

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. И. Сысун, О. В. Олещук, Н. В. Соболев, А. А. Тихомиров, Оценка вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети при наличии в питающем напряжении высших гармоник, *Международ. науч.-исслед. журн.*, 2019, выпуск 2, 20–23

DOI: 10.23670/IRJ.2019.80.2.003

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 31.40.175.68

15 января 2024 г., 15:26:28



DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2019.80.2.003>

## ОЦЕНКА ВКЛАДА НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКИ В ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ ПРИ НАЛИЧИИ В ПИТАЮЩЕМ НАПРЯЖЕНИИ ВЫСШИХ ГАРМОНИК

Научная статья

Сысун В.И.<sup>1,\*</sup>, Олещук О.В.<sup>2</sup>, Соболев Н.В.<sup>3</sup>, Тихомиров А.А.<sup>4</sup>  
1, 2, 3, 4 Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия

\* Корреспондирующий автор (sasha.82[at]mail.ru)

**Аннотация**

В настоящей работе предложена методика расчета токовых гармоник генерируемых нелинейной нагрузкой при условии наличия в питающей сети высших гармоник напряжения. Предложена модель нелинейной нагрузки потребителя. Получены условия применения независимых схем для каждой гармоники напряжения. Рассмотрено влияние высших гармоник напряжения нелинейной нагрузки на высшие гармоники тока. Данная методика может быть использована для расчетов показателей качества электроэнергии в сети при наличии нелинейных нагрузок.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, нелинейная нагрузка, электроэнергетика.

## EVALUATING THE CONTRIBUTION OF NON-LINEAR LOADS TO HIGHER-ORDER HARMONICS OF NETWORK VOLTAGE IN SUPPLY VOLTAGE OF HIGHER-ORDER HARMONICS

Research article

Sysun V.I.<sup>1,\*</sup>, Oleshchuk O.V.<sup>2</sup>, Sobolev N.V.<sup>3</sup>, Tikhomirov A.A.<sup>4</sup>  
1, 2, 3, 4 Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russia

\* Corresponding author (sasha.82[at]mail.ru)

**Abstract**

The following paper proposes a method for calculating current harmonics generated by the non-linear load in the supply voltage of higher-order harmonics of the voltage. A model of non-linear consumer load is also proposed. The conditions for the use of independent circuits for each voltage harmonic are obtained. The effect of higher-order harmonics of non-linear load voltage on higher-order harmonics of the current is considered. This method can be used to calculate the quality of electricity in the network in case of non-linear loads.

**Keywords:** higher harmonics, non-linear load, electric power industry.

Генерация высших гармоник тока различными типами электрооборудования в настоящее время является важным объектом исследования [1], [2], [3], [4]. Дополнительной задачей является учёт наличия в напряжении сети своих высших гармоник, что усложняет анализ состояния технических средств и прогноза их ресурса [5], [6]. Показателями качества электроэнергии в сети являются суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения

$K_u = \frac{1}{U_{(1)\vartheta}} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)\vartheta}^2}$  и коэффициент  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)} = \frac{U_{(n)\vartheta}}{U_{(1)\vartheta}}$ . Здесь  $U_{(1)\vartheta}$  и  $U_{(n)\vartheta}$

действующие значения первой и  $n$ -ой гармоники напряжения. Другим показателем нелинейности в узле сети являются искажающая мощность  $n$ -ой гармоники  $D_{(n)} = U_{(1)} I_{II(n)}$ , где  $I_{II(n)}$  ток  $n$ -ой гармоники потребляемой нагрузкой.

Целью настоящей работы является оценка влияния высших гармоник напряжения на высшие гармоники тока нелинейной нагрузки и методика определения собственных генерируемых гармоник тока по их измерениям при наличии в сети высших гармоник напряжения.

При подаче на нелинейную нагрузку синусоидального напряжения в токе возникают гармоники с кратными частотами обусловленные нелинейной зависимостью тока и напряжения [7, С.495], [8], [9]

$$i(t) = \dot{I}_1 e^{i\omega t} + \dots + \dot{I}_n e^{in\omega t}, \quad \dot{I}_n = I_n e^{i\vartheta_{in}}, \quad (1)$$

где  $\vartheta_{in}$  – сдвиг фазы  $n$ -ой гармоники тока относительно фазы напряжения в начальный момент времени. Амплитуды гармоник могут быть вычислены при аппроксимации характеристики цепи математической зависимостью, например, степенным полиномом или гиперболическим синусом [10, С. 460], а также измерены и внесены в паспорт нагрузки. Аппроксимация гиперболическим синусом при соответствующем выборе коэффициентов разложения может быть сведена к степенной аппроксимации. При симметричной вольт – амперной характеристике она аппроксимируется нечётными степенями напряжения, а в токе будут только нечётные гармоники

$$I(t) = \dot{Y}_1(\omega)U(\omega_1, t) + \dot{Y}_3(\omega)U^3(\omega_1, t) + \dots + \dot{Y}_k(\omega)U^k(\omega_1, t) \quad (2)$$

Коэффициенты разложения могут зависеть от частоты и представляют собой комплексные проводимости.

При малых значениях нелинейности выполняется условие:

$$(\omega)U^n(\omega_1) \ll Y_1(\omega_1)U(\omega_1) \quad (3)$$

Основной вклад в гармонику тока даёт соответствующий член разложения (2):

$$I_n \approx Y_n \frac{U^n}{2^{n-1}}$$

Тогда условие малой нелинейности (3) запишется в виде

$$I_{n>1} \ll I_1 \quad (4)$$

Степень неравенства (3) определяется допустимой погрешностью.

В процессе эксплуатации параметры цепи могут изменяться, и требуется контроль генерируемых высших гармоник тока. Однако, напряжение питания сети тоже может содержать высшие гармоники

$$\dot{U}(\omega t) = \dot{U}_1 e^{i\omega t} + \dots + \dot{U}_n e^{in\omega t}, \quad \dot{U}_n = U_n e^{i\vartheta_{un}} \quad (5)$$

и требуется определение собственных гармоник тока нагрузки по измерениям высших гармоник тока при напряжении сети со своими высшими гармониками.

При оценке вклада нелинейной нагрузки в высшие гармоники напряжения сети [9, 11 - 12] нелинейная нагрузка потребителя моделируется параллельно подсоединёнными эквивалентными проводимостями для каждой гармоники  $\dot{Y}_{П(n)}$  и источниками тока каждой гармоники  $\dot{I}_{H(n)}$  (рис.1).

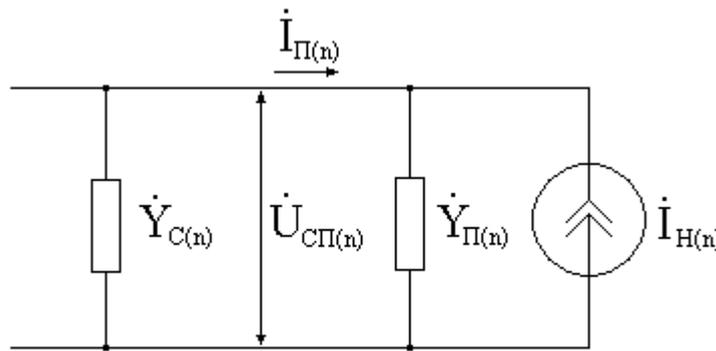


Рис. 1 – Модель нелинейной нагрузки потребителя

При этом сеть в точке присоединения потребителя обладает эквивалентной проводимостью для каждой гармоники  $\dot{Y}_{C(n)}$  и может содержать высшие гармоники напряжения  $\dot{U}_{CП(n)}$  обусловленные высшими гармониками тока, генерируемые как данной нагрузкой, так и другими потребителями сети. Вкладом высших гармоник напряжения из-за их малости в генерацию токов нагрузки  $\dot{I}_{H(n)}$  пренебрегают, но учитывают их вклад в ток, потребляемый нагрузкой:

$$\dot{I}_{П(n)} = \dot{U}_{CП(n)} \cdot \dot{Y}_{П(n)} - \dot{I}_{H(n)} \quad (5)$$

В (5) фазы  $\dot{U}_{C(n)}$ ,  $\dot{I}_{П(n)}$ ,  $\dot{I}_{H(n)}$  – отсчитываются от основной гармоники напряжения  $\dot{U}_{C(1)}$ .

По сути дела приближение (5) и рисунок 1 предполагают учёт для высших гармоник напряжения в (2) только первого линейного члена. Учёт более высоких членов при подстановке (4) в (2) и оставление только наиболее значимых составляющих при условии слабой нелинейности (3) показывает, что для выполнения приближения (5) необходимо дополнительное условие  $\sum_{n>1} U_n \ll U_1$ , что обычно выполняется.

Пусть  $\dot{U}_{C0(n)}$  - напряжение в сети до подключения нагрузки. После подключения нагрузки напряжение определяется из соотношения

$$\dot{U}_{CП(n)} = \dot{U}_{C0(n)} - \frac{\dot{I}_{П(n)}}{\dot{Y}_{C(n)}} \quad (6)$$

После подстановки в (5) будем иметь:

$$\dot{U}_{CП(n)} = \frac{\dot{U}_{C0(n)} \dot{Y}_{C(n)}}{\dot{Y}_{C(n)} + \dot{Y}_{П(n)}} + \frac{\dot{I}_{H(n)}}{\dot{Y}_{C(n)} + \dot{Y}_{П(n)}} \quad (7)$$

Как видно из (7) проводимость нагрузки (в том числе если она будет линейной) обычно уменьшает напряжение гармоник сети, а вклад от индуцированных высших гармоник тока определяется как амплитудами индуцированных токов, так и их фазами. Это позволяет компенсировать кратные гармоники напряжения взаимной компенсацией индуцированных токов от нескольких нелинейных нагрузок. Искажающая мощность высшей гармоники после подключения нагрузки  $\dot{D}_{(n)}$  согласно (5) состоит из двух составляющих: генерирующей искажающей мощности  $\dot{D}_{Г(n)} = \dot{U}_{(1)} \dot{I}_{H(n)}$ , и поглощаемой искажающей мощности  $\dot{D}_{П(n)} = \dot{U}_{(1)} \dot{U}_{C(n)} \dot{Y}_{П(n)}$ . Таким образом, параметры

нелинейной нагрузки  $\dot{Y}_{П(n)}$  и  $\dot{I}_{Н(n)}$  являются определяющими изменения нагрузкой коэффициентом высших гармоник  $K_{U(n)}$  и искажающей мощности сети  $\dot{D}(n)$ . Это определяет необходимость текущего контроля над значением их амплитуд и фаз в процессе работы нагрузки.

Определение двух параметров нелинейной нагрузки  $\dot{Y}_{П(n)}$  и  $\dot{I}_{Н(n)}$  требует измерений тока и напряжения гармоники в узле в двух разных режимах работы сети ( $\dot{U}_{СП(n)}\dot{I}_{П(n)}$  и  $\dot{U}''_{СП(n)}\dot{I}''_{П(n)}$ ) на интервале времени, за которое данная нагрузка не изменяется [11]. Изменение режима сети может проходить естественно в течении суток, либо в результате подключения второй нагрузки. Тогда согласно (5):

$$\dot{Y}_{П(n)} = \frac{\dot{I}_{П(n)} - \dot{I}''_{П(n)}}{\dot{U}_{СП(n)} - \dot{U}''_{СП(n)}} \quad (8)$$

$$\dot{I}_{Н(n)} = \frac{1}{2} [\dot{Y}_{П(n)} (\dot{U}_{СП(n)} + \dot{U}''_{СП(n)}) - (\dot{I}_{П(n)} + \dot{I}''_{П(n)})] \quad (9)$$

При чисто активной нагрузке проводимость  $\dot{Y}_{П(n)}$  не зависит от частоты и равна проводимости для первой гармоники

$$\dot{Y}_{П(n)} = \dot{Y}_{П(1)} = \frac{I_1}{U_1} \quad (10)$$

Фазы генерируемых токов высших гармоник будут совпадающими с фазой первой гармоники тока при учёте их возможных разных знаков. Тогда из (5) будем иметь:

$$-\frac{I_{Н(n)}}{I_1} = \frac{I_{П(n)}}{I_1} - \frac{U_{СП(n)}}{U_1} \quad (11)$$

Мнимые части членов правой части (11) должны компенсировать друг друга. Тогда получаем:

$$-\frac{I_{Н(n)}}{I_1} = \frac{I_{П(n)}}{I_1} \cos \theta_{I(n)} - \frac{U_{СП(n)}}{U_1} \cos \theta_{U(n)} \quad (12)$$

Здесь  $\theta_{I(n)}$  и  $\theta_{U(n)}$  сдвиги фаз измеряемых гармоник тока и напряжения относительно основной гармоники. При совпадении фаз гармоник напряжения  $\theta_{U(n)} = 0$  также будем иметь  $\theta_{I(n)} = 0$  и получим в (12) алгебраическую сумму относительных гармоник тока и напряжения.

Таким образом, соотношения 8, 9, 12 позволяют рассчитывать собственные проводимости нагрузки в процессе её эксплуатации и генерируемые нагрузкой токи высших гармоник при наличии с сети высших гармоник напряжения. Получены условия применения независимых схем для каждой гармоники напряжения. Рассмотрено влияние высших гармоник напряжения нелинейной нагрузки на высшие гармоники тока.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Список литературы / References

1. Semwal S. Group control and identification of residential appliances using a nonintrusive method / S. Semwal, M. Singh, R. S. Prasad // *Turk. J. Elect. Eng. Comput. Sci.* – 2015. – Vol. 23, no. 6. – P. 1805–1816.
2. Jettanasen C. Analytical study of the harmonics issued from LED lamp driver / C. Jettanasen, C. Pothisarn // *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and computer scientists.* – 2014. – Vol. II. – P. 683–686.
3. Большаков О. В. О происхождении и измерении гармонических искажений в электрических сетях / О. В. Большаков, О. А. Васильева // *Автоматизация и ИТ в энергетике.* – 2016. – №11(88). – С. 2–11.
4. Фархадзе Э. М. Расчёт показателей несинусоидального режима узла нагрузки / Э. М. Фархадзе, Г. Б. Гулиев // *Электричество.* – 2002. – №8. – С. 20–25.
5. Шклярский Я. Э. Влияние гармонического состава тока и напряжения на мощность искажения / Я. Э. Шклярский, А. А. Брагин, В. С. Добуш // *Нефтегазовое дело.* – 2012. – №4. – С. 26–31.
6. Тухас В. А. Инжекция высших гармоник тока в электрическую сеть различными типами светового оборудования общего назначения / В. А. Тухас, О. В. Олещук, А. А. Комбин и др. // *Технологии ЭМС.* – 2016. – №4 (59). – С. 25–31.
7. Гоноровский В. С. Радиотехнические цепи и сигналы / В. С. Гоноровский. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.
8. Демирчан Теоретические основы электротехники / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – М. 2003. – Т 2. – 575 с.
9. Харлов Н. Н. Математическое моделирование и идентификация узлов нагрузки с нелинейными электроприёмниками / Н. Н. Харлов // *Электричество.* – 2006. – №2. – С. 7–12.
10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Гардарики, 2002. – 638 с.
11. Смирнов С. С. Вклад потребителя в уровни напряжения высших гармоник в узлах электрической сети / С. С. Смирнов, Л. И. Коверникова // *Электричество.* – 1996. – №1. – С. 58–64.
12. Смирнов Метод определения фактических вкладов сети и потребителя в коэффициенты высших гармоник напряжения узла / С. С. Смирнов // *Электричество.* – 2005. – №10. – С. 54–61.
- 13.

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Semwal S. Group control and identification of residential appliances using a nonintrusive method / S. Semwal, M. Singh, R. S. Prasad // *Turk. J. Elect. Eng. Comput. Sci.* – 2015. – Vol. 23, no. 6. – P. 1805–1816.
2. Jettanasen C. Analytical study of the harmonics issued from LED lamp driver / C. Jettanasen, C. Pothisarn // *Proceedings of the International Multiconference of Engineers and computer scientists.* – 2014. – Vol. II. – P. 683–686.
3. Bolshakov O. V. O proishogdenii i izmerenii garmonicheskikh iskagenii v electriceskikh setax [About origin of harmonic distortion change] / O. V. Bolshakov, O. A. Vasil'eva // *Avtomatizacia i IT v energetike [Automatic and IT in power engineering].* – 2016. – №11(88). – P. 2–11. [in Russian]
4. Farharidze A. M. Rashed pokazatelei nesibusoidalnogo regima uzla nagruzki [Estimation of nonsinusoidal mode parameters of load node ] / A. M. Farharidze, G. B. Guliev // *Elektrichestvo [Electricity].* – 2002. – №8. – P. 20–25. [in Russian]
5. Shklarski Ja. A. Vlianie garmonicheskogo sostava toka i napravlenia na moshnost iskagenia [Influence of harmonic current and voltage content on distortion power] / Ja. A. Shklarski, A. A. Bragin, V. S. Dovbush // *Neftegazovoe delo [Oil and gas engeneering].* – 2012. – №4. – P. 26–31. [in Russian]
6. Tuhas V. A. Ingekcia vishih garmonic toka v elektricheskuy set razlichnimi tipami svetovogo [Different types lighting equipment current ingestion of higher harmonics in electric power system] / V. A. Tuhas, O. V. Oleshuk, A. A. Kombin. *Tehnologii EMS [Technology of EMS].* – 2016. – №4 (59). – P. 25–31. [in Russian]
7. Gonorovskii V. S. Radiotekhnicheskie cepi i signali [Radiotechnical circuit and signal] / V. S. Gonorovskii. – M. : Radio i svaz [Radio and signal], 1986. – 512 P. [in Russian]
8. Demirchan K. S. Teoreticheskie osnovi electrotechniki [Theoretical basic of electrotechics] / K. S. Demirchan, L. S. Neiman, N. V. Korovkin – M. 2003. – V 2. – 575 P. [in Russian]
9. Harlov N. N. Matematicheskoe modelirovanie i indeficatsia uzlov nagruzki c nelineinimi [Mathematical modelling and edification of power node with nonlinear load ] / N. N. Harlov // *Elektrichestvo [Electricity].* – 2006. – №2. – P. 7–12. [in Russian]
10. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovi electrotechniki. Electrichekские cepi [Theoretical basics of electrotechnics. Electrical circuits ] / L. A. Bessonov – M. : Gardariki, 2002. – 638 P. [in Russian]
11. Smirnov S. S. Vklad potrebitela v urovni napravlenia vishih garmonic v uzlax electriceskoi [Load contribution in the level of high harmonic voltage level of node power system ] / S. S. Smirnov, L. I. Kovernikova // *Elektrichestvo [Electricity].* – 1996. – №1. – P. 58–64. [in Russian]
12. Smirnov S. S. Metod opredelenia fakticheskix vkladov seti i potrebitela v koefficienti vishix garmonic napravlenia [Method of real contribution power system and load definition in high harmonic node voltage coefficient ] / S. S. Smirnov // *Elektrichestvo [Electricity].* – 2005. – №10. – C. 54-61. [in Russian]