

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

*В работе исследованы неопределенности показателей несинусоидальности напряжения в сетях переменного тока в соответствии с ГОСТ 13109 – 97 при различных способах их расчета.*

В свете постоянного роста цен на электрическую энергию, появления новых разработок, повышения требований к достоверности контроля особое значение имеет метрологическое обеспечение измерения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) и оценка его влияния на точность ее учета [1, 2]. Измерение и учет электрической энергии являются важнейшими элементами эффективного использования топливно-энергетических ресурсов страны. Обзор современного состояния метрологического обеспечения измерения ПКЭ позволил выделить ряд нерешенных вопросов, имеющих непосредственное отношение к вопросу повышения точности измерения этих показателей, одним из которых является недостаточная степень изученности погрешностей определения ПКЭ в соответствии с ГОСТ 13109-97 [3], являющимся основным нормативным документом в этой области.

Одним из основных ПКЭ является несинусоидальность напряжения, характеризующаяся следующими показателями:

- а) коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;
- б) коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения.

Повышение достоверности оценивания несинусоидальности напряжения является актуальной и, в первую очередь, экономически важной задачей. Это связано с тем, что несинусоидальность напряжения приводит к увеличению потерь активной мощности; увеличению потребления активной и реактивной мощностей; ускорению старения изоляции электрооборудования; ограничению области применения конденсаторных батарей для повышения коэффициента мощности; повышению себестоимости продукции за счет увеличенного удельного расхода электроэнергии при невозможности применения конденсаторных установок; снижению надежности работы элементов сети из-за увеличения вероятности возникновения однофазных замыканий на землю и перехода их в многофазные короткие замыкания на землю; сбоям в работе систем импульсно-фазового управления преобразователями приводов технологических установок и другим негативным последствиям.

**Цель работы** – исследование неопределенности коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения.

### **1. Оценивание неопределенности коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.**

В соответствии с [3] значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_{U_i}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения определяют по формуле

$$K_{U_i} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}}, \quad (1)$$

где  $U_{(1)i}$  – действующее значение междуфазного (фазного) напряжения основной частоты для  $i$ -го наблюдения;

$N$  – количество учитываемых гармонических составляющих. ГОСТ 13109 предусматривает учет гармонических составляющих напряжения в диапазоне гармоник от 2-й до 40-й.

Выражение (1) может быть записано в виде [4]

$$K_{U_i} = \frac{U_{Bi}}{U_{(1)i}}, \quad (2)$$

где  $U_{Bi}$  – действующее значение высших гармоник напряжения  $u(t)$  для  $i$ -го наблюдения, которое можно определить по формулам

$$U_{Bi} = \sqrt{\sum_{n=2}^N U_{(n)i}^2} \quad (3)$$

или

$$U_{Bi} = \sqrt{U_i^2 - U_{(1)i}^2}. \quad (4)$$

где  $U$  – действующее значение напряжения  $u(t)$  для  $i$ -го наблюдения.

В последнем случае

$$K_{U_i} = \sqrt{\frac{U_i^2 - U_{(1)i}^2}{U_{(1)i}^2}}. \quad (5)$$

Неопределенность по типу  $A$  коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, определенного по формуле (1), может быть получена как

$$s(K_{U_i}) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{U_i}}{\partial U_{(1)i}^2}\right)^2 s^2(U_{(1)i}^2) + \left(\frac{\partial K_{U_i}}{\partial U_{Bi}^2}\right)^2 s^2(U_{Bi}^2) + 2 \frac{\partial K_{U_i}}{\partial U_{(1)i}^2} \frac{\partial K_{U_i}}{\partial U_{Bi}^2} r(U_{(1)i}^2, U_{Bi}^2) s(U_{(1)i}^2) s(U_{Bi}^2)}, \quad (6)$$

где коэффициенты влияния определяются по формулам

$$\frac{\partial(K_{U_i})}{\partial(U_{(1)i}^2)} = -\frac{K_{U_i}^2}{2U_{(1)i}^2 K_{U_i}} = -\frac{K_{U_i}}{2U_{(1)i}^2}; \quad \frac{\partial(K_{U_i})}{\partial(U_{(n)i}^2)} = \frac{1}{2U_{(1)i}^2 K_{U_i}}. \quad (7)$$

Найдем неопределенность величины (3).

Действующие значения квадратов гармонических составляющих  $U_{(n)i}^2$  вычисляются в соответствии с выражением

$$U_{(n)i}^2 = \frac{1}{2}(U_{(n)xi}^2 + U_{(n)yi}^2), \quad (8)$$

где  $U_{(n)xi}^2$ ,  $U_{(n)yi}^2$  – квадратурные составляющие гармоник:

$$U_{(n)xi}^2 = \frac{2}{m} \sum_{q=0}^{m-1} u(t_q) \sin n\omega t_q; \quad U_{(n)yi}^2 = \frac{2}{m} \sum_{q=0}^{m-1} u(t_q) \cos n\omega t_q, \quad (9)$$

где  $u(t_q)$  – мгновенные значения исследуемого напряжения в точках дискретизации  $t_q$ ;

$\omega$  – круговая частота исследуемого напряжения;

$m$  – количество точек дискретизации.

Если (9) подставить в (8) и осуществить элементарные преобразования, то действующие значения квадратов гармонических составляющих  $U_{(n)i}^2$  определяются по формуле [4]

$$U_{(n)i}^2 = \frac{2}{m^2} \sum_{q=1}^m \sum_{s=1}^m u(t_q) u(t_s) \cos(n\omega(t_q - t_s)). \quad (10)$$

Неопределенность величины (3) с учетом корреляционных связей между составляющими можно рассчитать по формуле [5]

$$s(U_{Bi}^2) = s\left(\sum_{n=2}^N U_{(n)i}^2\right) = \sum_{n=2}^N s(U_{(n)i}^2). \quad (11)$$

Коэффициент корреляции  $r(U_{(1)i}^2, U_{Bi}^2) = 1$  [5], следовательно, неопределенность коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

$$s(K_{Ui}) = \frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_{(1)i}^2} s(U_{(1)i}^2) + \frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_{Bi}^2} s(U_{Bi}^2). \quad (12)$$

Подставляя в (12) выражения (7), получаем

$$s(K_{Ui}) = \frac{1}{2U_{(1)i}^2 K_{Ui}} [\sigma(U_{Bi}^2) - K_{Ui}^2 \sigma(U_{(1)i}^2)]. \quad (13)$$

Если неопределенности гармонических составляющих исследуемого сигнала практически одинаковы, то  $s(U_{Bi}^2) = \sum_{n=2}^N s(U_{(n)i}^2) = (N-1)s(U_{(1)i}^2)$  и дисперсия коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения

$$s(K_{Ui}) = \frac{1}{2U_{(1)i}^2 K_{Ui}} [(N-1)^2 - K_{Ui}^2] s(U_{(1)i}^2). \quad (14)$$

Как следует из этого выражения, неопределенность коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения нелинейно зависит от значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения и равна нулю при  $K_{Ui} = N-1$ .

Неопределенность коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, определенного по формуле (5), определяется из выражения

$$s(K_{Ui}) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_{(1)i}^2}\right)^2 s^2(U_{(1)i}^2) + \left(\frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_i^2}\right)^2 s^2(U_i^2) + 2 \frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_{(1)i}^2} \frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_i^2} r(U_{(1)i}^2, U_i^2) s(U_{(1)i}^2) s(U_i^2)}, \quad (15)$$

где коэффициенты влияния

$$\frac{\partial(K_{Ui})}{\partial(U_{(1)i}^2)} = -\frac{1+K_{Ui}^2}{2U_{(1)i}^2 K_{Ui}}; \quad \frac{\partial(K_{Ui})}{\partial(U_i^2)} = \frac{1}{2U_{(1)i}^2 K_{Ui}}. \quad (16)$$

Поскольку первая гармоническая составляющая  $U_{(1)i}^2$  определяется по выражениям (8) – (10) непосредственно по мгновенным значениям исследуемого сигнала  $u(t)$ , то коэффициент корреляции  $r(U_{(1)i}^2, U_i^2) = 1$ , что подтверждается результатами компьютерного моделирования. Вследствие этого выражение (15) приобретает вид

$$s(K_{Ui}) = \frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_{(1)i}^2} s(U_{(1)i}^2) + \frac{\partial K_{Ui}}{\partial U_i^2} s(U_i^2), \quad (17)$$

и, подставляя (16), получаем

$$s(K_{U_i}) = \frac{1}{2U_{(1)}^2 K_{U_i}} [s(U_{(1)i}^2) - (1 + K_{U_i}^2) s(U_i^2)], \quad (18)$$

и если  $s(U_{(1)i}^2) \approx s(U_i^2)$ , то

$$s(K_{U_i}) = \frac{K_{U_i}}{2U_{(1)}^2} s(U_{(1)i}^2). \quad (19)$$

## 2. Оценивание неопределенности коэффициента $n$ -ой гармонической составляющей напряжения

В соответствии с ГОСТ 13109-97 коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U_{(n)i}}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения определяют по формуле

$$K_{U_{(n)i}} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}} \quad (20)$$

с последующим усреднением.

В общем случае неопределенность коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения

$$s(K_{U_{(n)i}}) = \left[ \left( \frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(1)i}} \right)^2 s^2(U_{(1)i}) + \left( \frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(n)i}} \right)^2 s^2(U_{(n)i}) + 2 \frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(1)i}} \frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(n)i}} r(U_{(1)i}, U_{(n)i}) s(U_{(1)i}) s(U_{(n)i}) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (21)$$

где коэффициенты влияния

$$\frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(1)i}} = -\frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}^2} = -\frac{K_{U_{(n)i}}}{U_{(1)i}}; \quad \frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(n)i}} = \frac{1}{U_{(1)i}}. \quad (22)$$

Ранее было показано, что коэффициент корреляции между двумя любыми гармоническими составляющими напряжения равен 1, поэтому выражение (21) преобразуется к виду

$$s(K_{U_{(n)i}}) = \frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(1)i}} s(U_{(1)i}) + \frac{\partial K_{U_{(n)i}}}{\partial U_{(n)i}} s(U_{(n)i}) \quad (23)$$

и при подстановке (22)

$$s(K_{U_{(n)i}}) = \frac{1}{U_{(1)i}} [s(U_{(1)i}) + K_{U_{(n)i}} s(U_{(n)i})]. \quad (24)$$

Если  $s(U_{(n)i}) \approx s(U_{(1)i})$

$$s(K_{U_{(n)i}}) = \frac{1}{U_{(1)i}} [1 + K_{U_{(n)i}}] s(U_{(1)i}). \quad (25)$$

Таким образом, исследованы неопределенности коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения при расчете по разным алгоритмам и коэффициента  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения с учетом корреляционных связей между гармоническими составляющими сигнала и параметрами, входящими в расчетные соотношения. Показано, что неопределенность показателей несинусоидальности напряжения можно уменьшить при оптимальном выборе контролируемых гармонических составляющих сигнала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лахов В.М., Асташенков А.И. Состояние метрологического обеспечения учета энергоресурсов// Измерительная техника. – 2002. - № 6. – С. 61 – 65.
2. Дажанов А.С., Зацепин Е.П., Захаров К.Д. Влияние качества электроэнергии на показания счетчиков// Промышленная энергетика. – 2004. – №5. – С. 40 – 43.
3. ГОСТ 13109 – 97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.2000. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 31 с.
4. Горлач А. А. и др. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике/ А. А. Горлач, М. Я. Минц, В. Н. Чинков. – К.: Техніка, 1985. – 151 с.
5. Сергиенко М.П. Неопределенность динамических характеристик при их взаимном пересчете // Системы обработки информации, 2009. – вып. 5 (79). – С. 50 – 54.