

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444>

УДК 621.317.38

Искажающая электрическая мощность переменного тока в простейшей цепи с диодом

А. В. Бялобржеский¹⁾, Д. Й. Родькин¹⁾

¹⁾Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского (Кременчуг, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Развитие электроэнергетики сопровождается увеличением количества потребителей, имеющих в своем составе нагрузки с нелинейными характеристиками. Возникающая проблема искажения электрической энергии при работе указанных потребителей частично решается применением средств повышения качества электрической энергии. Увеличение доли малых генерирующих установок, размещаемых в узлах потребителей, усугубляет взаимодействие нелинейных нагрузок, образуя дополнительные параллельные потоки электрической энергии. Искаженная электрическая энергия не является учетным показателем. Существующие взгляды на искажающую мощность поддаются критике. В известных работах обоснованы предложения по оценке мощности с использованием ее квадратичной нормы и квадратичных норм ее компонент. Для анализа процессов формирования компонент электрической мощности рассмотрена схема простейшей цепи, содержащая последовательно соединенные источник электродвижущей силы, резисторы и диод, с условным разделением схемы на источник и потребитель. Используя выражения тока и напряжения как периодических функций, представленных посредством тригонометрической формы рядов Фурье, выполнен анализ формирования мощности каждого элемента схемы. Разделены компоненты мощности с использованием известного взаимодействия гармонических составляющих тока и напряжения различного порядка. Для элементов схемы выделены компоненты мощности, образованные гармониками тока и напряжения одного порядка, компоненты мощности, образованные гармониками тока и напряжения разного порядка, в которых, в свою очередь, выделены компоненты мощности, имеющие такой же порядок, как и первые. Предложено мощность, образованную действием последней группы, отнести к искажающей мощности, а ее действие учитывать соответствующей квадратичной нормой. С использованием указанного распределения компонент мощности выполнен численный расчет. Временными диаграммами проиллюстрирован процесс взаимодействия компонент мощности, что в случае диода приводит к отсутствию изменений мощности во времени.

Ключевые слова: периодические ток и напряжение, гармоники тока и напряжения, компоненты мощности, искажающая мощность, норма мощности

Для цитирования: Бялобржеский, А. В. Искажающая электрическая мощность переменного тока в простейшей цепи с диодом / А. В. Бялобржеский, Д. Й. Родькин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62. № 5. С. 433–444. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444>

Адрес для переписки

Бялобржеский Алексей Владимирович
Кременчугский национальный университет
имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20
39600, г. Кременчуг, Украина
Тел. +380 5366 3-00-50
seemal@kdu.edu.ua

Address for correspondence

Bialobrzheskyi Olexii V.
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi
National University
20 Pershotravneva str.,
39600, Kremenchuk, Ukraine
Tel.: +380 5366 3-00-50
seemal@kdu.edu.ua

Distorting Electrical Power of the Alternating Current in the Simplest Circuit with a Diode

O. V. Bialobrzheskyi¹⁾, D. Y. Rod'kin¹⁾

¹⁾Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University (Kremenchuk, Ukraine)

Abstract. The development of electric power industry is accompanied by an increase in the number of consumers subjected to loads with nonlinear characteristics. The arising problem of the distortion of electrical energy that takes place when the mentioned consumers are in operation is partially solved by using means of improving the quality of electrical energy. The increase in the share of small generating plants that are placed in the nodes of consumers exacerbates the interaction of non-linear loads, forming additional parallel streams of electrical energy. Distorted electrical power is not an indication to account. Existing views on distorting power are amenable to criticism. In the well-known works, the proposals for the assessment of power using the quadratic norm and the quadratic norms of its components have been grounded. For the analysis of processes of formation the components of electrical power, a diagram of the simplest circuit containing a series-connected source of electromotive force, resistors and a diode is considered; also, the circuit was conditionally separated into a source and a consumer. The analysis of the power formation of each circuit element is performed with the use of the expression of current and voltage, as periodic functions represented by the trigonometric form of Fourier series. The power components are separated with the use of the known interaction of harmonic components of current and voltage of different orders. For the circuit elements, the power components formed by current and voltage harmonics of the same order are selected as well as power components formed by current and voltage harmonics of different orders, in which, in their turn, the power components are selected that have the same order as the first ones. The power formed by the action of the latter group is proposed to be attributed to the distorting power and to account its action by the corresponding quadratic norm. A numerical calculation has been performed with a use of the specified power component distribution. Time diagrams illustrate the process of interaction of the power components, which—in the case of the diode—leads to no change in power over time.

Keywords: periodic current and voltage, current and voltage harmonics, power components, distorting power, power norm

For citation: Bialobrzheskyi O. V., Rod'kin D. Y. (2019) Distorting Electrical Power of the Alternating Current in the Simplest Circuit with a Diode. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (5), 433–444. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444> (in Russian)

Введение

Развитие электроэнергетики в части управления режимами элементов электроэнергетической системы с использованием полупроводниковых преобразователей, увеличение количества генерирующих комплексов малой и средней мощности с применением техники преобразования энергии постоянного или переменного тока заостряют проблему качества электрической энергии [1]. Повышение установленной мощности устройств полупроводниковой техники в составе электротехнологических установок оказывает негативное влияние на качество электрической энергии. Генерирующие установки электрических станций благодаря организации системы транспорта и распределения электрической энергии, специфическим схемам соединения трансформаторов подстанций, использованию устройств компенсации не ощущают влияния нарушения качества электрической энергии, которое создают указанные выше электротехнологические уста-

новки. Генерирующие установки, размещаемые территориально приближенно к потребителям (ярким примером в данном случае являются когенерирующие установки), ощущают наличие нарушения качества электрической энергии, которое в результате влияет на их режим и характеристики [2]. Таким образом, возникает ряд задач по выявлению и оценке искажения электрической энергии [2–4]. Как следствие, формулируются задачи определения виновников искажения [5] и учета количества искаженной энергии, принимая во внимание ее направление.

Анализ предыдущих исследований

В [6] ток и напряжение на элементах контура заданы с использованием тригонометрической формы ряда Фурье. При этом определены мощности каждого из элементов схемы (источника питания, омического сопротивления, диода) в виде

$$p = ui = P_0 + \sum_s P_s \cos(s\omega t),$$

где P_0 – постоянная мощность (среднее значение); P_k – амплитуда колебаний s -х гармоник мощности; ω – угловая частота колебаний.

В результате соответствующие амплитуды мощности сведены в таблицу, на основании которой сделан вывод о том, что представление мощности диода посредством умножения амплитуд гармонических составляющих напряжения и тока подробно раскрывают гармоники мощности и обнаруживают процессы распределения последней в схеме. Но, как отмечается в ряде работ [7–9], анализ процесса образования мощности и порядка гармоник последней определенным образом отражает известные энергетические показатели. Так, в [10], используя периодические, полигармонические напряжение и ток $u = \sum_k u_k = \sqrt{2} \sum_k U_k \sin(k\omega t + \psi_{uk})$; $i = \sum_n i_n = \sqrt{2} \sum_n I_n \sin(n\omega t + \psi_{in})$ (где k, n – номер гармоники напряжения и тока; U_k, I_n – действующее значение гармоники напряжения и тока; ψ_{uk}, ψ_{in} – начальная фаза напряжения и тока), анализируют порядок расчета гармоник мощности:

$$p = \sum_k u_k \sum_n i_n = \sum_{k,n} U_k I_n \cos[(k-n)\omega t + \psi_{uk} - \psi_{in}] - \sum_{k,n} U_k I_n \cos[(k+n)\omega t + \psi_{uk} + \psi_{in}].$$

Используя в таком случае активную мощность в виде

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p dt = \sum_{k,n} [U_k I_n \cos(\psi_{uk} - \psi_{in})],$$

вводят среднеквадратичное значение мощности

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p^2 dt},$$

где t_0 – время начала отсчета; T – период функции.

В результате предложено выражение для расчета альтернативной реактивной мощности AQ , используя среднеквадратичное значение гармоник мощности с четным номером $P_{rms}(2m)$ (где m – целое положительное число) и активную мощность P :

$$AQ = \sqrt{2 \sum [P_{rms}(2m)]^2 - P^2}.$$

А также предложено выражение для расчета альтернативной мощности искажения AD , используя среднеквадратичное значение гармоник мощности с нечетным номером $P_{rms}(2m+1)$:

$$AD = \sqrt{2 \sum [P_{rms}(2m+1)]^2}.$$

Как следствие – формула для расчета альтернативной неактивной мощности

$$AN = \sqrt{AQ^2 + AD^2}.$$

Это позволяет определить альтернативную полную мощность

$$AS = \sqrt{P^2 + AQ^2 + AD^2}.$$

Недостатком предлагаемого решения является определение показателей процесса передачи энергии на основании не мгновенной мощности p , а ее квадратичной нормы P_{rms} .

Цель работы – определение мощности искажения на основании компонент мгновенной мощности.

Результаты исследований

Рассмотрим простой контур, приведенный на рис. 1, включающий некоторый источник ЭДС e_s с внутренним сопротивлением R_s и нагрузку, содержащую сопротивление R_{ld} и идеальный неуправляемый вентиль VD . Используя по аналогии с [7] напряжение и ток диода в виде

$$u_{VD} = U_{VD,0} + \sqrt{2} \sum_{k=1,2,4,6,8,10} U_{VD,k} \cos(k\omega t); \quad i_{VD} = I_{VD,0} + \sqrt{2} \sum_{n=1,2,4,6,8,10} I_{VD,n} \cos(n\omega t),$$

где $U_{VD,0}$, $I_{VD,0}$ – постоянная составляющая напряжения и тока диода; $U_{VD,k}$, $I_{VD,n}$ – амплитуда гармоники напряжения и тока диода, мощность диода определим по формуле

$$p_{VD} = u_{VD}i_{VD} = P_{VD0} + \sum_{s=1}^{20} P_{VD.s} \cos(s\omega t),$$

где s – номер гармоники мощности; $P_{VD.s}$ – амплитуда гармоник мощности диода.

Пренебрегая увеличением ошибки, сократим количество гармоник мощности до 20; для уменьшения объема вычислений рассмотрим лишь первые 10 гармоник мощности и ее среднее значение.

Используем предложенные в [11] обозначения: c – канонические компоненты мощности, образованные гармониками тока и напряжения при условии $s = k \pm n, k = n$; pc – псевдоканонические компоненты, образованные гармониками тока и напряжения при условии $s = k \pm n, k \neq n$, порядок которых совпадает с порядком канонических компонент; nc – неканонические компоненты, образованные гармониками тока и напряжения при условии $s = k \pm n, k \neq n$, порядок которых не совпадает с порядком канонических компонент.

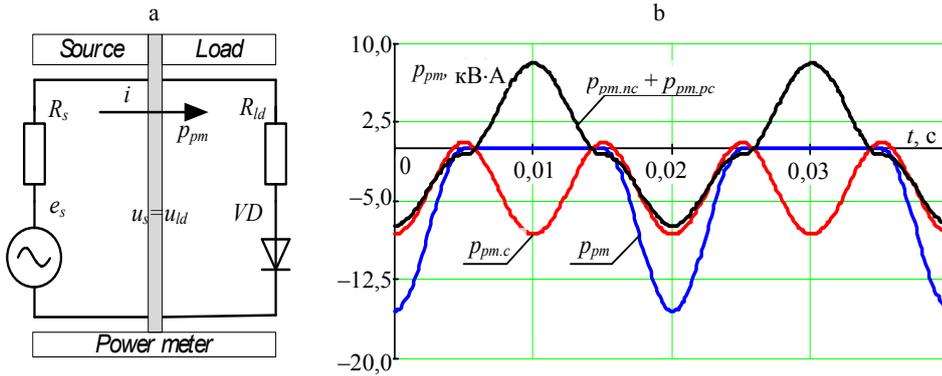


Рис. 1. Исследуемый контур: а – упрощенная схема;

б – временные диаграммы компонент мощности в месте учета

Fig. 1. The circuit under study: a – simplified diagram;

b – time diagrams of power components in the section under monitoring

Рассмотрим подробно образование амплитуд гармоник мощности диода:

$$P_{VD.0} = \underbrace{U_{VD.0}I_{VD.0} + U_{VD.1}I_{VD.1} + U_{VD.2}I_{VD.2} + U_{VD.4}I_{VD.4} + U_{VD.6}I_{VD.6} + \rightarrow}_{c} \rightarrow \underbrace{+U_{VD.8}I_{VD.8} + U_{VD.10}I_{VD.10}}_{c} = P_{VD.0.c};$$

$$P_{VD.1} = \underbrace{U_{VD.0}I_{VD.1} + U_{VD.1}I_{VD.0} + U_{VD.1}I_{VD.2} + U_{VD.2}I_{VD.1}}_{nc} = P_{VD.1.nc};$$

$$P_{VD.2} = \underbrace{U_{VD.1}I_{VD.1}}_c + \underbrace{U_{VD.2}I_{VD.0} + U_{VD.0}I_{VD.2} + U_{VD.4}I_{VD.2} + U_{VD.2}I_{VD.4} + U_{VD.6}I_{VD.4}}_{pc} + \rightarrow$$

$$\rightarrow + \underbrace{U_{VD.4}I_{VD.6} + U_{VD.8}I_{VD.6} + U_{VD.6}I_{VD.8} + U_{VD.10}I_{VD.8} + U_{VD.8}I_{VD.10}}_{pc} = P_{VD.2.c} + P_{VD.2.pc};$$

$$P_{VD.3} = \underbrace{U_{VD.1}I_{VD.2} + U_{VD.2}I_{VD.1} + U_{VD.4}I_{VD.1} + U_{VD.1}I_{VD.4}}_{nc} = P_{VD.3.nc};$$

$$P_{VD.4} = \underbrace{U_{VD.2}I_{VD.2}}_c +$$

$$+ \underbrace{U_{VD.0}I_{VD.4} + U_{VD.4}I_{VD.0} + U_{VD.2}I_{VD.6} + U_{VD.6}I_{VD.2} + U_{VD.4}I_{VD.8} + U_{VD.8}I_{VD.4}}_{pc} + \rightarrow$$

$$\rightarrow + \underbrace{U_{VD.10}I_{VD.6} + U_{VD.6}I_{VD.10}}_{pc} = P_{VD.4.c} + P_{VD.4.pc};$$

$$P_{VD.5} = \underbrace{U_{VD.1}I_{VD.4} + U_{VD.4}I_{VD.1}}_{nc} = P_{VD.5.nc};$$

$$P_{VD.6} = \underbrace{U_{VD.0}I_{VD.6} + U_{VD.6}I_{VD.0} + U_{VD.2}I_{VD.4} + U_{VD.4}I_{VD.2} + U_{VD.2}I_{VD.8} + \rightarrow}$$

$$\rightarrow + \underbrace{U_{VD.8}I_{VD.2} + U_{VD.4}I_{VD.10} + U_{VD.10}I_{VD.4}}_{pc} = P_{VD.6.pc};$$

$$P_{VD.7} = \underbrace{U_{VD.1}I_{VD.6} + U_{VD.6}I_{VD.1} + U_{VD.1}I_{VD.8} + U_{VD.8}I_{VD.1}}_{nc} = P_{VD.7.nc};$$

$$P_{VD.8} = \underbrace{U_{VD.4}I_{VD.4}}_c +$$

$$+ \underbrace{U_{VD.0}I_{VD.8} + U_{VD.8}I_{VD.0} + U_{VD.2}I_{VD.6} + U_{VD.6}I_{VD.2} + U_{VD.2}I_{VD.10} + U_{VD.10}I_{VD.2}}_{pc} =$$

$$= P_{VD.8.c} + P_{VD.8.pc};$$

$$P_{VD.9} = \underbrace{U_{VD.1}I_{VD.8} + U_{VD.8}I_{VD.1} + U_{VD.1}I_{VD.10} + U_{VD.10}I_{VD.1}}_{nc} = P_{VD.9.nc};$$

$$P_{VD.10} = \underbrace{U_{VD.0}I_{VD.10} + U_{VD.10}I_{VD.0} + U_{VD.2}I_{VD.8} + U_{VD.8}I_{VD.2} + \rightarrow}$$

$$\rightarrow + \underbrace{U_{VD.4}I_{VD.6} + U_{VD.6}I_{VD.4}}_{pc} = P_{VD.10.pc}.$$

Аналогичным образом определим гармоники мощности для всех элементов схемы (рис. 1а). Примем следующие параметры схемы: $e_s = 220\sin(2\pi 50t + 0)$ В; $R_{ld} = 2$ Ом; $R_s = 0,5$ Ом; элемент VD – идеальный диод. Сведем значение рассчитанных амплитуд компонент мощности в табл. 1, распределяя по группам: первая, не обозначенная символом, –

амплитуда гармоники мощности, обусловлена суммарным действием следующих групп; вторая, обозначенная символом «с», – амплитуда гармоники канонической компоненты мощности; третья, обозначенная символами «pc, nc», – амплитуда гармоники псевдоканонической или неканонической компонент мощности.

Таблица 1

Значение компонент мощности для схемы рис. 1

The value of power components for the circuit of fig. 1

Значение компонент мощности, В·А	Источник						Нагрузка					
	e_s			R_s			R_{ld}			VD		
		c	pc, nc		c	pc, nc		c	pc, nc		c	pc, nc
P_0	-4840	-4840	0	968	968	0	3872	3872	0	1	1	0
P_1	-8217	0	-8217	1644	0	1644	6573	0	6573	0	0	0
P_2	-4840	-4840	0	969	484	485	3873	1936	1937	-1	2420	-2421
P_3	-1643	0	-1643	328	0	328	1315	0	1315	0	0	0
P_4	0	0	0	0	88	-88	-2	348	-350	2	-436	438
P_5	234	0	234	-46	0	-46	-188	0	-188	0	0	0
P_6	0	0	0	1	0	1	2	0	2	-3	0	-3
P_7	-78	0	-78	16	0	16	62	0	62	0	0	0
P_8	0	0	0	-16	4	-20	-65	14	-79	81	-18	99
P_9	36	0	36	-7	0	-7	-29	0	-29	0	0	0
P_{10}	0	0	0	5	0	5	18	0	18	-23	0	-23

Учитывая определенные трудности анализа полученных в табл. 1 численных значений, придерживаясь введенных выше групп, на рис. 2 приведены диаграммы распределения амплитуд гармоник мощности всех элементов схемы. Нужно отметить, что сохраняется баланс мощности по всем гармоникам первой (рис. 2а), второй (рис. 2б) и третьей (рис. 2с) групп, который иллюстрируется равной суммарной высотой столбцов для каждой гармоники s . На рис. 2а гармоники первой группы мощности источника питания $P_{es,s}$ полностью уравниваются гармониками мощности сопротивления источника питания $P_{Rs,s}$ и мощности сопротивления нагрузки $P_{Rld,s}$, при этом гармоники мощности диода $P_{VD,s}$ присутствуют на уровне ошибки расчета и визуально не различаются. Исходя из анализа распределения гармоник мощности первой группы, диод в формировании энергетического процесса участия не принимает. Определенный смысл в таком выводе есть, так как мощность идеального диода равняется нулю, но это противоречит принципу действия схемы и процессу возникновения высших гармоник в схеме в целом. Для более глубокого понимания процесса перейдем к следующей группе канонических гармоник c (рис. 2б). В этом случае постоянная компонента мощности (активная мощность) источника $P_{es,0,c}$ уравни-

шивается постоянными компонентами мощностей сопротивления источника $P_{Rs,0.c}$ и мощности сопротивления нагрузки $P_{Rld,0.c}$, компонента мощности диода $P_{VD,0.c}$ при этом нулевая. Подробно механизм уравнивания компонент мощности нулевой частоты изложен в [7, 11] и в данном случае не рассматривается. Вторая каноническая гармоника мощности источника $P_{es,2.c}$ уравнивается мощностями всех элементов схемы $P_{Rs,2.c}$, $P_{Rld,2.c}$, в том числе $P_{VD,2.c}$. При этом, исходя из рис. 2с, вторая псевдоканоническая гармоника мощности диода $P_{VD,2.pc}$, которая, придерживаясь обозначений на диаграммах, им генерируется, уравнивается псевдоканоническими гармониками мощности сопротивлений схемы $P_{Rs,2.pc}$, $P_{Rld,2.pc}$. На основании приведенного выше анализа рассмотрим компоненты мощности диода в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 P_{VD.c} &= P_{VD,0.c} + P_{VD,2.c} \cos(2\omega t) + P_{VD,4.c} \cos(4\omega t) + P_{VD,8.c} \cos(8\omega t); \\
 P_{VD.pc} &= P_{VD,2.pc} \cos(2\omega t) + P_{VD,4.pc} \cos(4\omega t) + P_{VD,6.pc} \cos(6\omega t) + \\
 &\quad + P_{VD,8.pc} \cos(8\omega t) + P_{VD,10.pc} \cos(10\omega t); \\
 P_{VD.nc} &= P_{VD,1.nc} \cos(1\omega t) + P_{VD,3.nc} \cos(3\omega t) + P_{VD,5.pc} \cos(5\omega t) + \\
 &\quad + P_{VD,7.pc} \cos(7\omega t) + P_{VD,9.pc} \cos(9\omega t); \\
 P_{VD} &= P_{VD.c} + P_{VD.pc} + P_{VD.nc}.
 \end{aligned}$$

В связи с наличием в составе тока и напряжения только нулевой, первой и четных высших гармоник канонические гармоники мощности порядка $s = 3 + 3 = 6$ и $s = 5 + 5 = 10$ отсутствуют. Временные диаграммы мощности для всех элементов контура (мгновенной мощности p , канонических компонент мощности p_c , неканонических и псевдоканонических компонент мощности $p_{pc} + p_{nc}$) приведены на рис. 3. Особое внимание следует обратить на рис. 3d.

Как было указано ранее, опираясь на диаграммы гармоник мощности (рис 2), неканонические и псевдоканонические компоненты мощности диода $P_{VD.pc} + P_{VD.nc}$ уравнивают действие канонических компонент мощности диода $P_{VD.c}$. Нужно подчеркнуть, что при таком распределении компонент мощности в соответствии с теоремой Телледжена выполняется их декомпозиция для каждой группы:

$$\begin{cases}
 P_{es} + P_{Rs} + P_{Rld} + P_{VD} = 0; \\
 P_{es.c} + P_{Rs.c} + P_{Rld.c} + P_{VD.c} = 0; \\
 P_{es.pc} + P_{Rs.pc} + P_{Rld.pc} + P_{VD.pc} = 0; \\
 P_{es.nc} + P_{Rs.nc} + P_{Rld.nc} + P_{VD.nc} = 0.
 \end{cases}$$

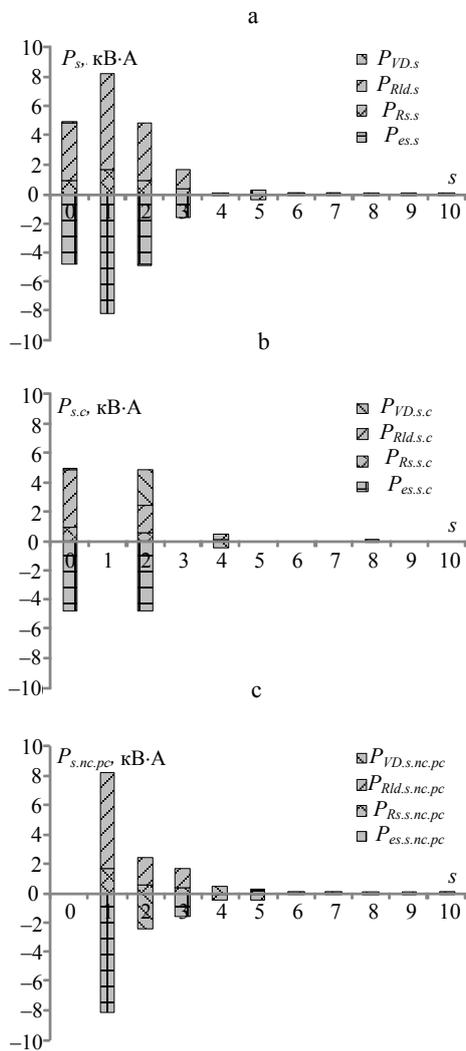


Рис. 2. Распределение гармоник мощности компонент:
 а – суммарных; б – канонических;
 с – псевдоканонических и неканонических

Fig. 2. Distribution of power harmonics components: а – total; б – canonical; с – pseudo-canonical and non-canonical

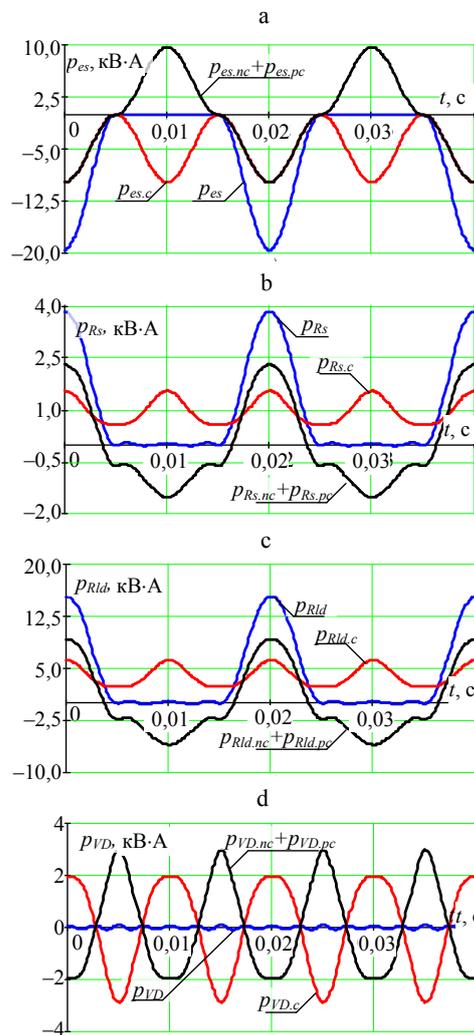


Рис. 3. Временные диаграммы компонент мощности: а – источника;
 б – сопротивления источника;
 с – сопротивления нагрузки; д – диода

Fig. 3. Time diagrams of power components: а – source; б – source resistance; с – load resistance; д – diode

Первое выражение отвечает в целом закону сохранения энергии в контуре, второе – закону сохранения при учете взаимодействия гармоник тока и напряжения одного порядка, на основании чего определяются активная и реактивная мощности в схеме. Последние два выражения дают основание для оценки искажающего влияния элемента схемы. Используя результаты из [5, табл. 1], по аналогии с [8] предлагается определять искажающую электрическую мощность как норму соответствующих компонент мощности элемента схемы

$$D_{pc.nc} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (p_{cp} + p_{nc})^2 dt}.$$

Таким образом, искажающая электрическая мощность в месте учета:

$$D_{source} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (p_{es.pc} + p_{Rs.pc} + p_{es.nc} + p_{Rs.nc})^2 dt};$$

$$D_{load} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (p_{Rld.pc} + p_{VD.pc} + p_{Rld.nc} + p_{VD.nc})^2 dt}.$$

Дополняя табл. 1 источника [7], включающую активную P , полную S , неактивную N и реактивную Q_H мощности, полученные для схемы на рис. 1, результатами расчета, выполненного с использованием предложенных соотношений, получена табл. 2. Не повторяя выводы, сделанные в [7], обратим внимание на то, что известные показатели активной, реактивной мощности основной гармоники (P_{11} , Q_{11}) и высших гармоник (P_{hh} , Q_{hh}) сбалансированы по элементам схемы (сумма по столбцу равна нулю, что соответствует теореме Телледжена), реактивная мощность в схеме отсутствует, диод «генерирует» высшие гармоники мощности.

Таблица 2

Сводные результаты расчета интегральных показателей мощности
Summary results of calculation of integrated power indicators

Показатель мощности		P , Вт	S , В·А	N , В·А	Q_H , вар	P_{rms} , В·А	P_{11} , Вт	Q_{11} , вар	P_{hh} , Вт	Q_{hh} , вар	P_c , В·А	$D_{pc.nc}$, В·А	$D_{pc.nc}$, В·А
Источник	e_s	-4833	6837	4837	-1,8	8374	-4840	0	0	0	5925	5926	4946
	R_s	966	966	0	395	1675	484	0	483,8	0	1028	1235	
Нагрузка	R_{ld}	3866	3866	0	1584	6699	1936	0	1935	0	4113	4943	4946
	VD	0	4837	4837	-1981	32,38	2420	0	-2420	0	1739	1741	

ВЫВОДЫ

1. В ходе исследования распределения компонент гармоник мощности по амплитуде отмечено отсутствие гармоник мощности диода в общем случае и их существование в группах канонических, псевдоканонических и неканонических, на основании чего определено влияние последних на результирующую мощность диода.

2. Анализ компонент мощности с распределением на группы канонических, псевдоканонических и неканонических с соблюдением теоремы Телледжена раскрывает связь ненулевой активной мощности диода по основной гармонике тока и напряжения с нулевой мгновенной мощностью.

3. Учитывая выполнение баланса мощности, отделяя компоненты мощности, образованные гармониками тока и напряжения, которые имеют одинаковые частоты, предложено определение искажающей электрической мощности как квадратичной нормы псевдоканонической и неканонической компонент электрической мощности.

4. Полученные результаты нуждаются в обобщении для произвольных периодических функций тока и напряжения с целью определения качественных показателей электрической мощности и соответственно электрической энергии цепи произвольной конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко, И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии / И. В. Жежеленко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35>.
2. Toups, T. N. Advanced Metering Infrastructure's Measurement of Working Reflected and Detrimental Active Power in Microgrids / T. N. Toups, L. S. Czarnecki // 2014 IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC), Long Beach, CA, 2014. P. 41–46. <https://doi.org/10.1109/igesc.2014.7018638>.
3. Gallo, D. Power Meter Verification Issue: Reactive Power Measurement in Non-Sinusoidal Conditions / D. Gallo, C. Landi, M. Luiso // 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings. Pisa, 2015. P. 1255–1260. <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2015.7151453>.
4. Волошко, А. В. Влияние качества электроэнергии на точность показаний электросчетчиков: обзор исследований / А. В. Волошко, Д. В. Филянин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2014. Т. 87, № 4. С. 38–43.
5. Учет неактивных составляющих полной мощности / Ю. А. Сиротин [и др.] // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сер. Системный анализ, управление и информационные технологии. 2017. Т. 948, № 42. С. 71–76.
6. Сендерович, Г. А. Определение долевого участия субъектов в ответственности за нарушение симметрии напряжений / Г. А. Сендерович // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. «Електротехніка і енергетика». Донецьк: ДонНТУ. 2011. Т. 186, вип. 11. С. 330–335.
7. Bialobrzheskyi, O. Electric Energy Power in the Series Circuit with a Static Resistance Element and a Diode / O. Bialobrzheskyi, A. Gladyr // Journal of Electrical Engineering. 2018. No 1. P. 220–226.
8. Jeltsema, D. Budeanu's Concept of Reactive and Distortion Power Revisited / D. Jeltsema // 2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC). Lagow, 2015. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/isncc.2015.7174697>.
9. Жемеров, Г. Г. Зависимость дополнительных потерь в трехфазных системах электропитания от реактивной мощности и пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Техническая электродинамика. 2015. № 4. С. 66–70.
10. Survey about Classical and Innovative Definitions of the Power Quantities Under Nonsinusoidal Conditions. International / G. Bucci [et al.] // Journal of Emerging Electric Power Systems. 2017. Vol. 18, No 3. P. 1–16. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2017-0002>.
11. Bialobrzheskyi, O. Power Components of Electric Energy for Technical and Commercial Electricity Metering / O. Bialobrzheskyi, D. Rod'kin, A. Gladyr // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2018. No 2. P. 70–79. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/10>.

REFERENCES

1. Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 28–35 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35>.
2. Toups T. N., Czarnecki L. S. (2014) Advanced Metering Infrastructure's Measurement of Working, Reflected, and Detrimental Active Power in Microgrids. *2014 IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC), Long Beach, CA, 2014*, 41–46. <https://doi.org/10.1109/igesc.2014.7018638>.
3. Gallo D., Landi C., Luiso M. (2015) Power Meter Verification Issue: Reactive Power Measurement in Non-Sinusoidal Conditions. *2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Pisa, 2015*, 1255–1260. <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2015.7151453>.
4. Voloshko A. V., Filianin D. V. (2014) Influence of Electric Power Quality on the Accuracy of Electricity Meters Reading: Survey of Research. *Visnik Kremenchuts'kogo Natsional'nogo Universitetu imeni Mikhaïla Ostrograds'kogo = Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 87 (4), 38–43 (in Russian).
5. Sirotin Yu. A., Grib O. G., Gapon D. A., Ierusalimova T. S., Shvets S. V. (2017) Account Inactive Components of Full Power. *Visnik Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu "KhPI". Seriya: Sistemniy Analiz, Upravlinnya ta Informatsiini Tekhnologii Bulletin of National Technical University "KhPI". Series: System Analysis, Control and Information Technologies*, 22, 71–76 (in Russian).
6. Senderovich G. A. (2011) Determination of Share Participation of Subjects in Responsibility for Violation the Symmetry of Stresses. *Naukovi Pratsi Donets'kogo Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu. Seriya "Elektrotekhnika i Energetika"* [Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: "Electrical Engineering and Power Engineering"]. *Donetsk, Donetsk National Technical University*, 186 (11), 330–335 (in Russian).
7. Bialobrzheskyi O., Gladyr A. (2018) Electric Energy Power in the Series Circuit with a Static Resistance Element and a Diode. *Jornal of Electrical Engineering*, (1), 220–226.
8. Jeltsema D. (2015) Budeanu's Concept of Reactive and Distortion Power Revisited. *2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/isncc.2015.7174697>.
9. Zhemerov G. G., Tugay D. V. (2015). The Dependence of the Additional Losses in Three-Phase Power Supply System on Reactive Power and Instantaneous Active Power Pulsations. *Tekhnichna Elektrodynamika*, (4), 66–70 (in Russian).
10. Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E. et al. (2017). Survey about Classical and Innovative Definitions of the Power Quantities under Nonsinusoidal Conditions. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 18 (3), 1–16. <https://doi.org/10.1515/ijeeps-2017-0002>.
11. Bialobrzheskyi O., Rod'kin D., Gladyr A. (2018) Power Components of Electric Energy for Technical and Commercial Electricity Metering. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universitetu*, (2), 70–79. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-2/10>.