

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.317.322

### ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

### ESTIMATION OF ERRORS OF VOLTAGE TRANSFORMERS UNDER NON-SINUSOIDAL LOAD

Андреев Евгений Сергеевич

аспирант, e-mail: [root67@mail.ru](mailto:root67@mail.ru),

Andreev Evgeniy S., postgraduate student

Артемов Александр Иванович

канд. техн. наук, доцент, e-mail: [root67@mail.ru](mailto:root67@mail.ru),

Artemov Alexander I. C. Sc. (Engineering), Associate Professor

Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, дом 1

Smolensk branch of FSBEI HE «National research university «MPEI», house 1, Energy travel, Smolensk, 214013, Russian Federation

**Аннотация:** В статье проведен анализ характера нагрузок измерительных трансформаторов напряжения в современных условиях. На примере осциллограмм тока вторичной цепи ТН на действующей подстанции показано, что нагрузки ТН приобретают нелинейный характер. Производится анализ амплитудной и угловой погрешностей измерительных трансформаторов напряжения при работе их с нелинейными нагрузками. Делается вывод о том, что при увеличении полной мощности, потребляемой нелинейными нагрузками, амплитудная погрешность ТН не увеличивается и определяется только мощностью на основной частоте. При этом, угловая погрешность определяется уровнем и составом гармоник и может отличаться от угловой погрешности на первой гармонике.

**Abstract:** In article the analysis of the righteous character of loads in the measuring transformers of voltage in modern conditions. For example, the current waveforms of the secondary circuit TN to the existing substation is shown that the TN loads are becoming nonlinear in nature. The analysis of the amplitude and angular errors of instrument voltage transformers during their operation with nonlinear load. It is concluded that increasing of the total power consumed by nonlinear loads, an amplitude error of TN is not increased and is determined only by the power at the fundamental frequency. In this case, the angular error is determined by the level and composition of harmonics and may increase or decrease.

**Ключевые слова:** трансформатор напряжения, амплитудная погрешность, угловая погрешность, нелинейная нагрузка.

**Keywords:** voltage transformer, the amplitude error, angular error, non-linear load.

В последнее время в энергетике России возросли требования к точности учета и измерений потребляемой мощности в сетях среднего напряжения. Заменой индукционных счетчиков электрической энергии на электронные с более высоким классом точности часто не удается достигнуть требуемой точности. Одна из основных причин этого в том, что измерительные трансформаторы напряжения (ТН) эксплуатируются за пределами допустимого ГОСТом диапазона изменений их номинальных параметров, что приводит к увеличению их погрешностей и, как следствие, искажению показаний счетчиков.

Проблема повышения точности учета электроэнергии получила актуальность в связи с ростом нагрузок ТН на существующих и новых подстанциях за счет подключения к ним не только систем

учета электроэнергии, но и датчиков устройств телеизмерений и устройств РЗА, что обусловило перевод их в более низкий класс точности и к необходимости на ряде вновь вводимых подстанций устанавливать по две и более ячейки с ТН 6-10 кВ на секцию сборных шин. Однако установка дополнительных ТН на уже действующих подстанциях не всегда возможна.

Вместе с ростом нагрузок изменился и их характер. Согласно проведенному анализу, нагрузка измерительных трансформаторов напряжения (ТН) формируется так называемыми общестанционными нагрузками и нагрузками от цепей учета электроэнергии. Значительную часть этой нагрузки составляют блоки питания, реле фильтров нулевой последовательности, электронные счетчики и др. элементы, содержащие выпрямительные

Таблица 1. Спектр гармоник тока цепи напряжения счетчика и на вводе вторичной цепи ТН.

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Счетчик типа Меркурий 230AR-03													
$K_{i(k)}, \%$	100	0,02	2,38	0,21	2,88	0,83	3,78	2,84	16,39	12,05	8,83	0,88	3,03
$\varphi_{2(k)}, ^\circ$	-86,52	0	0	0	0	0	0	0	-79,59	-77,98	-78,45	0	0
Ввод вторичной цепи ТН на ПС 110/35/6кВ													
$K_{i(k)}, \%$	100	0,31	31,89	0,33	51,37	0,17	36,7	0,5	5,72	0,2	14,73	0,09	10,8
$\varphi_{2(k)}, ^\circ$	-24,32	0	119,48	-90,18	-111,57	0	-9,88	172,12	-38,09	0	-119,47	0	-146,91

где  $k$  – номер гармоники,  $\varphi_{2(k)}$  – фаза  $k$ -й гармоники.

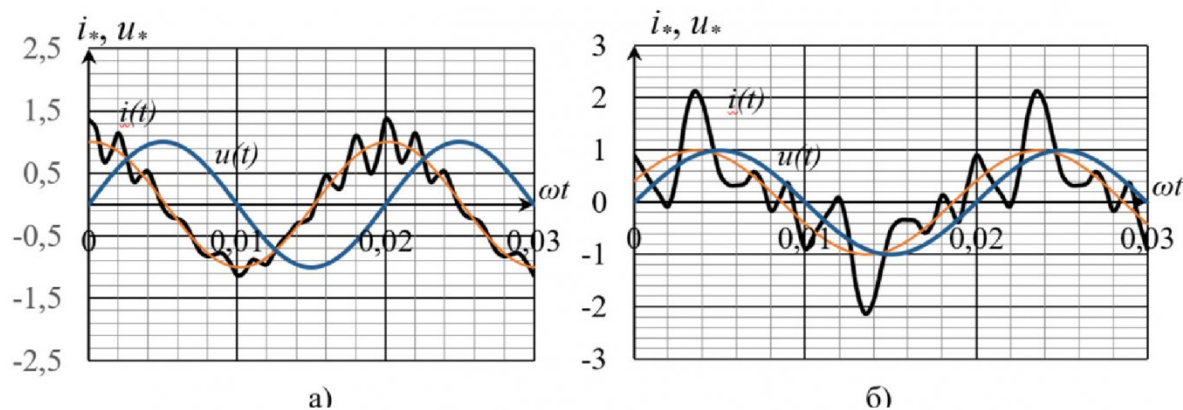


Рис. 1. а) Форма тока и напряжения на вводе счетчика типа Меркурий 230AR-03; б) форма нагрузочного тока ТН на ПС 110/35/6кВ.

Fig. 1. a) the form of the current and voltage at the input of the counter type mercury 230AR-03; b) shape of the load current, TON on SS 110/35/6kV.

элементы, которые являются нелинейными элементами, обуславливающими несинусоидальность токов нагрузки. Нелинейные нагрузки помимо основной гармоники генерируют потоки энергии высших гармоник, которые увеличивают кажущуюся полную мощность, по величине которой и осуществляется оценка погрешностей ТН.

Наличие высших гармоник тока во вторичных цепях ТН подтверждают в качестве примера замеры формы тока и напряжения, проведенные на вводе цепей напряжения электронного счетчика типа Меркурий 230 AR-03 и на вводе вторичной цепи ТН типа НАМИ-10, установленного на одной из ПС 110/35/10кВ. Результаты измерений представлены на рис. 1 и в табл. 1.

В ряде работ производились исследования качества измеряемого напряжения и других влияющих факторов на погрешности ТН [1 – 3]. Однако, до настоящего времени анализ погрешностей ТН при синусоидальном первичном напряжении, но несинусоидальном вторичном токе не производился. Поэтому задача оценки погрешностей ТН от несинусоидального тока во вторичной цепи является актуальной.

Нелинейные нагрузки являются генераторами высших гармоник, т.е. , получая энергию от ТН,

они потребляют энергию первой гармоники, частично преобразуют ее в энергию высших гармоник, которая возвращается обратно в ТН. Энергия высших гармоник, генерируемая нелинейными нагрузками, теряется в соединительных проводах, обмотках ТН и в других линейных нагрузках. При этом действующее значение мощности нагрузки ТН возрастает при сохранении активной мощности основной гармоники.

Для иллюстрации этих процессов и определения действительной полной мощности в системе с несинусоидальным током проведены исследования на схеме экспериментальной цепи ТН с нелинейной нагрузкой, которая создает ток несинусоидальной формы, представленной на рисунке 2(б).

Разложив представленную форму тока в ряд Фурье получили спектр действующих значений гармоник тока:  $I_{(1)} = 1,0A$ ;  $I_{(3)} = 0,354A$ ;  $I_{(5)} = 0,707A$ . Действующее значение несинусоидального тока:

$$I_{\alpha} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{(k)}^2} = \sqrt{1,0^2 + 0,354^2 + 0,707^2} = 1,28A \quad (1)$$

Учитывая, что  $U_1$  имеет синусоидальную форму, полная мощность, потребляемая из сети т:



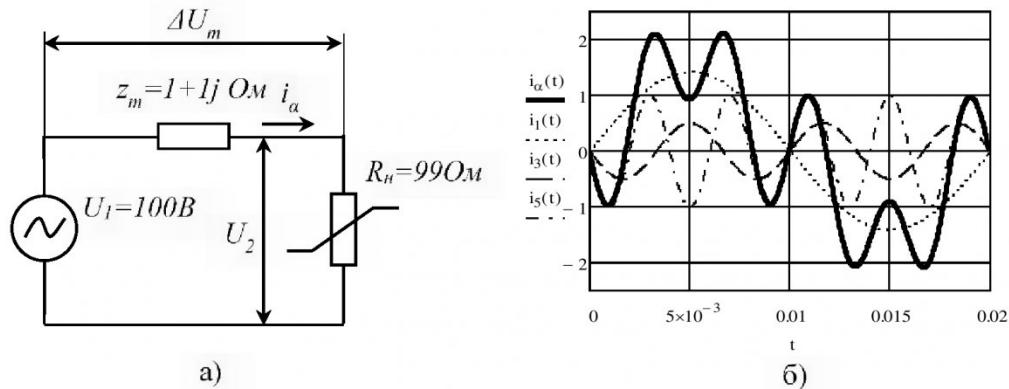


Рис. 2. Схема эксперимента (а), форма тока и напряжения (б).  
 Fig. 2. Scheme of experiment (a), the shape of voltage and current (b).

$$S = U_1 I_\alpha = 100 \cdot 1,28 = 128 \text{ВА}. \quad (2)$$

Полная мощность, потребляемая от источника на основной частоте:

$$S_{(1)} = U_1 I_{(1)} = 100 \cdot 1,0 = 100 \text{ВА}. \quad (3)$$

Активная составляющая полной мощности первой гармоники для этой схемы при  $R_n = 99 \text{Ом}$  и активном сопротивлении обмоток ТН  $R_m = 1,0 \text{Ом}$  составит:

$$P_{(1)} = I_{(1)}^2 (R_n + R_m) = 1,0^2 \cdot (99,0 + 1,0) = 100,0 \text{Вт}. \quad (4)$$

Таким образом, в данной схеме мощность, потребляемая на первой гармонике, является чисто активной, а в общем случае будет определяться характером нагрузки ТН (активная, активно-индуктивная, активно-емкостная).

При нелинейной нагрузке полная потребляемая мощность из сети всегда будет больше мощности на основной частоте в  $K_n$ , что подтверждается при подстановке в уравнение (2), записанное в общем виде, параметров рассматриваемого примера:

$$S_\alpha = U_1 I_\alpha = U_1 \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{(k)}^2} = U_1 I_{(1)} \sqrt{\sum_{k=1}^n K_{I(k)}^2} = S_{(1)} K_n$$

где  $K_{I(k)}$  – коэффициент  $k$ -й гармонической составляющей тока, (5)

$$K_n = \sqrt{\sum_{k=1}^n K_{I(k)}^2} = \sqrt{1^2 + 0,354^2 + 0,707^2} = 1,28 \quad (6)$$

Это увеличение полной мощности обусловлено генерацией нелинейной нагрузкой высших гармоник тока, которое будет являться реактивной мощностью вторичного потока энергии, циркулирующей между источником этих гармоник и источником питания  $U_1$ , вызывая дополнительные потери в сопротивлениях обмоток ТН и проводах линий связи:

$$\Delta P = (I_\alpha^2 + I_{(1)}^2) R_m = (1,28^2 + 1,0^2) 1,0 = 0,64 \text{Вт} \quad (7)$$

То есть происходит увеличение нагрузки ТН на величину дополнительных потерь  $\Delta P$  при сохранении активной мощности нагрузки вторичной цепи ТН.

Величина реактивной мощности вторичного потока энергии определяется зависимостью:

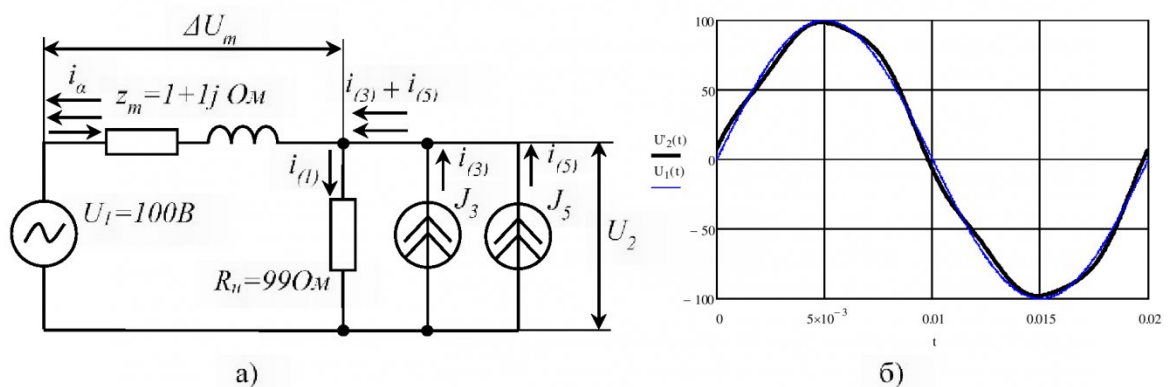


Рис. 3. Схема эксперимента (а), форма напряжения  $u_2(t)$  при работе ТН на нелинейную нагрузку (б).  
 Fig. 3. Scheme of experiment (a), the shape of the voltage  $u_2(t)$  for the TV on a nonlinear load (b).

$$Q = \sqrt{S_\alpha^2 - (P_{(1)} + \Delta P)^2} = \quad (8)$$

$$= \sqrt{128,0^2 - 100,6^2} = 79,1 \text{ Вap}$$

Коэффициент мощности полной нагрузки ТН составит:

$$\cos \varphi_\alpha = \frac{P_{(k)}}{S_\alpha} = \frac{100,6}{128,0} = 0,79. \quad (9)$$

В условиях эксплуатации измерениями действующих нагрузок ТН фиксируются следующие параметры:  $U_2$ ,  $S_\alpha$ ,  $I_\alpha$ ,  $\cos \varphi_\alpha$  по которым осуществляется оценка фактического класса точности в котором работает ТН. Однако фактические погрешности при нелинейной нагрузке не будут соответствовать погрешностям при той же мощности, но с линейной нагрузкой.

Произведем оценку погрешностей ТН при наличии высших гармоник через разность действующих значений измеряемого напряжения  $U_1$  и действующего значения напряжения  $U_2$  вторичной обмотки:

$$\Delta U_m = U_2 - U_1. \quad (10)$$

Для получения действующего значения напряжения  $U_2$  воспользуемся принципом суперпозиции, для чего определим падения напряжения в сопротивлении трансформатора  $\Delta \dot{U}_{m(k)}$  и напряжения  $\dot{U}_{2(k)}$  для каждой гармоники в отдельности (в матричной форме), т.е.:

$$\|\Delta \dot{U}_{m(k)}\| = \begin{pmatrix} \dot{I}_{(1)} z_{m(1)} \\ \dot{I}_{(3)} z_{m(3)} \\ \dot{I}_{(5)} z_{m(5)} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

$$\|\dot{U}_{2(k)}\| = \|\dot{U}_1\| - \|\Delta \dot{U}_{m(k)}\|. \quad (12)$$

Углы сдвига гармоник напряжения  $\dot{U}_{2(k)}$  по отношению к напряжению  $\dot{U}_{1(k)}$  определяются как:

$$\varphi_{U_{2(k)}} = \arctg \left( \frac{\text{Im}(\dot{U}_{2(k)})}{\text{Re}(\dot{U}_{2(k)})} \right). \quad (13)$$

Таким образом, напряжение  $\dot{U}_2$  будет иметь несинусоидальную форму, которую можно построить по следующему выражению:

$$u_2(t) = \sum_{k=1}^n |\dot{U}_{2(k)}| \sin(k\omega t + \varphi_{U_{2(k)}}). \quad (14)$$

В этом случае действующее значение напряжения  $U_2$  определяется выражением

$$U_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^n |\dot{U}_{2(k)}|^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n |\dot{U}_{1(k)} - \Delta \dot{U}_{m(k)}|^2}. \quad (15)$$

Если выделить составляющую первой гармоники и учесть отсутствие высших гармоник в со-

ставе  $\dot{U}_1$ , то (15) можно представить в виде:

$$U_2 = \sqrt{|\dot{U}_{1(1)} - \Delta \dot{U}_{m(1)}|^2 + \sum_{k=2}^n |-\Delta \dot{U}_{m(k)}|^2}$$

$$= \sqrt{|\dot{U}_{2(1)}|^2 + \sum_{k=2}^n |-\Delta \dot{U}_{m(k)}|^2} \quad (16)$$

Из анализа выражения (16) видно, что действующее значение несинусоидального напряжения  $U_2$  всегда больше действующего значения  $U_{2(1)}$  для первой гармоники:

$$U_{2(1)} = \sqrt{|\dot{U}_{1(1)} - \Delta \dot{U}_{m(1)}|^2}. \quad (17)$$

Напряжения  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  могут не совпадать по фазе (см. рисунок 3 (б) для рассматриваемого примера), тогда этот угловой сдвиг будет представлять собой угловую погрешность ТН. Этот угловой сдвиг может быть определен решением уравнения (14) относительно  $t$ , если приравнять его правую часть к нулю:

$$\sum_{k=1}^n |\dot{U}_{2(k)}| \sin(k\omega t + \varphi_{U_{2(k)}}) = 0. \quad (18)$$

Для перевода полученного значения временного сдвига  $t_0$  в градусы необходимо воспользоваться выражением:

$$\Delta \theta_{u\alpha} = \frac{t_0 \cdot 360}{T}. \quad (19)$$

Для проверки предложенной методики оценки погрешностей ТН от нелинейной нагрузки была предложена модель рассматриваемой схемы, приведенная на рисунке 3 (а).

В схеме синусоидальное напряжение  $\dot{U}_1$  подведено к нагрузке ТН с активным сопротивлением  $R_n = 99 \text{ Ом}$ .

Сопротивление эквивалентного трансформатора учитывается в схеме комплексным сопротивлением  $z_m = 1 + j \text{ Ом}$ .

Для формирования несинусоидальной формы тока параллельно сопротивлению нагрузки включены источники тока  $J_3$  и  $J_5$  с действующими значениями токов, соответствующими действующим значениям 3-й и 5-й гармоник тока.

Для данной схемы по приведенной выше методике были рассчитаны значения напряжений, токов и погрешностей для эквивалентного ТН, которые полностью совпали с результатами измерений на компьютерной модели в программном комплексе NI Multisim.

$$\|\Delta \dot{U}_m\| = \begin{pmatrix} \dot{I}_{(1)} z_{m(1)} \\ \dot{I}_{(3)} z_{m(3)} \\ \dot{I}_{(5)} z_{m(5)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,01 + j1,0 \\ -0,354 - j1,06 \\ -0,707 - j3,54 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \|\dot{U}_2\| &= \|\dot{U}_1\| - \|\Delta\dot{U}_m\| = \\ &= \begin{pmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1,01 + j1,0 \\ -0,354 - j1,06 \\ -0,707 - j3,54 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 98,99 - j1,0 \\ 0,354 + j1,06 \\ 0,707 + j3,54 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (21)$$

Матрица угловых сдвигов гармоник напряжения  $U_2$ :

$$\varphi_{U_2} = \begin{pmatrix} -0,57^\circ \\ 71,7^\circ \\ 78,8^\circ \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Форма полученного напряжения показана на рисунке 3 (б).

Действующее значение напряжения  $\dot{U}_2$  на первой гармонике:

$$|\dot{U}_{2(1)}| = |\dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_{m(1)}| \approx |99,0 - j1,0| = 99,0B. \quad (23)$$

Тогда амплитудная погрешность ТН на первой гармонике:

$$\Delta U_{u(1)} = U_{2(1)} - U_1 = 99,0B - 100,0 = -1,0B \quad (24)$$

Вектор напряжения  $U_1$  принимаем за начало отсчета, поэтому начальная фаза его равна нулю ( $\varphi_{U_1} = 0$ ).

Тогда вектор напряжения  $U_2$  поворачивается по отношению к вектору  $U_1$  на угол

$$\varphi_{U_{2(1)}} = \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{U}_{2(1)})}{\text{Re}(\dot{U}_{2(1)})}\right) = 0,57^\circ.$$

Угловая погрешность определяется выражением

$$\Delta\theta_{u(1)} = \varphi_{U_1} - \varphi_{U_2} = 0 - 0,57^\circ = -0,57^\circ. \quad (25)$$

Так как подводимое напряжение является синусоидальным, то при отсутствии в цепи токов высших гармоник, напряжение  $U_2$  будет так же синусоидальным. Это позволяет при расчете погрешностей пользоваться векторными диаграммами (см. рисунок 4).

Так как угол сдвига между векторами напряжений  $U_1$  и  $U_2$  небольшой, то амплитудную погрешность трансформатора на основной частоте можно упрощенно оценить исходя из действующего значения тока и модуля сопротивления трансформатора (без необходимости вести вычисления с комплексными числами) следующим выражением (см. векторную диаграмму на рис. 4):

$$\begin{aligned} \Delta U_{u(1)} &= -I_{(1)} \cdot z_{m(1)} \cos(\varphi_{2(1)} - \varphi_{z(1)}) = \\ &= -\Delta U_{m(1)} \cos \gamma_{(1)} \end{aligned} \quad (26)$$

где  $\varphi_{z(1)}$  – угол сопротивления трансформатора на частоте 50Гц.

$$\varphi_{z(1)} = \arctg\left(\frac{\text{Im}(z_{m(1)})}{\text{Re}(z_{m(1)})}\right) = 45,0^\circ.$$

Коэффициент мощности тока первой гармоники  $\cos\varphi_{2(1)} = 1$ , тогда  $\varphi_{2(1)} = 0^\circ$ .

$$\Delta U_{u(1)} = -1,414 \cos(0 - 45) = -1,0B,$$

что согласуется с результатом, полученным по формуле (24).

Угловую погрешность трансформатора на основной частоте можно упрощенно оценить следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{u(1)} &= 34,4 I_{2(1)} \cdot z_{m(1)} \sin(\varphi_{2(1)} - \varphi_{z(1)}) = \\ &= 34,4 \Delta\dot{U}_{m(1)} \sin \gamma_{(1)} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\Delta\theta_{u(1)} = 34,4 \cdot 1,414 \sin(0 - 45) = -34,4' = -0,57^\circ$$

что так же согласуется с результатом, полученным по формуле (25).

Действующее значение напряжения  $U_2$  при наличии высших гармоник:

$$U_2 = \sqrt{|\dot{U}_{2(1)}|^2 + \sum_{k=2}^n |\Delta\dot{U}_{m(k)}|^2} = 99,07B$$

Тогда амплитудная погрешность ТН с нелинейной нагрузкой:

$$\Delta U_{ua} = U_2 - U_1 = 99,07 - 100,0B = -0,93B.$$

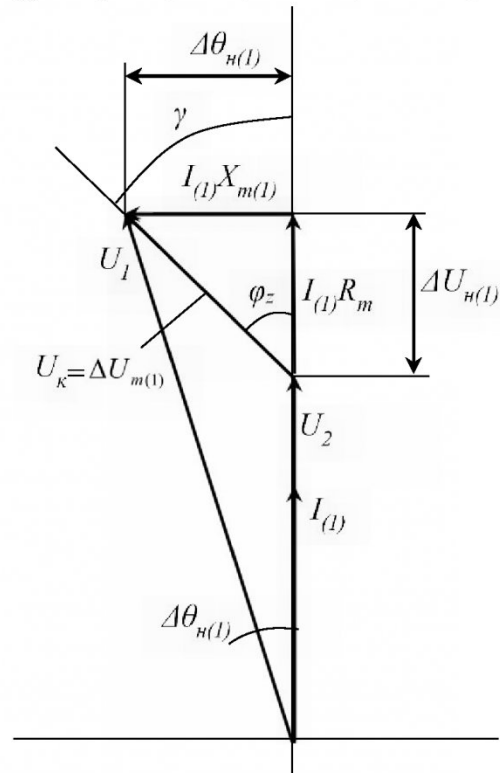


Рис. 4. Векторная диаграмма ТН под нагрузкой.  
Fig. 4. TV the vector diagram under load.

Решив уравнение (18) получим значение мо-

мента времени, когда кривая напряжения  $U_2$  пересекает ось времени

$$t_0 = 0,000109 \text{сек.}$$

Угловая погрешность при  $t_0 = 0,000109 \text{сек.}$ :

$$\Delta\theta_{\alpha} = 1,97^\circ.$$

Полученное значение угловой погрешности почти в 4 раза превышает значение, полученное по формуле (25) для первой гармоники ( $\Delta\theta_{n(1)} = -0,57^\circ$ ). Однако, расчеты для схем с другим составом высших гармоник показали, что величина угловой погрешности в значительной мере определяется амплитудами и фазами токов высших гармоник и может принимать другие соотношения по отношению к угловой погрешности на первой гармонике.

Таким образом, при работе ТН на нелинейную нагрузку, полная потребляемая нагрузкой мощность увеличивается за счет реактивной мощности искажения, но это не приводит к увеличению амплитудной погрешности ТН, в то время, как угловая погрешность может увеличиваться. При этом ГОСТ 1983-2001 предписывает определять погрешность ТН по величине полной мощности и  $\cos\phi$  его нагрузки. Поэтому в методику выбора и проверки ТН необходимо внести уточнения.

- Амплитудную погрешность ТН следует определять только по мощности первой гармоники тока нагрузки. Дополнительная мощность, потребляемая токами высших гармоник, незначительно влияет на величину погрешности ТН.

- Угловая погрешность ТН при наличии высших гармоник может отличаться от угловой погрешности на первой гармонике, поэтому её

следует оценивать исходя из формы напряжения  $U_2$  по методике, представленной выше.

Оценка ТН по предлагаемой уточненной методике может позволить в некоторых случаях отказаться от установки дополнительных ТН на подстанциях при соответствии требованиям по угловой погрешности.

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Нагрузка вторичных цепей ТН в современных условиях приобретает нелинейный характер из-за широкого применения электронной измерительной аппаратуры имеющей в своем составе импульсные блоки питания.

2. При протекании в цепи несинусоидального тока, потребляемая от источника полная мощность возрастает за счет реактивной мощности искажения, в то время как активная мощность, потребляемая нагрузкой, остается на том же уровне.

3. При работе ТН на нелинейную нагрузку, увеличение полной потребляемой нагрузкой мощности не приводит к увеличению амплитудной погрешности ТН, определенной по первой гармонике.

4. При работе ТН на нелинейную нагрузку, угловая погрешность может значительно отличаться от погрешности на первой гармонке.

5. В условиях эксплуатации недостаточно делать оценку пригодности использования ТН с нелинейной нагрузкой в заданном классе только по нагрузке первой гармоники. Обязательно проводить и оценку угловой погрешности по методике, изложенной в данной статье.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савина Н. В. Влияние качества электроэнергии на погрешность измерительных трансформаторов тока и напряжения / Н. В. Савина, М. А. Сухомесов // *Электричество*. – 2008. – №11. – С. 6–11.
2. Раскулов Р. Ф. Трансформаторы напряжения 3–35 кВ Факторы, влияющие на погрешности / Р. Ф. Раскулов // *Новости ЭлектроТехники*. – 2011. – №1(67).
3. Миرونюк Н. Е. [и др.] Влияние искажений синусоидальной формы кривых тока и напряжения на погрешности измерительных трансформаторов // *Электричество*. – 2005. – № 2. – С. 31–36.
4. Малый А. С. Устройство для симметрирования нагрузки трансформатора напряжения / А. С. Малый // *Электрические станции*. – 1991. – №4. – С. 74–78.
5. Малый А. С. Емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения / А. С. Малый // *Электрические станции*. – 1991. – №5. – С. 28–34.
6. Малый А. С. Выравнивание нагрузки и емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения, включенных по схеме открытого треугольника [Текст] / А. С. Малый // *Электрические станции*. – 1995. – №9. – С. 23–31.5.
7. Артемов А. И. Исследование нагрузки вторичных цепей измерительных трансформаторов напряжения / А. И. Артемов, Е. Д. Карасев, В. А. Левченков // *Новости ЭлектроТехники*. – 2010. – № 6(66).
8. Артемов А. И. Анализ методов компенсации погрешностей измерительных трансформаторов напряжения / А. И. Артемов, В. А. Левченков // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2007. – №3. – С. 35–37.
9. Андреенков Е. С. Уточнение погрешностей трехобмоточных трансформаторов напряжения / Е. С. Андреенков, А. И. Артемов // *Информационные технологии, энергетика и экономика Сборник трудов*

XII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3-х томах. – Смоленск: Универсум, 2015. – С. 6-10.

10. Вавин В. Н. Трансформаторы напряжения и их вторичных цепи / В. Н. Вавин. – Изд. 2-е, перераб и доп. – М.: Энергия, 1977. – 104 с.

11. Дымков А. М. [и др.] Трансформаторы напряжения / А. М. Дымков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975.

12. Русин Ю. С. [и др.] Электромагнитные элементы радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Ю. С. Русин, И. Я. Гликман, А. Н. Горский. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

13. Стародубцев Ю. Н. Измерительные трансформаторы напряжения / Ю. Н. Стародубцев // ГАМ-МАМЕТ ИНФОРМ. – 1999. – №5.

14. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. М.: Стандартиформ. – 2006.

15. ГОСТ 30804.4.7-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. М.: Стандартиформ. – 2013.

## REFERENCES

1. Savina NB. V. Impact of power quality on the error of measuring transformers of current and voltage / N. V. Savina, M. A. Suhanov // *Elektrichestvo*. – 2008. – No. 11. – S. 6-11. (rus)

2. Rascalov R. F. voltage Transformers 3-35 kV Factors influencing error / R. F. Rasulov // *news Electrical engineering*. – 2011. – №1(67). (rus)

3. Mironyuk N. E. [and others] the Influence of distortion of the sinusoidal waveforms of current and voltage at the error of the measuring transformers // *Elektrichestvo*. – 2005. – No. 2. – P. 31-36. (rus)

4. Maliy A. S. Device for balancing the load voltage transformer / C. A. Small // *Electric station*. – 1991. – No. 4. – P. 74-78. (rus)

5. Maliy A. S. Capacitive compensation of the error voltage transformers / C. A. Small // *Electric station*. – 1991. – No. 5. – P. 28-34. (rus)

6. Maliy A. S. load and capacitive compensation of the error voltage transformers connected in an open Delta [Text] / C. A. Small // *Electric station*. – 1995. – No. 9. – P. 23-31.5. (rus)

7. Artemov, A. I., loads of secondary circuits of instrument transformers, voltage / A. I. Artemov, E. D. Karasev, V. A. Levchenkov // *news Electrical engineering*. – 2010. – № 6(66). (rus)

8. Artemov A. I. Analysis of methods of compensating errors in instrument transformers voltage / A. I. Artemov, V. A. Levchenkov // *Bulletin of the Kuzbass state technical University*. – 2007. – No. 3. – S. 35-37. (rus)

9. Andreenkov E. S. Specification of errors of three-winding voltage transformers / E. S. Andreenkov, A. I. Artemov // *Information technology, energy and the economy proceedings of the XII International scientific-technical conference of students and graduate students*. In 3 volumes. – Smolensk: Universum, 2015. – P. 6-10. (rus)

10. Wavin N. R. Voltage transformers and their secondary circuits / V. N. Wavin. – Ed. 2nd, pererab and extra – М.: Energy, 1977. – 104 p. (rus)

11. Dimkov A. M. [and others] voltage Transformers / M. A. Dymkov. – 2nd ed. Rev. and extra – М.: Energy, 1975. (rus)

12. Rusin Y. S. [and others] Electromagnetic elements of radio-electronic equipment: Reference book / Y. C. Rudin, I. Y. Glickman, A. N. Gorsky. – М.: Radio and communication, 1991. – 224 p. (rus)

13. Starodubtsev Yu. Voltage transformers / U. N. Starodubtsev // *Hammamet INFORM*. – 1999. – No. 5. (rus)

14. GOST 1983-2001. The voltage transformers. General technical conditions. М.: STANDARTINFORM. – 2006. (rus)

15. GOST 30804.4.7-2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. General leadership by means of measurements and measurements of harmonics and interharmonic for power supply systems and connected to them technical means. М.: STANDARTINFORM. – 2013. (rus)

Поступило в редакцию 11.11.2015

Received 11 November 2015