УДК 621.317.322

А.И. АРТЕМОВ, к.т.н., доц.
Е.С. АНДРЕЕНКОВ, асп.
(Филиал ФГБОУ ВО "НИУ"МЭИ" в г. Смоленске)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКЕ ВТОРИЧНОЙ ЦЕПИ

Современная измерительная аппаратура, которая является основной нагрузкой для трансформаторов напряжения (ТН), выполняется на полупроводниковой базе, из-за чего она формирует нелинейный характер нагрузок ТН. Это приводит к появлению во вторичной цепи ТН токов высших гармоник значительного уровня, которые генерируют потоки реактивной мощности, что приводит к увеличению полной мощности нагрузки, 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 НТМИ-6, установленного на одной из ПС 110/35/10кВ. Результаты измерений представлены на рисунке 1 и в таблицах 1 и 2. Измерения производились с использованием измерительного комплекса на основе прибора Энергомонитор - 3.3Т1 производства НПП Марс-Энерго.

Исследования влияния качества измеряемого напряжения и других факторов на погрешности ТН производились в некоторых работах [1 – 3]. Но анализ погрешностей ТН при синусоидальном первичном напряжении и несинусоидальном вторичном токе не производился. Поэтому задача оценки погрешностей ТН от несинусоидального тока во вторичной цепи является актуальной.

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

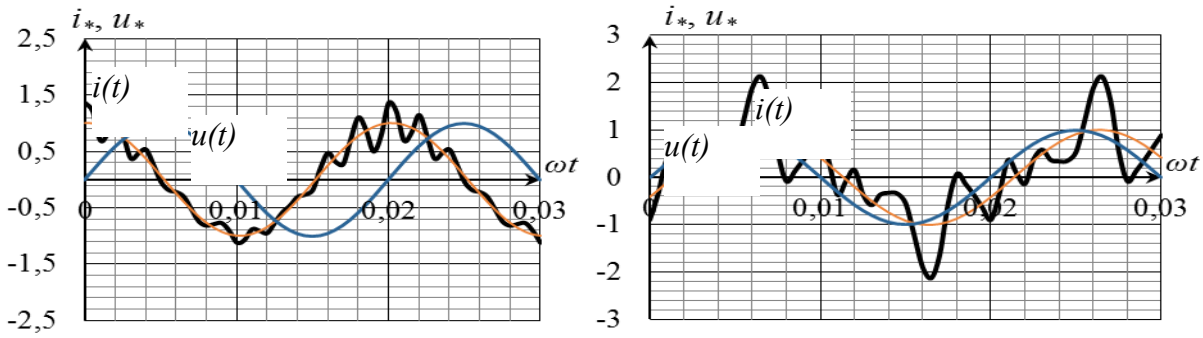
k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Счетчик типа Меркурий 230AR-03													
$K_{i(k)}$, %	100	0,02	2,38	0,21	2,88	0,83	3,78	2,84	16,39	12,05	8,83	0,88	3,03
$\varphi_{2(k)}$, °	-86,52	0	0	0	0	0	0	0	-79,59	-77,98	-78,45	0	0
Ввод вторичной цепи ТН на ПС 110/35/6кВ													
$K_{i(k)}$, %	100	0,31	31,89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

Таблица 2 – Данные измерений во вторичной цепи ТН типа НТМИ-6 на ПС 110/35/6кВ

$I_{A\alpha}$, A	$I_{A(1)}$, A	$S_{A\alpha}$, BA	$P_{A\alpha}$, Bm	$P_{An(1)}$, Bm	$cos\varphi_{\alpha}$	$cos\varphi_{(1)}$
0,50	0,41	29,2	21,3	21,3	0,73	0,91

где $I_{A\alpha}$, $I_{A(1)}$ – действующие значения тока фазы А во вторичной цепи соответственно полного тока и тока первой гармоники; $S_{A\alpha}$ – полная мощность, потребляемая нагрузкой ТН фазы А; $P_{A\alpha}$, $P_{An(1)}$ – активная мощность нагрузки фазы А ТН соответственно полная и на первой гармонике; $cos\varphi_{\alpha}$, $cos\varphi_{(1)}$ – коэффициенты мощности нагрузки соответственно полной и на первой гармонике.



а) б)

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

В ходе исследования был произведен расчет погрешностей ТН типа НТМИ-6 при нелинейной нагрузке, создающей ток несинусоидальной формы, представленной на рисунке 1(б). Для этого была разработана схема замещения эквивалентной цепи одной фазы рассматриваемого ТН, представленная на рисунке 2. Для рассмотрения принята фаза А как наиболее загруженная.

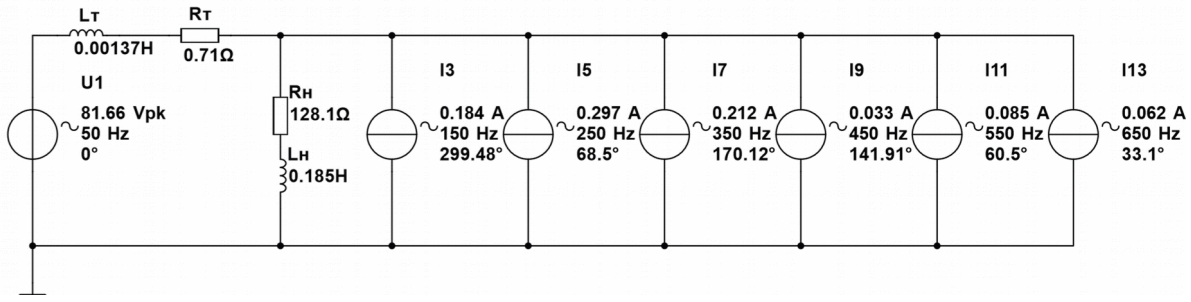


Рисунок 2 - Схема эксперимента.

Схема включает в себя источник фазного синусоидального напряжения вторичной цепи ТН, действующее значение которого $U_1=100/\sqrt{3}=57,7B$.

$$u_1(t) = U_{1m}\sin\omega t = 57,7\sqrt{2}\sin\omega t\,. \qquad (1)$$

Это напряжение подведено к нагрузке ТН с активно-индуктивным сопротивлением $z_н$ = $128,1$ + $58,2Ом$. Сопротивление эквивалентного трансформатора учитывается в схеме комплексным сопротивлением z_m =

0,71 + 0,43jОм, что соответствует сопротивлению обмоток трансформатора типа НТМИ-6. Для формирования несинусоидальной формы тока параллельно сопротивлению нагрузки включены источники тока $I_3 - I_{13}$. I_k – источник синусоидального тока с амплитудой k-й гармоники и частотой $k \cdot 50Гц$ согласно данным таблицы 1.

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

$$\Delta U_m = U_2 - U_1 . \tag{2}$$

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.:

$$\left\| \Delta \dot{U}_m \right\| = \begin{pmatrix} \dot{I}_{(1)} z_{m(1)} \\ \dot{I}_{(3)} z_{m(3)} \\ \dot{I}_{(5)} z_{m(5)} \\ \dot{I}_{(7)} z_{m(7)} \\ \dot{I}_{(9)} z_{m(9)} \\ \dot{I}_{(11)} z_{m(11)} \\ \dot{I}_{(13)} z_{m(13)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}336 + j0{,}041 \\ -0{,}192 - j0{,}0022 \\ 0{,}365 - j0{,}304 \\ 0{,}182 + j0{,}426 \\ 0{,}069 + j0{,}061 \\ 0{,}226 - j0{,}177 \\ 0{,}108 - j0{,}223 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

$$\left\| \dot{U}_2 \right\| = \left\| \dot{U}_1 \right\| - \left\| \Delta \dot{U}_m \right\| = \begin{pmatrix} 57{,}7 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0{,}336 + j0{,}041 \\ -0{,}192 - j0{,}0022 \\ 0{,}365 - j0{,}304 \\ 0{,}182 + j0{,}426 \\ 0{,}069 + j0{,}061 \\ 0{,}226 - j0{,}177 \\ 0{,}108 - j0{,}223 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 57{,}364 - j0{,}041 \\ 0{,}192 + j0{,}0022 \\ -0{,}365 + j0{,}304 \\ -0{,}182 - j0{,}426 \\ -0{,}069 - j0{,}061 \\ -0{,}226 + j0{,}177 \\ -0{,}108 + j0{,}223 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

где числовые значения приняты по результатам замеров (см. табл. 1-2).

Матрица угловых сдвигов гармоник напряжения U_2:

$$\varphi_{U2} = \begin{pmatrix} -0{,}041° \\ 0{,}65° \\ -39{,}8° \\ 66{,}9° \\ 41{,}5° \\ -38.0° \\ -64{,}1° \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Результирующее напряжение U_2 будет иметь несинусоидальную форму, которая строится по выражению (6) и приведена на рисунке 3:

$$u_2(t) = \sum_{k=1}^{n} \left| \dot{U}_{2(k)} \right| \sin\left(k\omega t + \varphi_{U2(k)} \right). \tag{6}$$

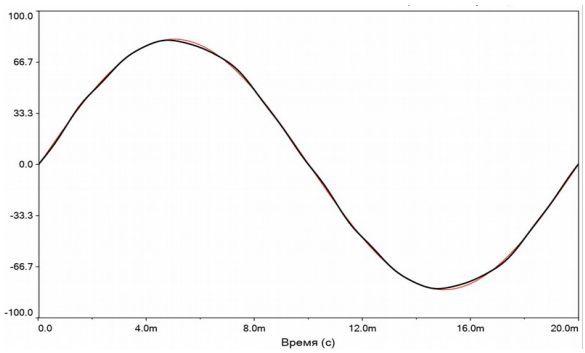


Рисунок 3 – Форма напряжения $u_2(t)$ при работе ТН на нелинейную нагрузку.

Действующее значение этого напряжения U_2:

$$U_2 = \sqrt{\left|\dot{U}_{2(1)}\right|^2 + \sum_{k=2}^{n}\left|-\Delta\dot{U}_{m(k)}\right|^2} = 57{,}370B\,. \qquad (7)$$

Амплитудная погрешность ТН определим по выражению (2):

$$\Delta U_{н\alpha} = U_2 - U_1 = 57{,}37 - 57{,}70B = -0{,}33B\,. \qquad (8)$$

Из анализа выражения (7) видно, что действующее значение несинусоидального напряжения U_2 всегда больше действующего значения напряжения для первой гармоники $U_{2(1)}$:

$$U_{2(1)} = \sqrt{\left|\dot{U}_{1(1)} - \Delta\dot{U}_{m(1)}\right|^2} = \sqrt{\left|\dot{U}_{2(1)}\right|^2} = 56{,}36B\,. \qquad (9)$$

Таким образом, амплитудная погрешность при нелинейной нагрузке оказывается меньше, чем погрешность на первой гармонике.

При рассмотрении формы кривой напряжения U_2 (рисунок 4) видно, что она выходит не из начала координат, а имеет некоторый угловой сдвиг, что свидетельствует о наличии угловой погрешности, ведь начальная фаза напряжения U_1 равна нулю. Рассчитаем угловую погрешность решив уравнение (6) относительно t, приравняв правую часть равной нулю:

$$\sum_{i=1}^{n}\left|\dot{U}_{2(k)}\right|\sin\left(\omega t + \varphi_{U2(k)}\right) = 0\,. \qquad (10)$$

Для решения уравнения воспользуемся ЭВМ, тогда получим значение момента времени, когда кривая напряжения U_2 пересекает ось времени $t_0 = 0{,}0000124сек$. Переведём временной сдвиг в минуты

$$\Delta\theta_{н\alpha} = \frac{t_0 \cdot 360}{T} \cdot 60 = 13{,}4'\,. \qquad (11)$$

Угловая погрешность на первой гармонике определяется углом поворота вектора напряжения $\dot{U}_2$ по отношению к вектору $\dot{U}_1$

$$\varphi_{U2(1)} = arctg\left(\frac{\mathrm{Im}(\dot{U}_{2(1)})}{\mathrm{Re}(\dot{U}_{2(1)})}\right) = -0{,}12°\,. \qquad (12)$$

$$\Delta\theta_{н(1)} = \varphi_{U1} - \varphi_{U2} = 0 + 0{,}04° = 0{,}04°\left(2{,}4'\right). \qquad (13)$$

Полученное значение угловой погрешности почти в 6 раз меньше значения, полученного для несинусоидального тока ($\Delta\theta_{н(1)} = 13{,}4'$).

Таким образом, при работе ТН на нелинейную нагрузку, несмотря на то, что полная потребляемая нагрузкой мощность увеличивается за счет реактивной мощности искажения, амплитудная погрешность ТН не

увеличивается. Однако угловая погрешность может увеличиваться. При этом ГОСТ 1983-2001 предписывает определять погрешность ТН по величине полной мощности и *cosφ* 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.

Данные выводы подтверждаются при оценке класса точности рассматриваемого ТН типа НТМИ-6, для которого предельная мощность в классе 0,5 составляет 75ВА. По результатам измерений (таблица 2) в рассматриваемом примере полная трехфазная мощность нагрузки $S_\alpha = S_{A\alpha} \cdot 3 = 29,2 \cdot 3 = 87,6BA$. То есть при такой оценке рассматриваемый трансформатор может работать только в классе точности 1,0 для которого предельная мощность составляет 150ВА. Однако согласно расчетам, фактическая амплитудная погрешность ТН составила 0,33В, а угловая погрешность 13,4’, что удовлетворяет требованиям класса 0,5. При этом полная трехфазная мощность нагрузки, потребляемая на первой гармонике составила $S_{(1)} = P_{Ан(1)}/cos\varphi_{(1)} \cdot 3 = 23,5 \cdot 3 = 70,5BA$. Такая нагрузка позволяет эксплуатировать ТН в классе точности 0,5, что и подтверждается результатами расчетов.

Список литературы

1. Савина Н. В. Влияние качества электроэнергии на погрешность измерительных трансформаторов тока и напряжения [Текст] / 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 [Текст] / Р. Ф. Раскулов // Новости ЭлектроТехники. – 2011. – №1(67).
3. Миронюк Н. Е. [и др.] Влияние искажений синусоидальной формы кривых тока и напряжения на погрешности измерительных трансформаторов [Текст] // Электричество. – 2005. – № 2. – С. 31–36.