

# Оценка факторов искажения напряжения сети в точке подключения нелинейного потребителя

Ю. Д. Козляев<sup>1</sup>, И. Л. Лушников

Определены связи между качественными показателями напряжения и тока, контролируемых в точке присоединения нелинейных потребителей (электронных нагрузок) к сети. Рассмотрены факторы искажения синусоидальности напряжения сети. Получены аналитические решения для оценки коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения сети при подключении электронных нагрузок.

*Ключевые слова:* нелинейный потребитель, электронная нагрузка, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, точка подключения к сети.

## 1. Введение

Качество энергопотребления в сетях переменного тока жёстко регламентируется рядом стандартов и непосредственно связано с формой тока в цепи, определяемой электрическими свойствами потребителей. Бурный рост информационных и телекоммуникационных технологий привёл к широкому распространению нелинейных потребителей электрической энергии, называемых электронными нагрузками (ЭН). Особенностью ЭН является импульсный характер потребления тока, вызванный периодическим пополнением энергии фильтрового конденсатора в звене первичного преобразования напряжения ЭН [1]. При масштабном применении ЭН, особенно при их групповом подсоединении к определённым точкам сети, качественные показатели энергопотребления могут выходить за рамки нормативных, а в ряде случаев служить причиной снижения энергетической эффективности и даже угрозой аварий [2].

## 2. Постановка задачи

Целью работы является определение связи между качественными показателями напряжения и тока, контролируемых в точке присоединения ЭН к сети, и получение аналитических решений для оценки коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения сети при подключении ЭН малой и средней мощности и вариации импеданса сети.

Импеданс цепи питания ЭН (Рис. 1) определяется сопротивлением токораспределительного участка ( $Z_{1-1}$ ,  $Z_{1-2}$ ) и элементами токоограничения в структуре ЭН ( $Z_i$ ). В общем случае под ЭН следует понимать как единичный потребитель (сервер, персональный компьютер), так и группу «однородных» потребителей, подсоединённых к общей точке сети.

<sup>1</sup> В 2010 году получен грант для выполнения фундаментальных научных исследований по теме «Разработка и исследование методов повышения качества энергопотребления устройств и систем телекоммуникаций».

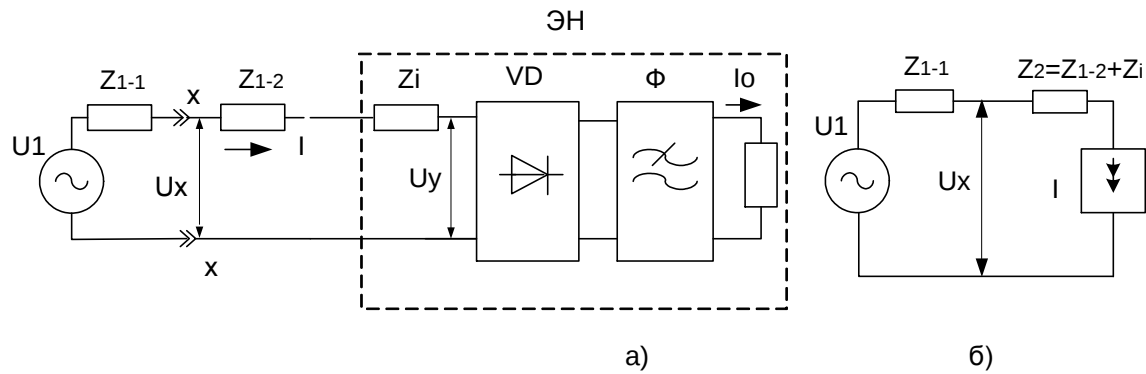


Рис. 1. Цепь питания ЭН однофазным током (а) и её схема замещения (б)

В силу нелинейной природы ЭН потребляемый ток в цепи является несинусоидальным, причём характер тока определяется полным сопротивлением цепи и структурой вентильного звена и фильтра ЭН. В подавляющем числе средств бытовой электроники, компьютерной техники и в ряде телекоммуникационных приложений названные звенья включают диодный мост и фильтровую ёмкость. Параметры ёмкости определены условиями получения допустимого уровня напряжения пульсаций и минимального времени «удержания» напряжения на случай кратковременных провалов питающего напряжения. В некорректированных устройствах питания ЭН угол проводимости диодов сетевого выпрямителя ЭН  $\psi$  не превышает значения  $\pi/6$ , что определяет высокое значение таких показателей тока, как коэффициент амплитуды  $K_A \approx 3$ , коэффициент гармоник  $K_G \approx 90\%$ . При подключении группы подобных нагрузок к сети параметры локального фрагмента цепи, включая эквивалент групповой ЭН, меняются пропорционально числу единичных потребителей. Таким образом, структура цепи и общий характер электромагнитных процессов в ней остаются прежними, однако эффект влияния сопротивления магистрального участка существенно возрастает. Для практических задач важным являются качество напряжения, фиксируемого в точке подключения группового потребителя  $U_X(t)$ , разделяющей токораспределительный участок на магистральную и локальную составляющие ( $Z_{1-1}$  и  $Z_{1-2}$ ), и величина коэффициента мощности потребителя энергии. Первый жёстко нормируется стандартом [3], второй характеризует степень загрузки первичного источника активной мощностью и, таким образом, является одним из показателей эффективности энергопотребления [4].

### 3. Общие закономерности искажения напряжения в точке подключения ЭН при отсутствии «предискажений»

Рассматривая ЭН как источник эмиссии высших гармонических составляющих тока (рис.1б), представим  $U_X(t)$  как совокупность первой гармоники напряжения  $U_{1X}(t)$  и суммы составляющих высших гармоник  $U_{kX}(t)$ , порождаемых током на сопротивлении  $Z_{1-1}$ :

$$U_X(t) = U_1(t) - \sum_{k=1}^N U_{kX}(t) = U_1(t) - Z_{1-1} \cdot \dot{I}_1 e^{j\omega t} - \sum_{k>1}^N Z_{1-1} \cdot \dot{I}_k e^{jk\omega t}, \quad (1)$$

где  $k$  – номер гармоники,  $N$  – число принимаемых во внимание гармонических составляющих тока.

Из-за относительной малости второго слагаемого в выражении (1) величина действующего напряжения основной гармоники в точке  $X$  может быть выражена приближённым соотношением  $U_{1X} \approx U_1 - I_1 Z_{1-1} = \alpha U_1$ . В реальных системах  $\alpha \approx 0.92...0.96$ . Последнее сла-

гаемое в выражении (1) определяет сумму «искажающих» компонент напряжения с частотами  $\omega_k = k\omega$ , где  $k = 3, 5, 7 \dots N$ .

Выразим решение для напряжения искажения в виде суммы активных и реактивных составляющих:

$$\Delta U_X(t) = R_{1-1} \sum_{k>1}^N \dot{I}_k + j\omega L_{1-1} \sum_{k>1}^N k \dot{I}_k e^{jk\omega t} = |Z_{1-1}| (\cos \phi_1 \sum_{k>1}^N \dot{I}_k e^{jk\omega t} + j \sin \phi_1 \sum_{k>1}^N k \dot{I}_k e^{jk\omega t}), \quad (2)$$

где  $\phi_1 = \arctg(R_{1-1} / \omega L_{1-1})$ ,  $\dot{I}_k$  – комплексные амплитуды гармоник тока. Соответственно, выражение для действующего значения искажающего напряжения может быть представлено в виде:

$$\Delta U_X(t) = Z_{1-1} \cos \phi_1 \sqrt{\sum_{k>1}^N I_k^2 + \tan^2 \phi_1 \sum_{k>1}^N k^2 I_k^2}. \quad (3)$$

С учётом (3) получим выражение для коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точке подключения ЭН к сети:

$$K_H = \sqrt{\frac{\Delta U_X^2}{U_{1X}^2}} = \frac{\cos \phi_1}{\alpha \cdot i_{k3}} \sqrt{K_i^2 + \tan^2 \phi_1 F_i^2}, \quad (4)$$

где:  $K_i = \sqrt{\sum_{k>1}^N i_k^2}$  – коэффициент гармоник тока;  $F_i = \sqrt{\sum_{k>1}^N k^2 i_k^2}$  – фактор реактивной составляющей искажения напряжения;

$i_k = I_k / I_1$  – весовой коэффициент гармоники тока с номером  $k$  по отношению к основной (первой) гармонике тока;  $i_{k3} = I_{k3} / I_1$  – кратность тока короткого замыкания.

Очевидно, выражение (4) не меняется в случае, если в точках «х» подключаются дополнительные линейные, нелинейные или комбинированные нагрузки. Для получения строгого решения в этом случае необходима корректировка коэффициента потерь напряжения  $\alpha$  и знание весовых коэффициентов  $i_k$ . Моделирование (см. рис. 2) и вычисление по формуле

(4) при условиях:  $P_1 = 1.18$  кВт,  $Z_{1-1} = 1.22 e^{j\pi/6}$ ,  $I_{k3} = 180.3$  А,  $\alpha = 0.967$ , ( $i_{k3} = 32.3$ ,  $i_3 = 0.716$ ,  $i_5 = 0.376$ ,  $i_7 = 0.09$ ,  $i_9 = 0.0358$ ,  $\varphi = \pi/6$ ) приводит к значению коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения (коэффициента гармоник)  $K_H = 0.057$ .

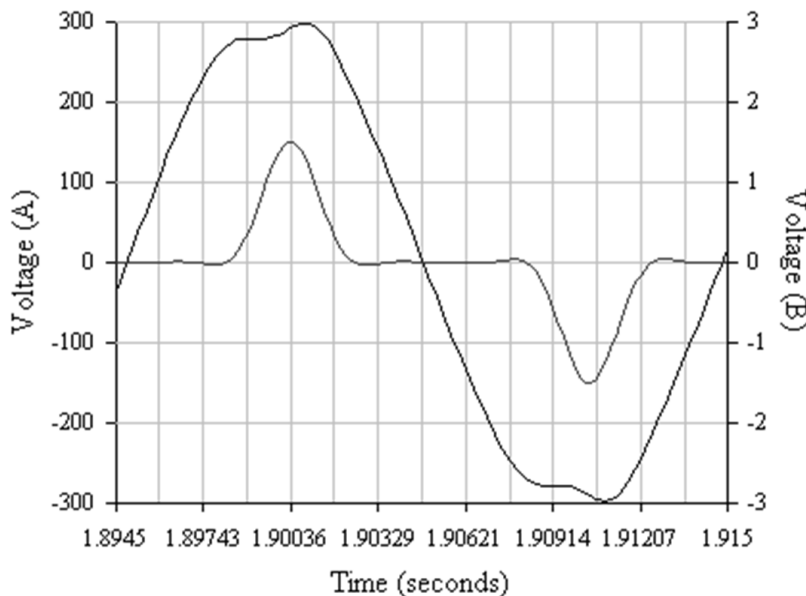


Рис. 2. Пример искажения напряжения в контрольной точке цепи питания ЭН

Сопоставление слагаемых в подкоренном выражении (4) показывает, что определяющим по величине является второе, содержащее фактор  $F_i$ , поэтому с погрешностью не более 1.5 % экспресс-анализ коэффициента искажения может выполняться по упрощённой формуле:

$$K_H \approx \frac{\sin \varphi_1}{i_{k3}} F_i = \sin \varphi_1 \sqrt{\sum_{k>1}^N k^2 \bar{i}_k^2}, \quad (5)$$

где  $\bar{i}_k = I_k / I_{k3}$ .

В частности, для единичного потребителя класса D (аналог ЭН) с предельно допустимыми значениями гармонических составляющих по стандарту [5] при мощности потребления 0.6 кВт и условии  $I_{k3} = 150$  А решения по формулам (4) и (5) дают значения  $K_H$ , равные 4.53 % и 3.9 %, соответственно.

Число гармоник тока, необходимое для выполнения расчётов в соответствии с [5], следует принимать  $N = 21$ , однако на практике с учётом «фильтрующих» свойств эквивалентной цепи заряда фильтрового конденсатора в структуре ЭН, число гармоник может ограничиваться значениями  $N = 11 \dots 15$ . На рис.3 показаны кривые зависимости весовых коэффициентов гармоник  $i_k$  и фактора  $F_i$  для кривых тока  $i(\omega t)$ , аппроксимированных функциями Терентьева – Берга [6, 7] для двух значений угла проводимости тока  $\psi$ . Из кривых наглядно видны особенности «размывания» спектра тока при уменьшении  $\psi$  и «насыщения» функций  $F_i$ . Последний факт является основанием для принятия решения об ограничении  $N$ .

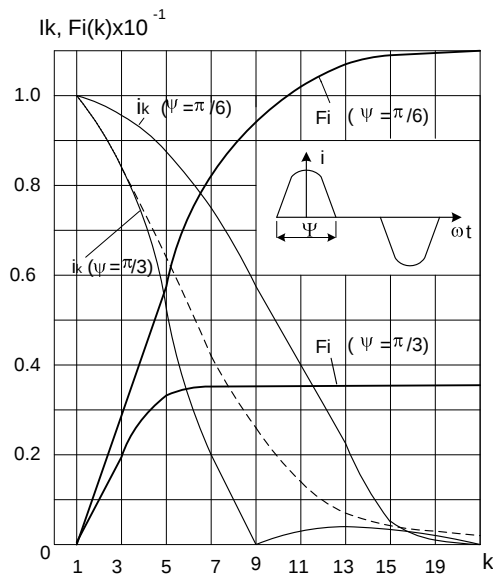


Рис.3. Спектральные диаграммы тока и соответствующие им зависимости фактора искажений  $F_i(k)$ . Пунктиром показана нормированная огибающая спектра амплитуд, допустимая стандартом для потребителей класса D

Из выражений (4), (5) и приведённых на рис. 3 кривых  $F_i$  следует, что искажающий эффект обусловлен группой гармоник тока, поэтому искусственное подавление отдельных составляющих спектра, даже с преобладающим значением парциального фактора, не приводит к существенному снижению коэффициента искажения  $K_H$ . Например, в рассмотренном выше случае подавление 5-й гармоники тока снижает  $K_H$  на величину 1.25 %, а 5-й и 7-й гармоник – на 1.62 %.

#### 4. Учёт возможных «предискажений» напряжения

Допустим, что до подключения к сети (в точке  $X$ ) ЭН группы В сеть была загружена нелинейной нагрузкой группы А (ЭНА, см. рис.4а), при этом коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения в точке  $X$ , определяемый формулой (4), равен величине  $K_{II(A)}$ . На рис.4б пунктирной линией качественно показана форма полуволны напряжения  $U_{X(A)}(t)$ . При подключении ЭН группы В (ЭНВ) результирующий действующий ток искажений  $I_{II}$ , с учётом фазовых сдвигов между гармониками одного порядка  $\varphi_k$ , определяется выражением

$$I_{II} = I_1 \sqrt{\sum_{k>1}^N (i_{k(A)} + i_{k(B)} \cos \varphi_k)^2 + \sum_{k>1}^N (i_{k(B)} \sin \varphi_k)^2} = I_1 K_i, \quad (6)$$

где  $i_k = I_k / I_1$ ,  $I_1 = I_{1(A)} + I_{1(B)}$  – суммарный ток основной (первой) гармоники тока двух групп ЭН (предполагается, что первые гармоники тока синфазны, т.е.  $\varphi_1 = 0$ ),  $K_i$  – результирующий коэффициент искажений тока.

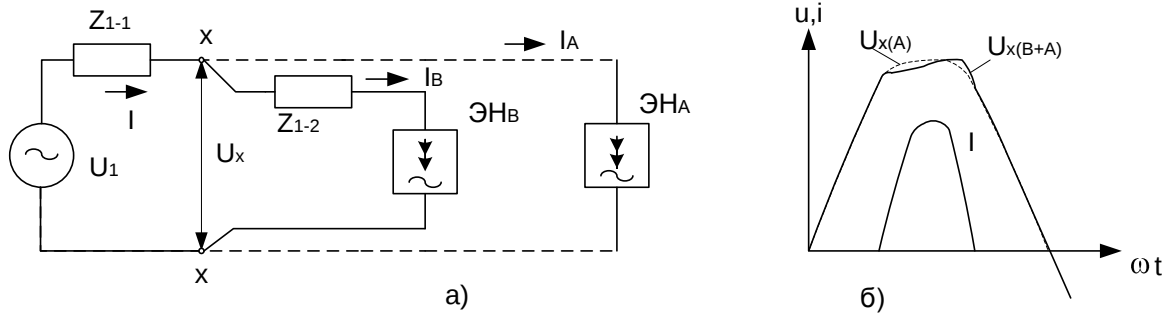


Рис. 4. Схема цепи с «предискажающей» ЭНА и экспериментальные диаграммы напряжения при одной и двух группах ЭН

Наихудшим, с точки зрения величины искажений тока, является случай синфазности гармоник тока двух групп ЭН.

Из (6) для этого случая следует, что  $K_{i(A+B)} = \sqrt{\sum_{k>1}^N (i_{k(A)} + i_{k(B)})^2} = M K_{i(A)}$ , где

$M = 1 + \frac{K_{i(B)}}{K_{i(A)}}$  – коэффициент деградации  $K_i$  при увеличении загрузки группового фрагмента цепи питания током второй группы ЭН. В частном случае  $K_{i(A)} = K_{i(B)}$ , коэффициент гармоник тока возрастет вдвое по сравнению с «исходным», определяемым только ЭНА.

Анализ фактора реактивных потерь напряжения для рассматриваемого случая приводит к аналогичной связи  $F_{i(A+B)}$  и  $F_{i(A)}$ :

$$F_{i(A+B)} = \sqrt{\sum_{k>1}^N (i_{k(A)} + i_{k(B)})^2 k^2} = M \sqrt{\sum_{k>1}^N i_{k(A)}^2 k^2} = M F_{i(A)}.$$

Таким образом, решение для коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точке подключения к сети с исходной величиной предискажений  $K_{II(A)}$  отличается от неё масштабным множителем  $M$ :  $K_{II(A+B)} = M K_{II(A)}$ .

В случае нарушения условия синфазности гармоник тока двух групп ЭН значение  $K_{II(A+B)}$  уменьшается. Из этого, в частности, следует возможность активной коррекции формы тока потребления и коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения.

Очевидно, условием этого является противофазность гармоник тока с  $k > 1$  двух групп потребителей ЭН, один из которых выполняет функцию корректора.

## 5. Заключение

На основании изложенного сформулируем основные выводы и положения:

1. Основными факторами искажения синусоидальности напряжения в точке подключения ЭН являются эмиссия в сеть тока высших гармоник и реактивная составляющая сопротивления цепи  $Z_{1-1}$  на участке от источника напряжения до точки подключения потребителя (группы потребителей).

2. Число гармоник  $N$ , необходимое для «удержания» при оценке коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, зависит от спектральной характеристики тока потребления. При формах токов, аппроксимируемых функцией «усечённого косинуса», погрешность вычислений коэффициента искажения  $K_H$  по формуле (4) не превышает 0.5 %, если  $N$  принимается равным 15 или 9 при углах проводимости тока диодами выпрямительного звена ЭН, близкими к значениям  $\pi/6$  и  $\pi/3$ , соответственно.

3. С ростом мощности потребления ЭН при сохранении спектральных характеристик тока и параметров сети величина коэффициента искажения  $K_H$  практически пропорционально возрастает.

4. Искусственная эмиссия в сеть «корректирующих» гармоник в противофазе с гармониками, эмитируемыми ЭН, уменьшает величину фактора  $F_i$  и, соответственно, результирующее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точке присоединения ЭН к сети. Эффективным способом коррекции является ослабление 5-й и 7-й гармоник тока. Такой приём возможен при организации групповых корректоров тока в сетях с преобладанием нелинейных нагрузок.

## Литература

1. Козляев Ю.Д., Михеенко А.М., Лушников И.Л. Особенности энергопотребления нелинейных нагрузок // Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2008», Новосибирск, НГТУ, 2008.
2. Воробьёв А.Ю. Электрическое снабжение компьютерной техники телекоммуникационных систем. – М.: Экотрендз, 2003. – 279 с.
3. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Госстандарт России, 1998.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.
5. ГОСТ Р 51317.3.2-99 Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе) – М.: Госстандарт России, 2000.
6. Терентьев Б.П. Выпрямители радиоустройств. – М.: Связьрадиоиздат, 1938.
7. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Советское Радио, 1971.

*Статья поступила в редакцию 28.10.2010;  
переработанный вариант — 25.11.2010*

**Козляев Юрий Дмитриевич**

к.т.н, член-корреспондент СО МАИ, профессор кафедры беспроводных информационных систем и сетей СибГУТИ. (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86) тел. (383) 2-698-233, e-mail: koz@sibsutis.ru.

**Лушников Иван Леонидович**

ст. преподаватель кафедры технической электроники СибГУТИ. (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86) тел. (383) 2-698-289, e-mail: npkometa@gmail.com.

**Estimation of the network voltage garbling in the point of connection of a nonlinear consumer**

**Yu. Kozlyayev, I. Lushnikov**

A certain relationship is determined between qualitative factors of the voltage and current controlled in point of joining of nonlinear consumers (the electronic loads) to network. The factors of voltage distortion are considered. Analytical solutions are obtained for estimation of the factor of the network voltage distortion at connection of electronic loads.

*Keywords:* nonlinear consumer, electronic load, factors of voltage distortion, point of connection to network.