

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ / TECHNICAL SCIENCES

2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.31

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.2.1>

ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК СО ЗВЕНОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Антон Васильевич Петров¹, Виталий Евгеньевич Мартусенко^{2*},
Кирилл Константинович Фидиёв³, Даниил Игоревич Сидельников⁴

^{1, 2, 3, 4} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ ap-17@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6274-0851>

² vmartusenko@ncfu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8564-8143>

³ krllfidiev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-2092-6412>

⁴ daniil.sidelnicov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-2699-0274>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Присутствие в низковольтных электрических сетях значительного количества электроприборов, имеющих в своем составе выпрямители, определяет достаточно высокий уровень несинусоидальности токов и напряжений. Это заметно снижает эффективность работы как самой сети, так и отдельных потребителей, чувствительных к спектральному составу питающего напряжения. При этом значительная часть электроустановок со звеном постоянного тока требует устранения пульсаций на выходе выпрямителя, что, в свою очередь, отражается на характере их энергопотребления. **Цель** – исследовать зависимость уровня несинусоидальности токов, потребляемых схемой выпрямления при питании линейной нагрузки от степени сглаживания пульсаций напряжений на выходе выпрямителя. **Материалы и методы.** Исследование построено на анализе спектрального состава токов нагрузки, имеющей в своем составе выпрямительный мост при различной емкости сглаживающего конденсатора на выходе мостового выпрямителя и формой потребляемого из сети тока. Выявлена связь уровня пульсации выпрямленного напряжения со степенью несинусоидальности потребляемых токов. **Заключение.** По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что несинусоидальный характер энергопотребления установок со звеном постоянного тока будет определяться не только емкостью сглаживающего конденсатора, но и сопротивлением нагрузки на выходе выпрямителя.

Ключевые слова: двухполупериодный выпрямитель, диодный мост, пульсации напряжения, несинусоидальный ток

Для цитирования: Петров А. В., Мартусенко В. Е., Фидиёв К. К., Сидельников Д. И. Особенности энергопотребления электроустановок со звеном постоянного тока // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 2 (101). С. 7–15. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.2.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.02.2024;

одобрена после рецензирования 21.02.2024;

принята к публикации 16.03.2024.

Research article

FEATURES OF POWER CONSUMPTION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS WITH A DC LINK

Anton V. Petrov¹, Vitalij E. Martusenko^{2*}, Kirill K. Fidiyov³, Daniil I. Sidel'nikov⁴

^{1, 2, 3, 4} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin str., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ ap-17@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6274-0851>

² vmartusenko@ncfu.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8564-8143>

³ krllfidiev@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-2092-6412>

⁴ daniil.sidelnicov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0000-2699-0274>

* Corresponding author

Abstract. Introduction. The presence in low-voltage electrical networks of a significant number of electrical appliances with rectifiers determines a sufficiently high level of non-sinusoidality of currents and voltages. This significantly reduces the efficiency of both the network itself and individual consumers sensitive to the spectral composition of the supply voltage. At the same time, a significant part of electrical installations with a DC link requires elimination of ripples at the rectifier output, which, in turn, affects the nature of their power consumption. **Goal.** Study of dependence of the level of non-sinusoidality of currents consumed by the rectification circuit when feeding a linear load on the degree of voltage ripple smoothing at the rectifier output. **Materials and methods.** The study is based on the analysis of the spectral composition of the load currents with a rectifier bridge at different capacitance of the smoothing capacitor at the output of the rectifier. **Results and discussion.** The relationship between the

capacitance value of the smoothing capacitor at the output of the bridge rectifier and the shape of the current consumed from the network is determined. A connection was revealed between the level of ripple of the rectified voltage and the degree of non-sinusoidality of the consumed currents. **Conclusion.** According to the results of the conducted research, it can be concluded that the non-sinusoidal character of power consumption of installations with DC link will be determined not only by the smoothing capacitor capacitance, but also by the load resistance at the output of the rectifier.

Keywords: two-half-period rectifier, diode bridge, voltage ripple, non-sinusoidal current

For citation: Petrov AV, Martusenko VE, Fidiyov KK, Sidel'nikov DI. Features of power consumption of electrical installations with a DC link. *Newsletter of North-Caucasus Federal University*. 2024;2(101):7-15. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.2.1>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 12.02.2024;

approved after reviewing 21.02.2024;

accepted for publication 16.03.2024.

Введение / Introduction. На текущий момент среди низковольтных потребителей, подключенных к сетям 0,4 кВ очень много электронных электроприборов. Помимо этого, в настоящее время значительная часть низковольтных потребителей имеет в своем составе электронные компоненты и схемы, позволяющие оптимизировать их работу, повысить степень автоматизации тех или иных процессов. В этой связи следует отметить, что все подобные электроприемники содержат в себе блок преобразования переменного напряжения сети в постоянное напряжение питания, т. н. выпрямители.

Основой выпрямителей служат нелинейные полупроводниковые элементы – диоды. В условиях наличия в схемах нелинейных элементов следует ожидать искажения синусоидальности кривой потребляемого тока, иными словами, появления в спектре потребляемого тока высших гармонических составляющих [1–4]. Как следствие, возникает непрерывный процесс привнесения высших гармоник (ВГ) тока в сеть, что негативно сказывается на форме кривой напряжения в сети и вызывает ухудшение качества электроэнергии по показателям «коэффициент n-й гармонической составляющей» и «суммарный коэффициент высших гармоник в спектре напряжения» [5, 6].

Процесс преобразования переменного напряжения в постоянное предусматривает использование специальных схем выпрямления на основе неуправляемых (диоды) или управляемых (тиристоры) полупроводниковых элементов. Наибольшее распространение получили выпрямители, построенные на неуправляемых диодах, поскольку не требуют дополнительных схем управления и являются более дешевыми и надежными [7].

В подавляющем количестве устройств используется схема т. н. диодного моста (рисунок 1). Данная схема выпрямления получила наиболее широкое распространение в схемах питания однофазных электроустановок со звеном постоянного тока. Следует отметить, что данная схема имеет достаточно заметную пульсацию выпрямленного напряжения на выходе [8]. На практике для сглаживания пульсаций применяется способ, заключающийся во включении параллельно нагрузке сглаживающего конденсатора (выделен пунктиром на рис. 1а). В результате коэффициент пульсаций на выходе данной схемы выпрямления может быть снижен до пренебрежимо малых значений.

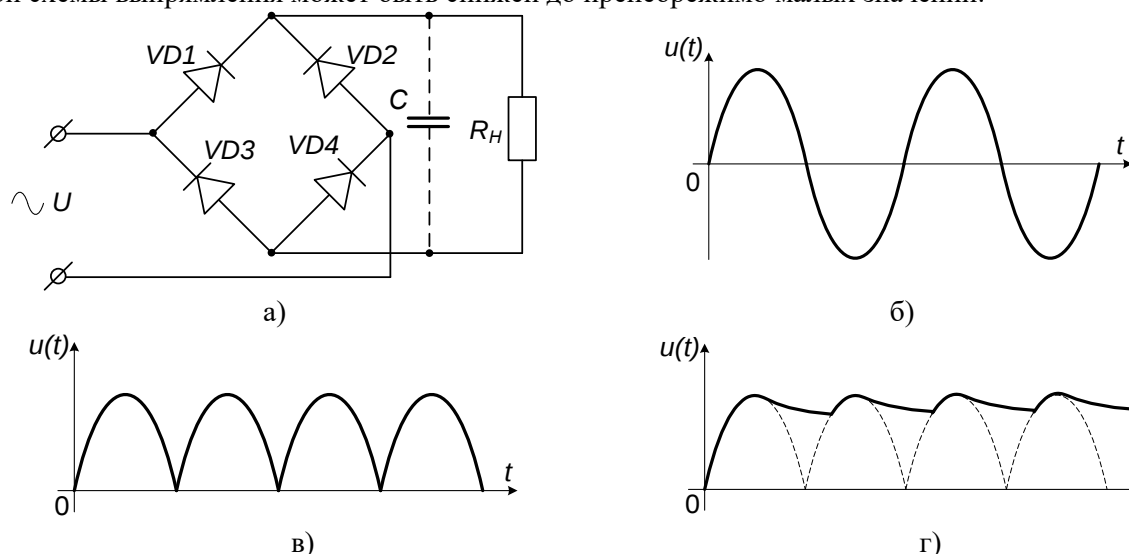


Рис. 1. Работа двухполупериодного мостового выпрямителя: а – схема выпрямителя; б – сетевое напряжение; в – выпрямленное пульсирующее напряжение; г – выпрямленное сглаженное напряжение /
Fig. 1. Operation of a full-wave bridge rectifier: а – rectifier circuit; б – mains voltage; в – rectified ripple voltage; г – rectified smoothed voltage

Несмотря на то что диоды, входящие в схему выпрямительного моста, – нелинейные элементы, работа такого выпрямителя на линейную нагрузку без сглаживающего конденсатора не вызывает заметного искажения кривой потребляемого из сети тока.

Однако на практике подключение схем к пульсирующему напряжению нежелательно. При этом подключение сглаживающего конденсатора разительно меняет картину энергопотребления.

При подключении диодного моста к источнику переменного напряжения (рис. 2а) в процессе работы, так же как и в случае без сглаживания, на каждой полуволне сетевого напряжения работают попеременно пары диодов VD1 – VD4 и VD2 – VD3. На каждом положительном фронте пульсирующего напряжения конденсатор C заряжается до амплитудного значения, после чего начинает разряжаться через нагрузку, заполняя провал между полуволнами пульсирующего напряжения (интервал t_2 – t_3 на рис. 2б).

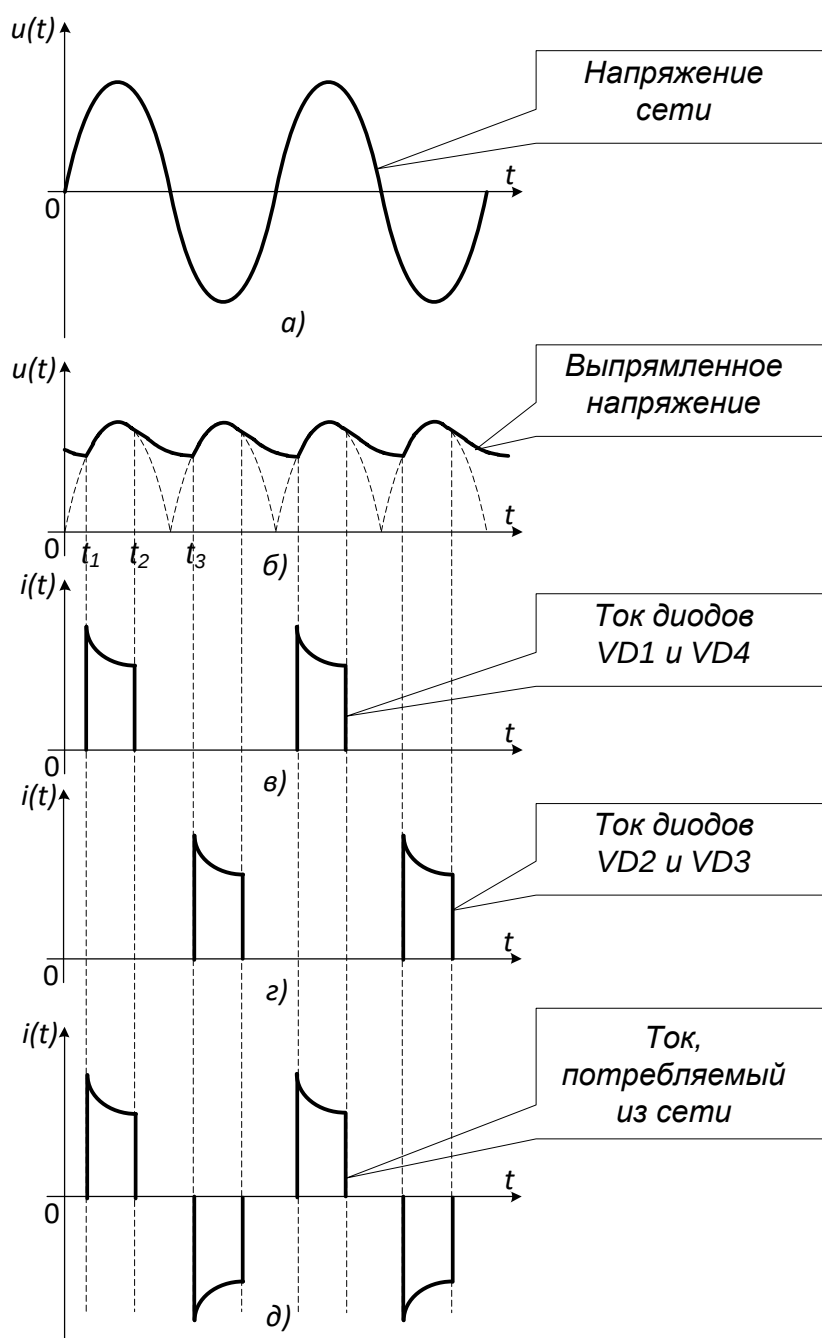


Рис. 2. Графики режимных параметров работы диодного моста на линейную нагрузку с использованием сглаживающего конденсатора / Fig. 2. Graphs of operating parameters of a diode bridge for a linear load using a smoothing capacitor

Поскольку на отрицательном фронте пульсаций напряжение на конденсаторе превышает мгновенное значение сетевого напряжения на входе в выпрямитель, диоды оказываются закрытыми – конденсатор формирует напряжение «подпорки». Таким образом, на интервале t_2-t_3 ток протекает только в контуре $C-R_H$, через диоды и соответственно через входную цепь моста в это время ток не протекает. Через диоды ток течет только в процессе заряда сглаживающего конденсатора (интервал t_1-t_2 на рис. 2б). На рис. 2в и 2г приведены кривые токов, протекающих через пары диодов в моменты заряда конденсатора.

Таким образом, на входе в схему выпрямления ток имеет форму сигнала, состоящего из разнополярных импульсов отделенных друг от друга относительно большими бестоковыми паузами. Следует отметить, что увеличение емкости сглаживающего конденсатора снижает уровень пульсации напряжения на нагрузке, но при этом увеличивает длительность бестоковых пауз (интервал t_2-t_3 на рис. 2б), повышая тем самым степень несинусоидальности потребляемого из сети тока.

Можно отметить следующую особенность мостовой схемы выпрямления: даже при работе на нагрузку с линейной вольт-амперной характеристикой добавление в схему линейного конденсатора для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения приводит к нелинейности всей схемы. При этом увеличение емкости сглаживающего конденсатора приводит к заметному увеличению степени несинусоидальности потребляемых токов за счет уменьшения длительности интервалов проводимости диодов.

Таким образом, целью данной работы является исследование зависимости уровня несинусоидальности токов, потребляемых схемой выпрямления при питании линейной нагрузки, от степени сглаживания пульсаций напряжений на выходе выпрямителя.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research. В рамках данной работы поставлена основная задача исследования: посредством эксперимента выявить зависимость степени несинусоидальности токов потребления мостовой схемы выпрямления в зависимости от уровня пульсаций выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя.

Экспериментальная установка включает в себя:

- источник питания;
- диодный мост;
- набор конденсаторов для сглаживания;
- набор нагрузочных резисторов;
- измерительный комплекс.

В качестве источника питания был использован испытательный комплекс OMICRON CMC 356. Данный комплекс позволяет сформировать напряжение питания в виде чистой синусоиды, т. е. в напряжении питания будут отсутствовать высшие гармоники, тогда как сетевое напряжение может иметь «засоренный» спектр.

Исследуемый выпрямитель представляет собой готовую схему собранного диодного моста. Тип схемы RS406. В качестве нагрузочных элементов был использован проволочный резистор серии ПЭВ-10 сопротивлением в 1 кОм, позволяющий рассеивать мощность до 10 Вт. Для сглаживания пульсаций были использованы различные электролитические конденсаторы с напряжением не менее 400 В и емкостью от 1 до 140 мкФ.

В качестве системы измерений использовалась система сбора данных NI cDAQ-9172 с подключенным модулем NI 9225. Данная система измерений позволяет производить цифровые измерения сигналов с высокой точностью и высокой частотой дискретизации. Данные передавались по USB-протоколу и сохранялись на персональном компьютере в виде текстового файла.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

Схема подключается к испытательному стенду OMICRON, на котором формируется стабилизированное синусоидальное напряжение 220 В с частотой 50 Гц. В измерительной системе задействованы два канала измерений. Первый канал измеряет мгновенные значения на выходе диодного моста. Второй канал измеряет ток на входе диодного моста. Поскольку в эксперименте использовался только модуль NI 9225, предназначенный для измерения напряжений, то ток оценивался как падение напряжения на измерительном шунте $R_{ш}$. В качестве измерительного шунта использовалось низкоомное проволочное сопротивление.

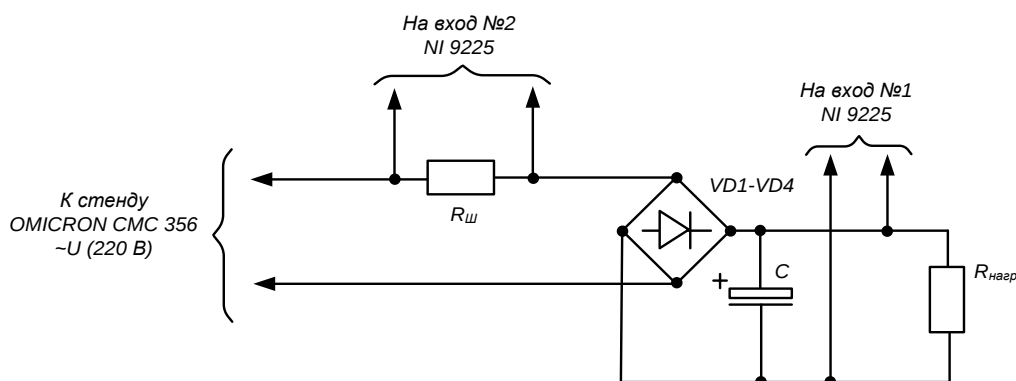


Рис. 3. Схема экспериментальной установки / Fig. 3. Experimental setup diagram

Поскольку в работе предусматривается определение степени несинусоидальности токов, то возникла необходимость использования преобразования Фурье для выделения всех гармонических составляющих. Однако, чтобы оценить коэффициент несинусоидальности токов в [26], предложен способ, позволяющий ограничиться только выделением первой гармоники.

В [9] предлагается подход к оценке суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, не требующий разложения периодического сигнала на высшие гармоники. Метод предполагает выделение только основной гармоники. При этом суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжений и токов рассчитывается по формуле

$$K_U = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [u(t) - u_1(t)]^2 dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [u_1(t)]^2 dt}}, \quad (1)$$

где $u(t)$ – мгновенное значение сетевого напряжения; $u_1(t)$ – мгновенное значение основной гармоники; T – период основной гармоники.

Для дискретных измерений сетевого напряжения формула (1) для расчета суммарного коэффициента гармонических составляющих будет выглядеть следующим образом:

$$K_U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N [U_i - U_{(1)i}]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^N U_{(1)i}^2}}, \quad (2)$$

где N – количество дискретных отсчетов за период; U_i – сетевое напряжение в i -ом отсчете; $U_{(1)i}$ – напряжение основной гармоники в i -ом отсчете.

Для выделения основной гармоники из дискретной осциллограммы был создан расчетный файл-таблица в редакторе Excel. Данный файл реализует в себе алгоритм дискретного преобразования Фурье, направленный на выделение только первой (основной) гармоники сигнала.

Для оценки уровня пульсаций сигналов на практике используют такой показатель, как «коэффициент пульсаций». Следует отметить, что существует несколько, отличающихся друг от друга, подходов к расчету коэффициента пульсаций. В рамках данной работы коэффициент пульсаций оценивался как:

$$k_{\Pi} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_0} \cdot 100 \% \quad (3)$$

где $U_{\min}$ – минимальное значение за период пульсирующего сигнала; $U_{\max}$ – максимальное значение за период пульсирующего сигнала; U_0 – постоянная составляющая пульсирующего сигнала.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. В рамках исследований была проведена серия экспериментов в условиях различной степени сглаживания pulsa-

ций выпрямленного напряжения при работе мостового выпрямителя на линейную активную нагрузку. Была проведена серия опытов с конденсаторами емкостью 1; 4,7; 6,8; 10; 15; 22; 47; 68 и 100 мкФ, а также с различными их сочетаниями. Таким образом, емкость сглаживающего конденсатора при проведении экспериментов варьировалась от 0 до 215 мкФ.

Графические зависимости измеренных в эксперименте параметров представлены на рис. 4–6.

Как можно увидеть из рис. 4, при увеличении емкости сглаживающего элемента коэффициент пульсаций снижается, что вполне ожидаемо. Однако при этом начинает заметно расти коэффициент несинусоидальности токов на входе выпрямителя (рис. 5).

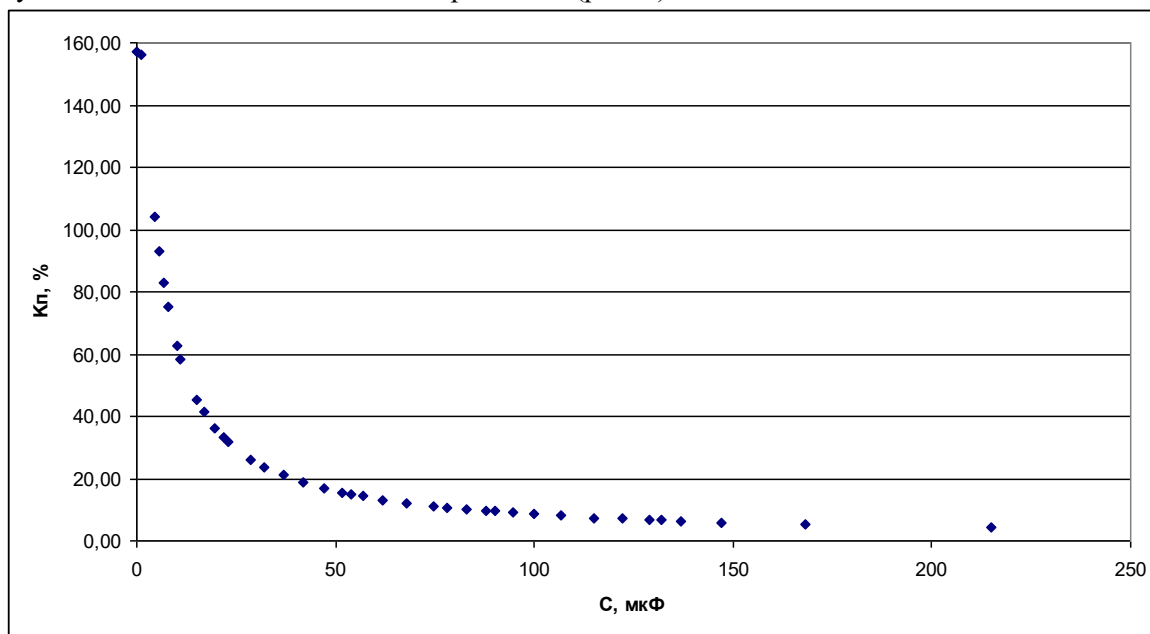


Рис. 4. Эмпирическая зависимость коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения от величины емкости сглаживающего конденсатора на выходе выпрямителя / Fig. 4. Empirical dependence of the ripple coefficient of the rectified voltage on the capacitance value of the smoothing capacitor at the output of the rectifier

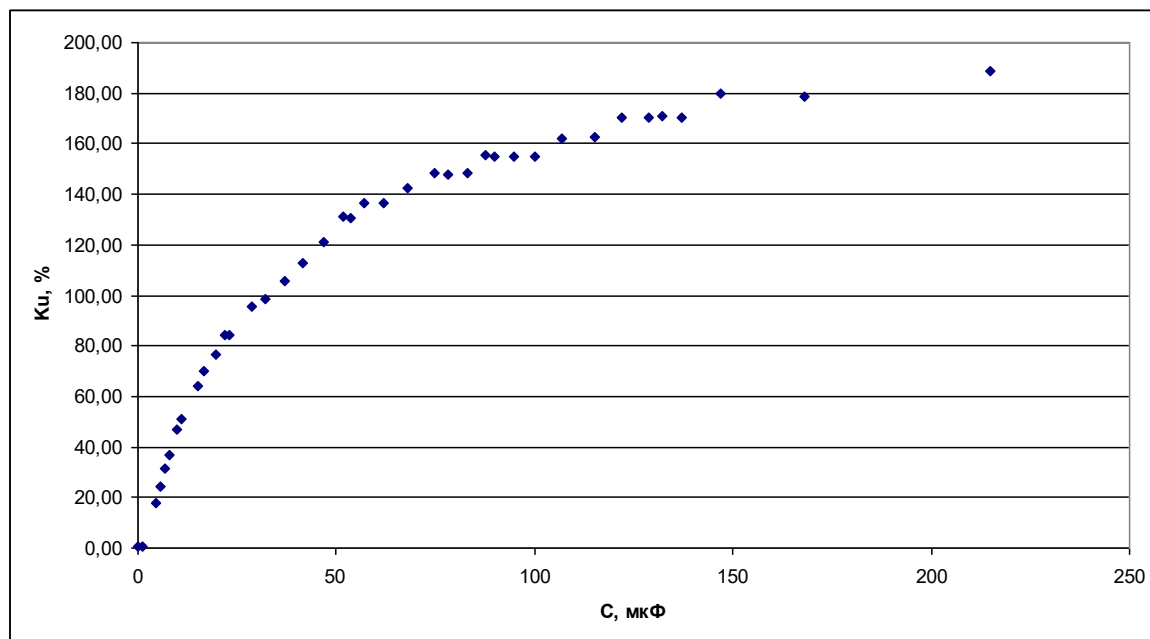


Рис. 5. Эмпирическая зависимость коэффициента несинусоидальности потребляемых выпрямителем токов от величины емкости сглаживающего конденсатора на выходе выпрямителя / Fig. 5. Empirical dependence of the non-sinusoidal coefficient of currents consumed by the rectifier on the capacitance value of the smoothing capacitor at the output of the rectifier

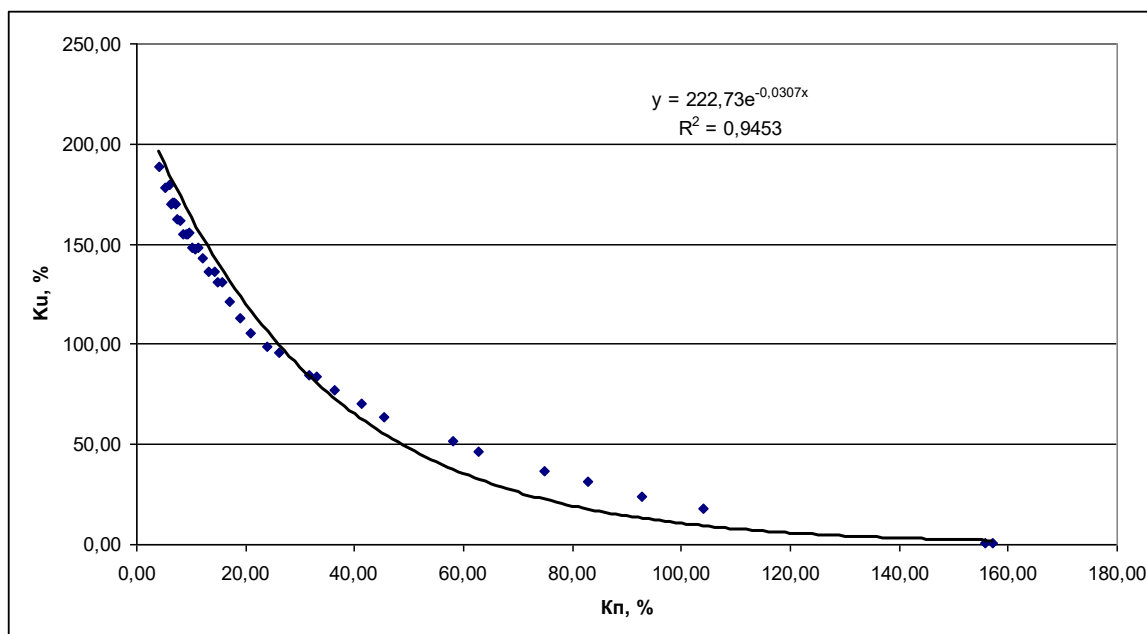


Рис. 6. Связь между коэффициентом пульсаций напряжения на выходе выпрямителя и коэффициентом несинусоидальности потребляемых из сети токов / Fig. 6. The relationship between the voltage ripple coefficient at the rectifier output and the non-sinusoidal coefficient of currents consumed from the network

Связь между коэффициентом пульсаций k_{Π} и коэффициентом несинусоидальности токов k_I (рис. 6) может быть описана следующим выражением:

$$k_{\Pi} [\%] \approx 222,7 \exp(-0,0307 \cdot k_I [\%]) \quad (4)$$

При этом связь между k_{Π} и k_I достаточно сильная, о чем свидетельствует индекс парной корреляции $R = -0,972$ (при коэффициенте детерминации $R^2 = 0,945$).

Закключение / Conclusion. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о том, что при снижении пульсаций напряжения на выходе выпрямителя имеет место увеличение степени несинусоидальности токов, потребляемых выпрямителем из сети.

При этом следует отметить, что скорость разряда сглаживающего конденсатора определяется не только его емкостью, но и активным сопротивлением нагрузки, на которую он разряжается, поэтому можно предположить, что при изменении нагрузки выпрямителя будет изменяться величина интервалов проводимостей диодов. В свою очередь, изменение длительности интервалов проводимости диодов в схеме выпрямительного моста влечет за собой изменение спектра потребляемого из сети тока. Таким образом, несинусоидальный характер энергопотребления установок со звеном постоянного тока будет определяться не только емкостью сглаживающего конденсатора, но и сопротивлением нагрузки на выходе выпрямителя.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Плотников М. П. Несинусоидальность напряжения как один из факторов ухудшения качества электрической энергии // Сборник научных трудов SWorld. 2011. Т. 9. № 4. С. 5–8.
2. Аронов Л. В., Васильева Т. Н. Исследование влияния компактных люминесцентных ламп на несинусоидальность токов и напряжений электрической распределительной сети // Актуальные вопросы технических наук: материалы II Международной научной конференции. Сер. Молодой ученый – 2013. Пермь: Меркурий, 2013. С. 31–35.
3. Колмаков В. О., Колмакова Н. Р. Несинусоидальность тока в сетях до 1000 В // Инновационные технологии на железнодорожном транспорте: труды XXII Межвузовской научно-практической конференции КрИЖТ ИрГУПС / Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО "Иркутский государственный университет путей сообщения". Красноярск, 2018. С. 43–46.
4. Голосов М. С., Васильева О. А. Исследование несинусоидальности тока и напряжения в системах электроснабжения с выпрямительной нагрузкой // Неделя науки СПбПУ: мат-лы научной конференции с международным участием. Лучшие доклады. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. С. 28–32.
5. Куренный Э. Г., Лютый А. П. Оценка несинусоидальности напряжения при анализе качества электроэнергии // Электричество. 2005. № 8. С. 2–9.

6. Петров А. В., Костюков Д. А., Орсаев И. А., Шпигоцкая А. Ю. Анализ спектрального состава токов в сетях, питающих коммунально-бытовую нагрузку // VII (64) ежегодная научно-практическая конференция «Университетская наука – региону»: Актуальные проблемы инженерных наук. Ставрополь: Тэсэра, 2019. С. 53–59.
7. Хартуков Э. А. Исследование и сравнение параметров диодного и тиристорного однофазного выпрямителя // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2016. № 14-1. С. 153–156.
8. Гилемов А. Г. Исследование преобразования энергии // Актуальные вопросы формирования механизмов реализации международного сотрудничества в системе высшего образования Российской Федерации в современных условиях: сборник статей Международной научно-практической конференции. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. С. 30–33.
9. Петров А. В., Мартусенко В. Е., Дейникин Р. Н. Метод экспресс-оценки суммарных коэффициентов гармонических составляющих в электрических сетях // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2017. № 2(59). С. 26–29.

REFERENCES

1. Plotnikov MP. Non-sinusoidal voltage as one of the factors deteriorating the quality of electrical energy. Sbornik nauchnykh trudov = Collection of scientific papers SWorld. 2011;9(4):5-8. (In Russ.).
2. Aronov LV, Vasilyeva TN. Study of the influence of compact fluorescent lamps on the non-sinusoidal currents and voltages of the electrical distribution network. Topical issues of technical sciences: proceedings of the II International Scientific Conference. Young Scientist – 2013. Perm: Mercury; 2013. P. 31-35. (In Russ.).
3. Kolmakov VO, Kolmakova NR. Non-sinusoidal current in networks up to 1000 V. Innovative technologies in iron-making transport: in the work of the XXII Interuniversity Scientific and Practical Conference of the KRIZHT IrGUPS / Krasnoyarsk Institute of Iron-Making Transport - branch of the Irkutsk State University of Railway Engineering. Krasnoyarsk; 2018. P. 43-46. (In Russ.).
4. Golosov MS, Vasilyeva OA. Study of non-sinusoidal current and voltage in power supply systems with a rectifier load. St. Petersburg State University Science Week: materials of a scientific conference with international participation. The best reports. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2016. P. 28-32. (In Russ.).
5. Kurenny EG, Lyuty AP. Estimation of non-sinusoidal voltage in the analysis of electricity quality. Elektrichestvo = Electricity. 2005;8:2-9. (In Russ.).
6. Petrov AV, Kostyukov DA, Orsaev IA, Shpigotskaya AY. Analysis of the spectral composition of currents in networks feeding utility loads. VII (64) Annual scientific and practical conference "University Science for the Region": Actual problems of engineering sciences. Stavropol: Tesera; 2019. P. 53-59. (In Russ.).
7. Khartukov EA. The study and comparison of the parameters of the diode and thyristor single phase rectifier. Fundamental and applied research in the modern world = Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v sovremennom mire. 2016;14-1:153-156. (In Russ.).
8. Gilemov AG. Energy conversion research. Topical issues of the formation of mechanisms for the implementation of international cooperation in the higher education system of the Russian Federation in modern conditions: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Penza: Penza State Agrarian University; 2022. P. 30-33. (In Russ.).
9. Petrov AV, Martusenko VE, Deinikin RN. Method of express assessment of the total coefficients of harmonic components in electrical networks. Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta = Newsletter of North-Caucasus federal university. 2017;2(59):26-29. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антон Васильевич Петров – доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения инженерного института, Северо-Кавказский федеральный университет, Scopus ID: 57210523416, Researcher ID: ITT-8942-2023

Виталий Евгеньевич Мартусенко – старший преподаватель кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения инженерного института, Северо-Кавказский федеральный университет, Researcher ID: ISS-8247-2023

Кирилл Константинович Фидиёв – студент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения инженерного института, Северо-Кавказский федеральный университет, Researcher ID: KCK-0941-2024

Даниил Игоревич Сидельников – студент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения инженерного института, Северо-Кавказский федеральный университет, Researcher ID: KCJ-7790-2024

ВКЛАД АВТОРОВ

Антон Васильевич Петров

Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Виталий Евгеньевич Мартусенко

Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Кирилл Константинович Фициев

Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

Даниил Игоревич Сидельников

Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Petrov – Associate Professor, Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57210523416, Researcher ID: ITT-8942-2023

Vitalij E. Martusenko – Senior Lecturer of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: ISS-8247-2023

Kirill K. Fidiyov – Student of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: KCK-0941-2024

Daniil I. Sidel'nikov – Student of the Department of Automated Electric Power Systems and Power Supply, Engineering Institute, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: KCJ-7790-2024

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Anton V. Petrov

Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained.

The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Vitalij E. Martusenko

Conducting a study is the collection, interpretation and analysis of the data obtained.

The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Kirill K. Fidiyov

Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version, participation in scientific design.

Daniil I. Sidel'nikov

Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version, participation in scientific design.