

УДК 621.314.21

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-101-108

Повышение точности моделирования трансформаторов напряжения

В.И. Диденко, А.К. Крюков

Трансформаторы, рассчитанные для работы на частоте сети (50 или 60 Гц), неизбежно преобразуют и напряжения частот гармоник вплоть до 2 кГц.

При моделировании трансформатора напряжения (ТН) обычно используется стандартная Т-образная схема замещения с постоянными параметрами на всех частотах. В ней можно выделить горизонтальную и вертикальную ветви. Значения параметров горизонтальной ветви для первичной и вторичной обмоток принимали равными. Для идеального ТН сопротивления и индуктивности горизонтальной ветви равны нулю, а сопротивление и индуктивность вертикальной ветви — бесконечности.

Проанализирован коэффициент преобразования, равный отношению действующего напряжения на вторичной обмотке ТН к действующему напряжению на его первичной обмотке. Коэффициент преобразования идеального ТН равен отношению витков вторичной и первичной обмоток. Погрешность коэффициента преобразования определяется отличием параметров ТН от указанных идеальных значений. Требуемая точность ТН зависит от его применения.

Экспериментальные исследования проведены на многоцелевом ТН типа ОСМ-1,0 УЗ. Параметры ТН в диапазоне от 50 Гц до 2 кГц находили методом трех вольтметров с помощью вольтметра 34401А. Для повышения адекватности моделирования на частотах 120 и 1000 Гц те же параметры были определены измерителем RLC типа E7-22. Для обоих методов неопределенность измерения параметров ТН и фактическое расхождение измеренных значений двумя методами не превышали 2 %. Для получения обобщенных результатов был введен приведенный коэффициент трансформации, который для идеального ТН равен единице.

С помощью измеренных параметров ТН изучали погрешности ТН и погрешности их оценок с помощью трех моделей: традиционной (с использованием четырех постоянных значений параметров, измеренных на 50 Гц), эталонной (с использованием значений параметров ТН, измеренных на всех анализируемых частотах) и новой (с использованием девяти параметров, найденных по измерениям на постоянном токе, а также на частотах 50 и 2000 Гц).

Коэффициент преобразования вычисляли для всех моделей с помощью программ MicroCap и Wolfram Mathematica в трех режимах: на холостом ходу, при номинальной активной нагрузке 50 Ом, при параллельном включении номинальной активной нагрузки и конденсатора 10 мкФ. Частотные погрешности первой и третьей модели находили по отношению к эталонной модели и частоты 50 Гц. Моделирование показало, что предложенная модель от 1,5 до 3,6 раз точнее стандартной.

Ключевые слова: коэффициент преобразования, трансформатор напряжения, моделирование.

Для цитирования: Диденко В.И., Крюков А.К. Повышение точности моделирования трансформаторов напряжения // Вестник МЭИ. 2018. № 3. С. 101—108. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-101-108.

Achieving Better Accuracy in Modeling Voltage Transformers

V.I. Didenko, A.K. Kriukov

Transformers designed for operation at network frequencies (50 or 60 Hz) unavoidably transform also the voltages of higher harmonic components with frequencies up to 2 kHz.

In modelling a voltage transformer (VT), a standard T-equivalent circuit with constant parameters at all frequencies is commonly used. This circuit contains a horizontal branch and a vertical branch. The horizontal branch parameters were taken equal for the primary and secondary windings. For an ideal VT, the horizontal branch resistances and inductances are equal to zero, and the vertical branch resistance and inductance are equal to infinity.

The article analyzes the transformation ratio equal to the ratio of the effective voltage across the VT secondary winding to the effective voltage across its primary winding. The transformation ratio of an ideal VT is equal to the ratio of the numbers of turns in its secondary and primary windings. The transformation ratio error depends on the extent to which the VT parameters differ from the ideal values mentioned before. The necessary VT transformation accuracy depends on its application.

Experimental investigations were carried out on a multipurpose Type OSM-1.0 UZ voltage transformer. Its parameters were determined in the frequency band from 50 Hz to 2 kHz according to the three voltmeter method using a 34401A voltmeter. To improve the modeling adequacy, the same parameters were determined by a Type E7-22 RLC meter at the frequencies equal to 120 and 1000 Hz. For both methods, the uncertainty of the VT parameter measurements and the actual discrepancy between the measured values obtained by both these methods were within 2%. To obtain generalized results, a normalized transformation ratio was introduced, the value of which for the ideal VT is equal to unity.

The measured VT parameters were used to study the VT errors, as well as the errors of their assessments by means of three models: (i) the conventional one (involving four constant values of the parameters measured at the 50 Hz frequency), (ii) the reference one (involving the VT parameter values measured at all analyzed frequencies), and (iii) the new one (involving nine parameters measured at DC and at the 50 and 2000 Hz frequencies).

The transformation ratio was calculated for all these models using the MicroCap and Wolfram Mathematica computer programs in the no-load operation mode, during operation with the nominal active load of 50 Ω , and during operation with the nominal active load connected in parallel

with a 10 μF capacitor. The frequency errors of the first and third models were determined with respect to the reference model and the 50 Hz frequency. It has been demonstrated from the simulation results that the proposed model yields the accuracy a factor of 1.5 to 3.6 better than the standard one.

Key words: transformation ratio, voltage transformer, modeling.

For citation: Didenko V.I., Kriukov A.K. Achieving Better Accuracy in Modeling Voltage Transformers. MPEI Vestnik. 2018;3:101—108. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-3-101-108.

Введение

Трансформаторы, рассчитанные для работы на частоте сети 50 или 60 Гц, неизбежно преобразуют и напряжения частот гармоник. Для такого применения ТН в [1] предложено ввести коррекцию коэффициента преобразования, используя широко известную модель трансформатора, изображенную на рис. 1 [1, 2]. Точность моделирования и влияние нагрузки в [1] не затрагивались. На рис. 1 не показаны конденсаторы, которые иногда входят в модель ТН, поскольку анализировался ТН с относительно малыми значениями параметров горизонтальной ветви ($R_a, R_b n^2, L_a, L_b n^2$).

Цель настоящей работы — анализ точности расчета коэффициента преобразования ТН в широком частотном диапазоне и, в случае необходимости, ее повышение.

Проанализирован общепринятый коэффициент преобразования для измерительных преобразователей, равный отношению действующего напряжения на вторичной обмотке к действующему напряжению на первичной обмотке и обратный коэффициенту трансформации.

При создании эталонного средства измерений параметров качества электроэнергии (ПКЭ) требования к допустимой относительной погрешности измерения гармоник частоты сети составляют от 0,1 % для первой гармоники, до 1 % для последующих гармоник вплоть до 2 или 2,5 кГц [3]. Если перед подобным прибором находится ТН для гальванического разделения, то к нему необходимо предъявлять достаточно высокие требования по точности.

Обоснована необходимая точность расчета коэффициента преобразования в широком частотном диапазоне с помощью модели (рис. 1) как на холостом ходу, так и при различных нагрузках. Предложены уточненные модели ТН.

Модели трансформатора напряжения

Измерению указанных на рис. 1 параметров посвящено много работ [2 — 13]. Обычно измеряют токи, напряжения и мощности на переменном токе с частотой сети в режиме холостого хода и короткого замыкания. В первом случае пренебрегают параметрами горизонтальной ветви ($R_a, R_b n^2, L_a, L_b n^2$), во втором — параметрами вертикальной ветви (R_m, L_m). Для исследуемого ТН это допущение приводило к погрешностям расчета параметров менее 1 %, что значительно меньше пренебрежимо малой погрешности 5 %. Обычно полагают [14], что

$$R_a = R_b n^2; L_a = L_b n^2. \quad (1)$$

С учетом (1) можно найти каждый параметр горизонтальной и вертикальной ветвей по указанным измерениям.

В режиме моделирования ТН как преобразователя все элементы на рис. 1 являются источниками погрешности ТН. Если все параметры горизонтальной ветви имели бы нулевые значения, а вертикальной ветви стремились к бесконечности, то коэффициент трансформации был равен $n \approx w_1/w_2$, где w_1, w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток, а коэффициент преобразования составил $1/n$. Это положение определяет обоснованные требования к точности измерения параметров модели на рис. 1. Погрешности измерения данных параметров не должны влиять на погрешность расчета коэффициента преобразования более чем на 5 %. С этих же позиций следует анализировать и важность отклонений от условий (1).

Экспериментальное определение параметров схем замещения трансформатора напряжения

Проведены испытания трансформатора типа ТН ОСМ-1.0 УЗ. Этот многоцелевой ТН рассчитан на

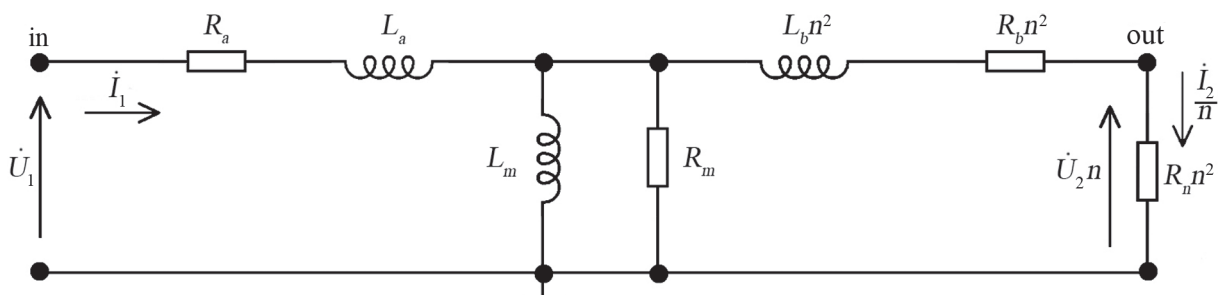


Рис. 1. Эквивалентная T-образная схема ТН

входное напряжение 220 В с частотой 50 или 60 Гц. Он применяется и как силовой, и как измерительный ТН. В данном случае он исследовался во втором качестве. При экспериментах были заданы пониженные напряжения с целью исключения разогрева. Для разных частот найдены индуктивность и сопротивление в режимах холостого хода (ХХ) (вторичная обмотка разомкнута) L_{xx} , R_{xx} и короткого замыкания (КЗ) вторичной обмотки $L_{кз}$, $R_{кз}$. Для измерений использовался метод трех вольтметров [14], причем все три измерения напряжения измеряли одним и тем же цифровым мультиметром 34401А. Предел относительной погрешности измерения параметров ТН в диапазоне частот от 50 Гц до 2 кГц не превышал $\pm 2\%$. Параметры ТН на 120 Гц и 1 кГц были измерены прибором Е7-22 с пределом допускаемой относительной погрешности измерения около $\pm 1\%$. Расхождение результатов измерения, полученных двумя методами, не превышало 2%.

Для получения коэффициента преобразования было использовано три варианта Т-образной модели схемы замещения ТН:

- традиционная — с использованием постоянных значений параметров, измеренных на 50 Гц;

- эталонная — с применением значений параметров, измеренных на всех анализируемых частотах;

- новая (рис. 2) — с уменьшенной частотной погрешностью, использующая значения параметров, найденных по измерениям на частотах 50 и 2000 Гц.

Эталонная модель позволяет наиболее точно рассчитать коэффициенты преобразования для всех частот, где были найдены ее параметры. Однако она требует очень большого объема измерений. Например, для анализа ТН вплоть до сороковой гармоники надо измерить соответственно параметры ТН на сорока частотах. Кроме того, она не позволяет рассчитать переходные процессы при подключении на вход ТН скачка синусоидального или постоянного напряжения. Такие тесты применяются для диагностики ТН [11, 15, 16].

С учетом указанных соотношений в режиме холостого хода напряжение на вертикальной ветви примерно равно входному напряжению, а в режиме короткого замыкания — близко к его половине. Для исключения влияния разогрева ТН при экспериментах были выбраны пониженные значения входных напряжений: 0,6 В при КЗ и 0,3 В при ХХ. Параметры эталонной модели приведены в табл. 1, 2.

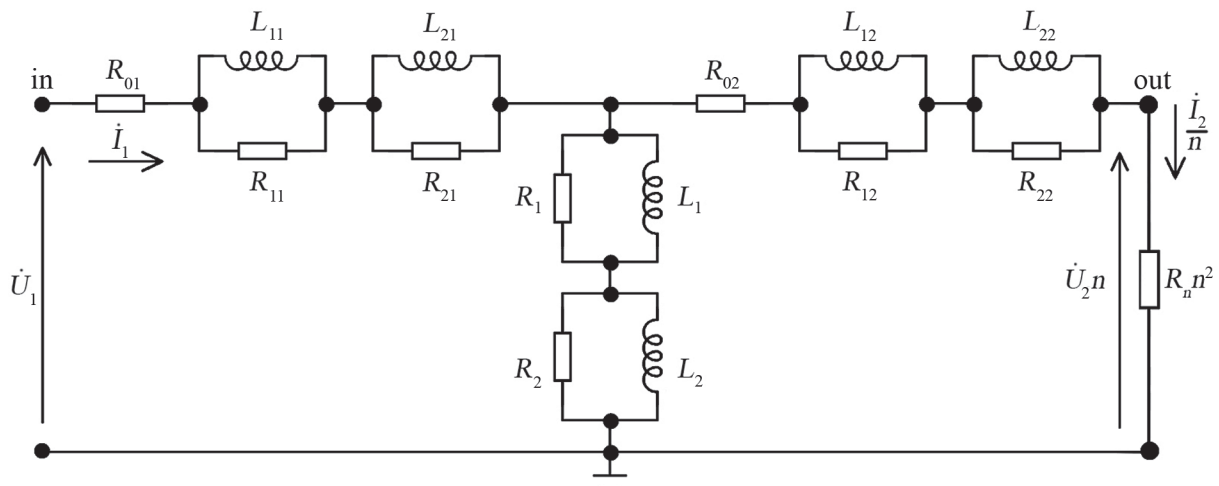


Рис. 2. Новая модель ТН

Таблица 1

Зависимость параметров вертикальной ветви (холостой ход) от частоты

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
L_m , Гн	0,59427	0,37314	0,26482	0,20094	0,17707	0,15660
R_m , Ом	1328,6	1578,9	2131,2	3852,9	6535,9	10679

Таблица 2

Зависимость параметров горизонтальной ветви (короткое замыкание) от частоты

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
L_a , Гн	0,34544	0,34459	0,34288	0,33780	0,32924	0,31220
R_a , Ом	0,41274	0,42065	0,43645	0,48388	0,56293	0,72102

Новая модель предлагается с использованием 5-элементной схемы замещения для горизонтальной и 4-элементной для вертикальной ветвей. Схема модели показана на рис. 2, а ее коэффициенты отражены в табл. 3, 4. Параметры модели подбирались с помощью программы Wolfram Mathematica таким образом, чтобы эквивалентные сопротивления и индуктивности на ХХ и КЗ совпадали с измеренными на частотах 50 Гц и 2 кГц. Сопротивления R_{01} и R_{02} выбирались так, чтобы совпадали результаты измерения сопротивлений обмоток на постоянном токе. С учетом (1), параметры левой и правой половин горизонтальной ветви принимались равными. Значение одного из сопротивлений вертикальной ветви в модели на рис. 2 оказалось при расчете отрицательным. Никакого физического смысла

Таблица 3

Параметры вертикальной ветви новой модели

R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , Гн	L_2 , Гн
737,47	-9110,4	0,44849	0,15007

Таблица 4

Параметры горизонтальной ветви новой модели

$R_{01} = R_{02}$, Ом	$R_{11} = R_{12}$, Ом	$R_{21} = R_{22}$, Ом	$L_{11} = L_{12}$, мГн	$L_{21} = L_{22}$, мГн
0,40205	0,019808	51,734	0,066961	0,31397

это не имеет, а является необходимым условием точного решения системы из четырех уравнений с четырьмя неизвестными.

Коэффициент преобразования трансформатора напряжения на холостом ходу

При моделировании приведенный коэффициент преобразования равен $K'_i = nU_2 / U_1$, где i — номер модели. С действительным коэффициентом преобразования K_i приведенный коэффициент преобразования связан очевидным соотношением $K'_i = nK_i$. Относительные частотные погрешности действительного и приведенного коэффициентов совпадают, поскольку параметр n полагается независимым от частоты. Значение этого коэффициента необходимо только для моделирования ТН на основной гармонике. Обычно его определяют как отношение числа витков первичной и вторичной обмоток. Анализ точности данного определения в данном случае не рассматривается.

Расчет коэффициента преобразования для трех моделей был проведен с помощью программ MicroCap и Wolfram Mathematica. Результаты расчетов по двум методам различались менее, чем на $3 \cdot 10^{-6}$ % (рис. 3, табл. 5).

Погрешность ТН на 50 Гц для всех трех моделей по определению одинакова и найдена как $-0,089$ %. Если допускаемая относительная погрешность ТН по модулю равна $0,005$ %, то на 50 Гц надо провести корректировку коэффициента преобразования ТН.

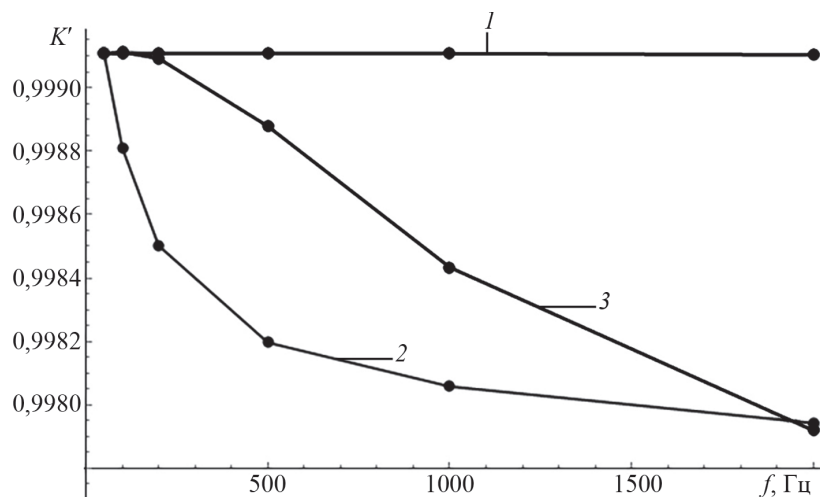


Рис. 3. График зависимостей трех коэффициентов преобразования на холостом ходу при постоянных (1) и переменных (2) параметрах и новой схеме (3)

Таблица 5

Результаты расчета приведенного коэффициента преобразования ТН на холостом ходу для трех моделей

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
K'_1	0,99911	0,99911	0,99911	0,99911	0,99911	0,99910
K'_2	0,99911	0,99881	0,99850	0,99820	0,99806	0,99794
K'_3	0,99911	0,99911	0,99909	0,99888	0,99843	0,99792

Максимальная частотная погрешность ТН в диапазоне частот от 50 Гц до 2 кГц найдена с помощью эталонной модели как $-0,12\%$. Эта погрешность по модулю превышает заданную допускаемую погрешность ТН как $0,05\%$.

Приняв значения приведенного коэффициента преобразования для эталонной модели в качестве действительных, можно рассчитать относительные погрешности традиционной и новой моделей. Из данных табл. 6 видно, что предложенная модель имеет по модулю примерно в два раза меньше частотную погрешность, чем традиционная. Погрешности предложенной модели практически удовлетворительны для анализа ТН с допускаемой погрешностью в частотном диапазоне от 50 Гц до 2 кГц на уровне $0,05\%$.

Коэффициент преобразования трансформатора напряжения при резистивной нагрузке

Рассмотрим резистивную нагрузку $R_n n^2 = 50$ Ом, примерно соответствующую номинальной мощности

исследуемого трансформатора напряжения в 1 кВт (рис. 4, табл. 7)

Погрешность ТН на 50 Гц для всех трех моделей по определению одинакова и найдена как $-1,7\%$. Практически для любого применения ТН в качестве измерительного трансформатора необходимо на этой частоте провести корректировку коэффициента преобразования. Максимальная частотная погрешность ТН в диапазоне частот от 50 Гц до 2 кГц найдена с помощью эталонной модели как $-2,6\%$. Это значение также требует корректировки ТН. Приняв значения приведенного коэффициента преобразования для второй модели в качестве действительных, можно найти относительные погрешности первой и третьей моделей (табл. 8). Из данных табл. 8 следует, что предложенная модель имеет по модулю примерно в три раза меньше максимальную частотную погрешность, чем традиционная. Достигнутая точность достаточна для принятого критерия $0,05\%$ только в диапазоне до 100 Гц.

Таблица 6

Относительные погрешности расчета коэффициента преобразования для традиционной и новой моделей на холостом ходу

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
$\delta K'_1$, %	0	0,030	0,061	0,091	0,11	0,12
$\delta K'_3$, %	0	0,030	0,059	0,068	0,038	-0,0024

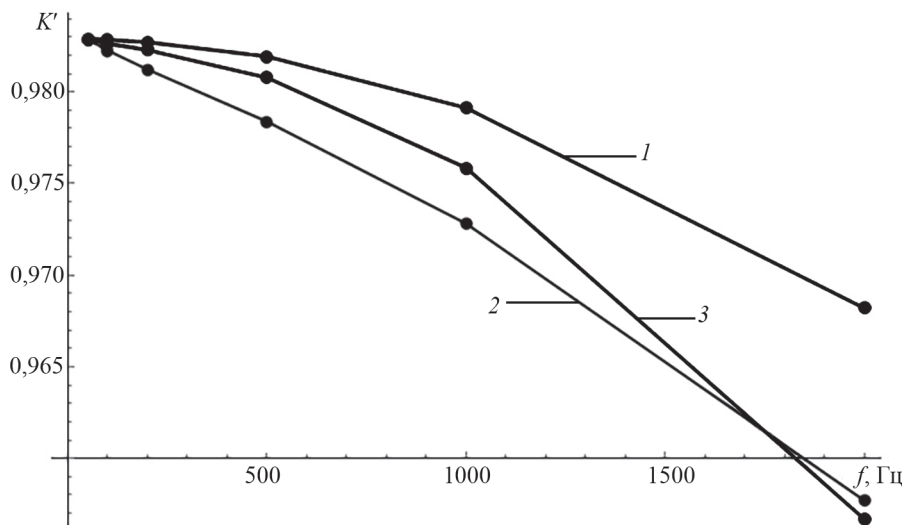


Рис. 4. График зависимостей K' при резистивной нагрузке при постоянных (1) и переменных (2) параметрах и новой схеме (3)

Таблица 7

Результаты расчета приведенного коэффициента преобразования для трех моделей ТН при резистивной нагрузке 50 Ом

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
K'_1	0,98288	0,98285	0,98272	0,98194	0,97913	0,96821
K'_2	0,98288	0,98226	0,98122	0,97838	0,97281	0,95772
K'_3	0,98288	0,98263	0,98228	0,98078	0,97586	0,95671

Таблица 8

Относительные погрешности расчета коэффициента преобразования для традиционной и новой моделей при резистивной нагрузке 50 Ом

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
$\delta K'_1$	0	0,060	0,15	0,36	0,65	1,1
$\delta K'_3$	0	0,038	0,11	0,24	0,31	-0,11

Коэффициент преобразования трансформатора напряжения при резистивной и емкостной нагрузках

В качестве примера возьмем параллельное исследованной ранее нагрузке активным сопротивлением 50 Ом включение емкости 10 мкФ (рис. 5, табл. 9).

Как и для предыдущих коэффициентов преобразования, необходимо корректировать коэффициент пре-

образования на 50 Гц, так как его отклонение от номинального составляет $-1,7\%$. Максимальная частотная погрешность ТН в диапазоне частот от 50 Гц до 2 кГц найдена с помощью эталонной модели как 200%. Эта погрешность, безусловно, требует провести корректировку ТН. Приняв значения приведенного коэффициента преобразования для второй модели в качестве действительных, можно рассчитать относительные погрешности первой и третьей моделей (табл. 10).

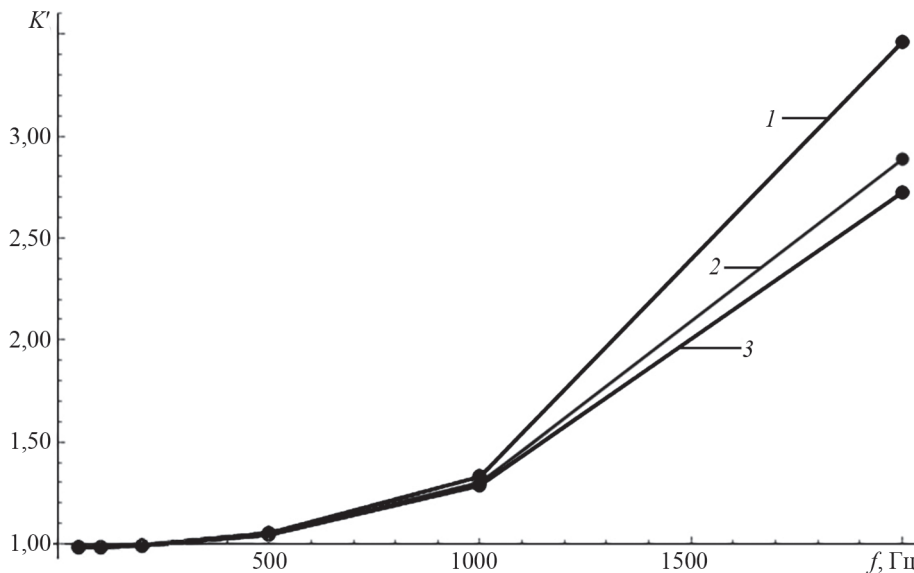


Рис. 5. График зависимостей K' при резистивной и емкостной нагрузках при постоянных (1) и переменных (2) параметрах и новой схеме (3)

Таблица 9

Результаты расчета приведенного коэффициента преобразования для трех моделей ТН при резистивной и емкостной нагрузках

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
K'_1	0,98252	0,98589	0,99534	1,0546	1,3411	3,4627
K'_2	0,98252	0,98557	0,99428	1,0493	1,3021	2,9194
K'_3	0,98354	0,98580	0,99480	1,0503	1,2986	2,8933

Таблица 10

Относительные погрешности моделирования коэффициента преобразования для традиционной и новой моделей при резистивной нагрузке 50 Ом параллельно с емкостью 10 мкФ

f , Гц	50	100	200	500	1000	2000
$\delta K'_1$	0	0,061	0,17	0,57	2,3	20
$\delta K'_3$	0	0,020	0,012	-0,22	-0,99	-5,6

В данном случае предложенная модель имеет по модулю примерно в 3,6 раза меньше максимальную частотную погрешность, чем традиционная. Достигнутая точность достаточна для принятого критерия 0,05 % в диапазоне частот до 200 Гц.

Заключение

Параметры модели трансформатора напряжения определяют погрешность коэффициента преобразования, а точность их измерения — погрешность расчета коэффициента преобразования ТН, следовательно погрешность их измерения менее 5 % достаточна. Если параметры модели ТН на рис. 1 измерять для каждой из исследуемых частот (например, для 50 Гц и всех высших гармоник), то полученная модель может служить эталонной для исследования частотной погрешности ТН. Предложена новая модель ТН для анализа коэффициента преобразования в широком частотном диапазоне. Для нахождения значений параметров этой модели следует провести измерения только на двух частотах. В отличие от эталонной модели она может использоваться для уточненного моделирования ТН при скачке входного напряжения.

Введен приведенный коэффициент преобразования ТН, позволяющий получать частотные зависимости ТН вне зависимости от коэффициента n .

Проведены экспериментальные исследования ТН типа ОСМ-1.0 УЗ при разных нагрузках. Результаты этих опытов показали, что частотные погрешности традиционной модели недостаточны для практики. Погрешности предложенной модели имеют точность в 2...3,6 раза выше и достаточны для многих применений.

Достоверность проведенных исследований подтверждена близостью измерений двумя методами и практическим совпадением результатов моделирования с помощью двух программ.

Литература

1. **Crotti G. e. a.** A Technique for Real-time Bandwidth Enhancement of Instrument Voltage Transformers // Proc. XXI IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry. Check Republic, 2015.
2. **Дубовицкий Г.П.** Трансформаторы. Назначение и области применения [Электрон. ресурс] <http://model.exponenta.ru/electro/0070.htm> (дата обращения 23.04.2017).
3. **Серов А.Н.** Разработка и исследование прибора для измерения показателей качества электроэнергии с повышенной точностью: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2016.
4. **ГОСТ 16110—82.** Трансформаторы силовые. Термины и определения.
5. **ГОСТ 18685—73.** Трансформаторы тока и напряжения. Термины и определения.
6. **ГОСТ IEC 60044-1—2013.** Трансформаторы измерительные.

7. **ГОСТ 30830—2002.** Трансформаторы силовые. Ч. 1. Общие положения.

8. **ГОСТ 9680—77.** Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВ·А и более. Ряд номинальных мощностей.

9. **РД ЭО 0410—02.** Методические указания по оценке состояния и продлению срока службы силовых трансформаторов.

10. **Лурье А.И., Шлегель О.Г.** Измерение отклонения индуктивного сопротивления при электродинамических испытаниях силовых трансформаторов // Электротехника. 1991. № 12. С. 35—38.

11. **Диденко В.И., Майоршина Т.С.** Контроль качества трансформатора напряжения при подаче на его вход скачка напряжения // Вестник МЭИ. 2012. № 3. С. 58—61.

12. **ПМГ 96—2009.** ГСИ. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления.

13. **Вольдек А.И., Попов В.В.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2008.

14. **Горошко Д.Л.** Метрология, стандартизация, сертификация. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2003.

15. **Пат. № 2491559 РФ.** Способ определения сопротивления и индуктивности рассеяния первичной обмотки трансформатора напряжения / В.И. Диденко, А.А. Москвичев // Бюл. изобрет. 2013. № 24.

16. **Didenko V., Sirotin D.** Accurate Measurement of Resistance and Inductance of Transformer Winding // Proc. XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth. Busan, 2012.

References

1. **Crotti G. e. a.** A Technique for Real-time Bandwidth Enhancement of Instrument Voltage Transformers. Proc. XXI IMEKO World Congress Measurement in Research and Industry. Check Republic, 2015.
2. **Dubovitskiy G.P.** Transformatory. Naznachenie i Oblasti Primeneniya [Elektron. Resurs] <http://model.exponenta.ru/electro/0070.htm> (Data Obrashcheniya 23.04.2017). (in Russian).
3. **Serov A.N.** Razrabotka i Issledovanie Pribora dlya Izmereniya Pokazateley Kachestva Elektroenergii s Povyshennoy Tochnost'yu: Avtoref. Diss. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2016. (in Russian).
4. **GOST 16110—82.** Transformatory Silovye. Terminy i Opredeleniya. (in Russian).
5. **GOST 18685—73.** Transformatory Toka i Napryazheniya. Terminy i Opredeleniya. (in Russian).
6. **GOST IEC 60044-1—2013.** Transformatory Izmeritel'nye. (in Russian).
7. **GOST 30830—2002.** Transformatory Silovye. Ch. 1. Obshchie polozheniya. (in Russian).
8. **GOST 9680—77.** Transformatory Silovye Moshchnost'yu 0,01 kV·A i Bolee. Ryad Nominal'nykh Moshchnostey. (in Russian).

9. **RD EO 0410—02.** Metodicheskie Ukazaniya po Otsenke Sostoyaniya i Prodleniyu Sroka Sluzhby Silovykh Transformatorov. (in Russian).

10. **Lur'e A.I., Shlegel' O.G.** Izmerenie Otkloneniya Induktivnogo Soprotivleniya pri Elektrodinamicheskikh Ispytaniyakh Silovykh Transformatorov. Elektrotehnika. 1991;12:35—38. (in Russian).

11. **Didenko V.I., Mayorshina T.S.** Kontrol' Kachestva Transformatora Napryazheniya pri Podache na Ego Vkhod Skachka Napryazheniya. Vestnik MPEI. 2012;3:58—61. (in Russian).

12. **PMG 96—2009.** GSI. Rezul'taty i Kharakteristiki Kachestva Izmereniy. Formy Predstavleniya. (in Russian).

13. **Vol'dek A.I., Popov V.V.** Elektricheskie Mashiny. Vvedenie v Elektromekhaniku. Mashiny Postoyannogo Toka i Transformatory. SPb.: Piter, 2008. (in Russian).

14. **Goroshko D.L.** Metrologiya, Standartizatsiya, Sertifikatsiya. Vladivostok: Izd-vo VGUES, 2003. (in Russian).

15. **Pat. № 2491559 RF.** Sposob Opredeleniya Soprotivleniya i Induktivnosti Rasseyaniya Pervichnoy

Obmotki Transformatora Napryazheniya / V.I. Didenko, A.A. Moskvichev Byul. izobret. 2013;24. (in Russian).

16. **Didenko V., Sirotin D.** Accurate Measurement of Resistance and Inductance of Transformer Winding. Proc. XX IMEKO World Congress Metrology for green Growth. Busan, 2012.

Сведения об авторах

Диденко Валерий Иванович — доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники НИУ «МЭИ», e-mail: didenkovi@mail.ru

Крюков Артем Кириллович — инженер ПАО «МАК «Вымпел», e-mail: idmoun@gmail.com

Information about authors

Didenko Valeriy I. — Dr. Sci.(Techn.), Professor of Information-Measuring Technique Dept., NRU MPEI, e-mail: didenkovi@mail.ru

Kriukov Artem K. — Engineer of PJSC «МАК «Vympel», e-mail: idmoun@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.05.2017