

Р. Х. Тукшаитов, О. Д. Семенова

О КОЭФФИЦИЕНТАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРОВНЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ, И УНИФИКАЦИИ ИХ НАИМЕНОВАНИЙ. ЧАСТЬ 1

R. Kh. Tukshaitov,
O. D. Semenova

На основе ретроспективного анализа научно-технической литературы описан характер изменения во времени наименования показателя уровня высших гармоник напряжения электросети, применяемого в нормативных документах и публикациях. Установлено, что в энергетике наряду с применяемым в последнем варианте ГОСТ 32144-2013 наименованием, используется большое количество других выражений условно относимых к его “синонимам”. Такое положение ведет к разночтению, неопределенности и даже к ошибочным результатам его вычисления.

Ключевые слова: коэффициент нелинейной нагрузки, разночтение, инверсия термина, унификация, высшая гармоника, ошибочная интерпретация.

On the Coefficients Applied for the Current and Voltage Higher Harmonics Level Characterization and Unification of Their Designation. Part 1

Based on retrospective analysis of scientific and technical literature the article describes the variation with time of designation of higher harmonics level indicator of mains voltage, applied in regulatory documents and publications. It was established that along with the designation applied in the latest State Standard 322144-2013 option a vast number of other designations related conditionally to its “synonyms” is being employed. This situation leads to the discrepancy, uncertainty and even to erroneous results of its computation.

Key words: nonlinear load factor, discrepancy, term inversion, unification, higher harmonic, erroneous interpretation.

Уровни высших гармоник напряжения и тока электрической сети входят в число важных показателей, используемых для характеристики качества электрической энергии. Применение разных и созвучных наименований данных показателей, к тому же обновляемых со временем в энергетике от стандарта к стандарту, ведет к разночтению, неопределенности и даже подмене понятий. Для выяснения сложившегося положения следует провести ретроспективный анализ научной литературы за истекшие 50–60 лет.

Начиная с середины двадцатого века, для характеристики нелинейных искажений синусоидального сигнала в радиоэлектронике начали применять два базовых термина — первоначально это коэффициент гармонических искажений K_G , а затем коэффициент нелинейных искажений K_H . Причем первый коэффициент определяется как отношение среднеквадратического значения суммы гармоник действующего напряжения (тока) к действующему значению входного напряжения (тока) [1–3], а второй — как отношение среднеквадратического значения действующего напряжения (тока) к действующему значению его основной гармоники [4–6].

Коэффициент K_G электронных усилителей ранее был всего на уровне 1–2%, а нелинейных элементов не превышал 10–15%. В этих небольших пределах значения K_G и K_H с достаточной высотой точностью совпадают, что в определенной степени позволяло на раннем этапе воспринимать их в качестве синонимов [4]. В электротехнике, в отличие от радиоэлектроники,

находит применение другой показатель, также именуемый коэффициентом гармонических искажений, но изменяющийся в противоположном направлении. Это, бесспорно, является дополнительным источником разночтения результатов измерений.

Основной причиной появления большого количества терминов в энергетике явилось то, что в каждом последующем актуализированном нормативном документе, начиная с ГОСТ 13109-67 [7], наименование коэффициента КН постоянно “дорабатывается”. Это, по нашему мнению, обусловлено желанием разработчиков нормативных документов добиться более адекватной передачи смысла выражения “*Total Harmonic Distortion*” (THD) на русский язык. Однако цель их по существу не только не достигнута, а происходит все большее удаление от содержания выражения “коэффициент гармонических искажений”. Другой причиной применения более двух десятков “синонимов” является одновременное их заимствование из разных областей знаний — радиоэлектроники, электротехники и энергетики.

Для облегчения понимания сложившегося положения представим формулы, приведенные в ГОСТах [7–9] для вычисления двух важных показателей, применяемых для характеристики качества уровня искажения напряжения электросети (ЭС) и входного тока нелинейной нагрузки, и их условные обозначения. В соответствии с первоначально принятой терминологией один из показателей именуется коэффициентом гармонических искажений (КГИ) и определяется в [1, 2, 8] по следующей формуле:

$$K_{\Gamma} = K_{\text{ГН}} = \text{THD}_f = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где A_i — действующее значение тока i -ой гармоники по напряжению или по току;

A — действующее значение основной гармоники соответствующего параметра.

Что касается второго показателя, именуемого коэффициентом нелинейных искажений ($K_{\text{НИ}}$), сокращенно коэффициентом искажения, то он в литературе вычисляется по двум разным формулам, обеспечивающим разные и, к тому же, противоположные результаты. Во многих учебниках по электротехнике [10, 11] его вычисление осуществляется по формуле:

$$K_{\text{Н}} = \frac{A_1}{A}. \quad (2)$$

При этом, получаемый результат — приближенный, поскольку $K_{\text{Н}}$ вычисляется лишь по первой гармонике спектра напряжения ЭС или входного тока нагрузки.

В отличие от ГОСТ 13109-67, в ГОСТ 13109-87 для вычисления $K_{\text{Н}}$ предложено в качестве основной формулы начать использовать выражение (1), и только в ГОСТ 13109-97 разработчики заново вернулись к следующей формуле:

$$K_{\Gamma} = K_{\text{НИ}} = \text{THD}_f = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} \cdot 100\%, \quad (3)$$

Формулу (3) продолжают применять как в электротехнике, так и энергетике [9, 12, 13]. Следует отметить, что для ЭС осуществляется вычисление $K_{\text{Н}}$ по напряжению, а по току он вычисляется для оценки уровня вносимых искажений нелинейными нагрузками. При этом, значения $K_{\text{Н}}$, представленные по входному току нелинейных нагрузок, всегда больше, а, нередко, и значительно больше значения $K_{\text{Н}}$ по напряжению, вычисленному для разных локальных участков ЭС.

На практике постоянно присутствует неопределенность в интерпретации результатов вычисления по той причине, что большинство авторов не отмечают в публикациях по какой формуле из двух действительно вычислено значение $K_{\text{Н}}$. Поскольку в формуле (1) значение числителя делится на полное значение входного тока нагрузки, то предельным значением $K_{\text{Н}}$ является 100%. При небольших значениях уровня искажения синусоиды (менее 20–30%) $K_{\text{Н}}$ практически равен K_{Γ} . Однако по мере повышения искажения синусоидальности тока, и, особенно, при значительном уменьшении длительности импульса входного тока нагрузки в каждый полупериод напряжения ЭС, значение $K_{\text{Н}}$ возрастает до нескольких сотен процентов и, таким образом, начинает значительно превышать K_{Γ} . Поэтому терминологическая подмена его наименования в статьях, а также в описаниях технических характеристик анализаторов качества электричества (АКЭ) просто недопустима [14–16]. Последнее обусловлено тем, что перевод технического описания приборов на

русский язык, осуществляется разными и недостаточно осведомленными людьми в области энергетики.

Следует обратить внимание на то, что если по мере повышения уровня искажения коэффициент $K_{\text{Н}}$, вычисленный по (2), стремится к нулю, то по (3) он теоретически стремится к бесконечности. Несмотря на это несоответствие, выражение (2), без сравнительного анализа, продолжает приводиться в учебных пособиях как по электротехнике, так и электроники на протяжении более 70-и лет [3, 17].

Для вычисления значения КН на основе данных о K_{Γ} используется известное выражение в двух формах записи [18, 19]:

$$K_{\text{Н}} = K_{\text{НИ}} = \frac{K_{\Gamma}}{\sqrt{1 - K_{\Gamma}^2}}, \quad (4)$$

или

$$K_{\text{Н}} = \text{THD}_f = \frac{\text{THD}}{\sqrt{1 - \text{THD}_f^2}}, \quad (5)$$

Для наглядного представления взаимосвязи обоих показателей предложена номограмма [20], позволяющая оперативно и с достаточной точностью осуществить пересчет одного показателя в другой, а при необходимости, и наоборот.

В ГОСТ 32144-2013 использование (1) в качестве рекомендации допустимо, но лишь при небольшом верхнем его пределе (не более 20–30 %), что следовало бы заведомо обговорить в нормативном документе. Разноточение обоих показателей возникло и по той причине, что в более раннем ГОСТ 13109-87 порядок вычисления описывался противоположным. Вычисление требовалось проводить по (1), а расчет по (3) считался лишь допустимым. Рекомендация о возможности применения (1) вместо (3), приводимая в [8], была допустима на раннем этапе и по той причине, что нормативные документы [7–9] предназначались для контроля только качества напряжения.

В рассмотренных нормативных документах [21] рассматриваются вопросы измерения только качества напряжения. Приборы же выпускаемые для оценки качества электрической энергии позволяют определять, как $K_{\text{Н}}$ по напряжению, так и по току. При больших его значениях погрешность определения $K_{\text{Н}}$ по току начинает превышать 10 %, достигая в пределе 200–300%. Применение формулы (1) становится особенно недопустимым при определении $K_{\text{Н}}$ устройств с импульсным характером входного тока.

Что касается показателя K_{Γ} — коэффициента гармонических искажений, определяемого по формуле (1), то он в настоящее время в радиоэлектронике применяется все реже, а в энергетике лишь в качестве запасного выражения и без обоснования его необходимости. На самых первых этапах становления вопроса контроля уровня нелинейных искажений в радиотехнике применение формулы (3) представлялось бессмысленным, так как K_{Γ} электронных усилителей и различных при-

емных устройств в то время не превышал нескольких процентов.

Несмотря на то, что ГОСТы [7–9] предназначались для контроля K_H только по напряжению, выпускаемые приборы АКЭ предназначались для контроля не только качества напряжения в точке подключения потребителей к ЭС, но и тока разных нелинейных нагрузок в локальных ЭС. Коэффициенты K_H напряжения и тока в точке присоединения энергетических систем действительно соизмеримы и во многих случаях не превышают 10 %, что по существу соответствует нормативному требованию ГОСТ 32144–2013 для низковольтных сетей (8%). В то же время ряд типов нелинейных нагрузок, только с импульсным характером входного тока, имеет значения K_H по току, превышающие 100–150% (персональные компьютеры, преобразователи напряжения, светодиодные лампы и т. п.) [22, 23].

Сравнительно невысокий уровень K_H в точках подключения суммарной нагрузки происходит по той причине, что высшие гармоники входного тока нелинейных нагрузок относительно небольшой мощности существенно нивелируются в электросетях за счет преобладания более сильных токов активных и активно-реактивных практически линейных нагрузок (электродвигатели, индукционных электропечи, обогреватели и т. п.). При превышении тока линейных нагрузок над токами нелинейных нагрузок в 5–7 раз значение коэффициент мощности общей нагрузки существенно возрастает, достигая 0,97–0,98 [24].

Следует отметить, что верхний предел шкалы выпускаемых АКЭ, предназначенных для измерения K_H , ограничены 30, 50% и не более 100% [14, 15]. Только в последний год один из производителей начал выпускать приборы с верхним пределом шкалы, равным 1000% [16]. Такой предел косвенно свидетельствует о том, что в первых моделях анализаторов КН все-таки вычисляется относительно суммарного входного тока, а во вновь разработанном – относительно первой гармоники.

Необходимость перехода к измерению КН более 100–150 % возникает лишь при определении КН нелинейных нагрузок по току, а не по напряжению ЭС. В действительности, верхний предел показаний по напряжению в последней модели АКЭ выбран с очень большим запасом, ибо значения КН близкие к 1000% могут быть достигнуты лишь по току и при значениях коэффициентов мощности нагрузок, близких к 0,1, как правило, не достигаемых на практике [23].

Таким образом, проведенный анализ литературы показывает, что сложившееся положение в вопросе выбора наименования уровня высших гармоник и формулы для его вычисления, требует продолжения работы по унификации применяемых терминов, результаты которой будут представлены во второй части предложенной статьи.

Литература

1. Сорокин И. М. Основы радиотехнических измерений. — М.: Энергия, 1976. — 312 с.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системе электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1978. — 374 с.
3. Горюхов П. К. Толковый словарь по радиоэлектронике. Основные термины. — М.: Русский язык, 1993. — 246 с.
4. Справочник по радиоэлектронным устройствам. В 2-х томах. Т. 1. Под ред. П. К. Линде. — М.: Энергия, 1978. 438 с.
5. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике. — М.: Мир. 1991. — 446 с.
6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М., 2004. — 439 с.
7. ГОСТ 13109-67. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1967. — 23 с.
8. ГОСТ 13109-87. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1989. — 23 с.
9. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2006. — 32 с.
10. Нетушил А. В., Страхов С. В. Цепи с сосредоточенными и распределенными параметрами. — М.: Госэнергоиздат, 1955. — 215 с.
11. Евдокимов Ф. Л. Теоретические основы электротехники. Изд. 3-е. учебник для энергетических техникумов. — М.: Высшая школа, 1971. — 444 с.
12. Попов В. П. Основы теории цепей: Учебник для вузов спец. “Радиотехника”. — М.: Высшая школа, 1985. — 496 с.
13. Клаассен К. Основы измерений. Датчики и электронные приборы: Учебное пособие. 3-е изд. — Долгопрудный: Изд. дом “Интеллект”, 2008. — 352 с.
14. Анализатор качества электричества ПКА-А.
15. Анализатор сети Fluke 435.
16. Анализатор качества электричества Fluke 1740.
17. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование. — Киев, 2007. — 288 с.
18. Стабилизатор.рф/reference/tech-articles/231thd/special.
19. Коэффициент нелинейных искажений (КНИ, КН THDf), коэффициент гармонических искажений (КГИ, КГ, THDg) — различные подходы к определению. 380 v.ru/referenc/tech-articles/231-thd-special.
20. Семенова О. Д., Тукшаитов Р. Х. К характеристике соотношения между коэффициентами нелинейных и гармонических искажений и устранению их разночтения. В сборнике: Материалы докладов Международной молодежной научной конференции “Тинчуринские чтения — 2021 “Энергетика и цифровая трансформация”. В 3 т. Т. 1. Электроэнергетика и электроника: матер. конф. (Казань, 28–30 апреля 2021 г.). Под общ. ред. ректора КГЭУ Э. Ю. Абдуллазянова. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2021. — 636 с.
21. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества элект-

- трической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. — М.: Стандартинформ, 2015. 41 с.
22. *Тукайтов Р. Х., Абдуллазянов Э. Ю., Нигматуллин Р. М., Айхайте Исхакэфу.* О коэффициенте мощности светодиодных ламп (в связи с требованиями ГОСТ Р 55705-2013). — Светотехника. 2018. № 1. С. 49.
23. *Тукайтов Р. Х., Шириев Р. Р.* Определение уровня нелинейных искажений входного тока разных типов нагрузок на основе измерения коэффициента мощности и его сомножителя $\cos\varphi$. — Практическая силовая электроника. 2018. № 72. С. 30–36.
24. *Тукайтов Р. Х., Семенова О. Д.* Об одном способе подключения “нелинейных” нагрузок для снижения уровня их влияния на качество напряжения электросети. — В сборнике: Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники:

матер. III Всерос. науч.-практ. конф. (Казань, 17–18 марта 2021 г.): Редкол.: Э.Ю. Абдуллазянов (гл. редактор) и др. — Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2021. С. 247–251.

Тукайтов Рафаил Хасьянович, д. б. н., профессор, профессор кафедры “Электрооборудование и электрохозяйства предприятий, организаций и учреждений” Казанского государственного энергетического университета, академик РАЕ, тел.: +7 (987) 184-03-15, e-mail: trh_08@mail.ru;

Семенова Ольга Дмитриевна, инженер кафедры “Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений” Казанского государственного энергетического университета, тел.: +7(917) 897-84-57; e-mail: ollivka5001@mail.ru.