения определить соотношение и местоположение групп витков обмотки, позволяющие достичь наибольшего соответствия масштабного коэффициента преобразования напряжения его нормативному значению.

*Threats.* Математическая модель активной части высоковольтного автотрансформатора напряжения предназначена для использования при проектировании высокоточных многодиапазонных первичных преобразователей напряжения автотрансформаторного типа, в том числе, для применения в сетях Smart Grid, а также в научных разработках.

## **8. Выводы**

1. Разработана математическая модель активной части высоковольтного автотрансформатора напряжения в виде системы уравнений, позволяющей детализировать его параметры до уровня учета единичных витков, а также групп витков. Данная система уравнений позволяет учитывать величину и характер нагрузки автотрансформатора, наличие нескольких выходных частей его обмотки.

2. Среди факторов, влияющих в наибольшей степени на распределение напряжения по виткам обмотки высоковольтного автотрансформатора напряжения в режимах, близких к режиму холостого хода, выделены индуцируемые основным магнитным потоком ЭДС, а также частичные индуктивности рассеяния отдельных витков (групп витков). При этом, в работе даны рекомендации по минимизации влияния частичных индуктивностей рассеяния на распределение напряжения по виткам обмотки.

3. Проведенные теоретические расчеты с использованием разработанной математической модели высоковольтного автотрансформатора напряжения показали высокую степень совпадения их результатов с данными экспериментальных исследований, что позволило внедрить разработанный и изготовленный высоковольтный автотрансформатор напряжения класса 10 кВ в государственной метрологической службе.

Теоретические положения данной работы, а также проведенные экспериментальные исследования эталонного автотрансформатора напряжения класса 10 кВ, позволяют сделать вывод о возможности применения

высоковольтных автотрансформаторов напряжения в сетях Smart Grid в качестве первичных преобразователей напряжения.

### Литература

1. Brzhezitskyi, V. Detailing of the transformer equation to the single winding turns (groups of the winding turns) [Text] / V. Brzhezitskyi, Ya. Haran, I. Masliuchenko // Technology audit and production reserves. – 2016. – Vol. 1, No. 1(27). – P. 32–37. doi:[10.15587/2312-8372.2016.59101](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.59101)
2. Xu, Q. Real-Time Generation Dispatch and Communication Architecture of Smart Grid with Renewable Energy [Text] / Q. Xu, C. Deng, L. Chen // Journal of Communications. – 2013. – Vol. 8, No. 8. – P. 497–504. doi:[10.12720/jcm.8.8.497-504](https://doi.org/10.12720/jcm.8.8.497-504)
3. Yilmaz, C. Smart Grid Architectures and the Multi-Agent System Paradigm [Text] / C. Yilmaz, S. Albayrak, M. Lützenberger // Energy 2014: The Fourth International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies. – 2014. – P. 90–95.
4. Anderson, K. GridSpice: A Distributed Simulation Platform for the Smart Grid [Text] / K. Anderson, J. Du, A. Narayan, A. E. Gamal // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2014. – Vol. 10, No. 4. – P. 2354–2363. doi:[10.1109/tii.2014.2332115](https://doi.org/10.1109/tii.2014.2332115)
5. Arya, A. K. Role of Smart Grid to Power System Planning and Operation in India [Text] / A. K. Arya, S. Chanana, A. Kumar // Proceedings of International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. – 2013. – P. 793–802.
6. Miceli, R. A Perspective on the Future of Distribution: Smart Grids, State of the Art, Benefits and Research Plans [Text] / R. Miceli, S. Favuzza, F. Genduso // Energy and Power Engineering. – 2013. – Vol. 05, No. 01. – P. 36–42. doi:[10.4236/epe.2013.51005](https://doi.org/10.4236/epe.2013.51005)
7. Vijayapriya, P. Smart Tariff for Smart Meters In Smart Grid [Text] / P. Vijayapriya, G. Bapna, D. P. Kothari // International Journal of Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 2, No. 5. – P. 310–315.
8. Khandekar, N. Non-Intrusive Appliance Load Monitoring System Using Zigbee Protocol [Text] / N. Khandekar, K. Thube, N. Patil, P. B. Mane // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). – 2014. – Vol. 3, No. 4. – P. 2415–2417.
9. Janjic, A. Power Quality Requirements for the Smart Grid Design [Text] / A. Janjic, Z. Stajic, I. Radovic // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. – 2011. – Vol. 5, No. 6. – P. 643–651.
10. Maitra, S. Smart Energy meter using Power Factor Meter and Instrument Transformer [Text] / S. Maitra // Communications on Applied Electronics. – 2016. – Vol. 4, No. 1. – P. 31–37. doi:[10.5120/cae2016652015](https://doi.org/10.5120/cae2016652015)
11. Brzhezitsky, V. O. Leakage Inductance Calculation of High-Voltage Transformer Windings by Means of the Software using the Finite Elements Method [Text] / V. O. Brzhezitsky, Ja. O. Garan, O. M. Desjatov // Technical Electrodynamics. – 2014. – No. 4. – P. 61–63.

12. Brzhezytskyi, V. Analysis of capacitive currents in the winding of a high voltage measuring autotransformer [Text] / V. Brzhezytskyi, Ya. Haran // Technology audit and production reserves. – 2016. – Vol. 4, No. 1(30). – P. 70–76. doi:[10.15587/2312-8372.2016.74694](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.74694)

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПЕРИЗДАНИЕМ