

УДК 621.311.1

EDN UPVRVH

## РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ТОКОВ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ГЛАВНОГО ПРИВОДА ВОСЬМИФУТОВОГО ЛУЩИЛЬНОГО СТАНКА

**В.В. Черепанов**ORCID: 0009-0004-6940-2961 e-mail: [cherepanov@vyatsu.ru](mailto:cherepanov@vyatsu.ru)

Вятский государственный университет

*Киров, Россия***А.К. Торопова**ORCID: 0000-0002-4450-7669 e-mail: [usr22264@vyatsu.ru](mailto:usr22264@vyatsu.ru)

Вятский государственный университет

*Киров, Россия*

Безаварийное функционирование электроприемников в системе электро-снабжения во многом определяется качеством электрической энергии. В настоящее время на фанерных предприятиях наблюдается тенденция увеличения доли силовых электронных устройств, входящих в состав различных электротехнологических установок. Это приводит к увеличению проблем, связанных с качеством электро-энергии. К числу агрегатов, оказывающих существенное отрицательное влияние на качество электроэнергии, относится и лущильный станок, применяемый при изготовлении фанеры. Объектом исследования является лущильный станок с главным приводом постоянного тока, оснащенный управляемым выпрямителем (УВ), генерирующим в электрическую сеть токи высших гармоник, которые отрицательно влияют на качество электрической энергии. Для анализа несинусоидального режима электрической сети необходимо иметь методику расчета этих токов. В настоящее время такая методика отсутствует. К трудностям ее создания относятся отсутствие сведений об углах управления  $\alpha$  и коммутации  $\gamma$  выпрямителя и случайные колебания напряжения электрической сети. Цель работы – исследование и расчет спектрального состава токов, генерируемых выпрямителем главного привода восьмифутового лущильного станка при неполной информации о параметрах режима работы УВ и уровнях напряжения сети. Для достижения поставленной цели проведен эксперимент на современном фанерном предприятии, находящемся на территории Кировской области. В ходе исследования получены аналитические выражения для расчета амплитуд токов высших гармоник, генерируемых УВ лущильного станка при отсутствии информации об углах  $\alpha$  и  $\gamma$  вентильного преобразователя, для интервалов осреднения 200 мс, 10 мин., 30 мин. Полученные результаты позволяют оценить электромагнитную совместимость электрооборудования восьмифутового лущильного станка по показателю несинусоидальности кривой напряжения и могут быть использованы для решения ряда практических задач.

**Ключевые слова:** высшие гармоники, качество электрической энергии, лущильный станок, несинусоидальность, резкопеременная нагрузка.

**Для цитирования:** Черепанов В.В., Торопова А.К. Расчет спектрального состава токов выпрямителя главного привода восьмифутового лущильного станка // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 1. С. 25-35. EDN UPVRVH

## **CALCULATING SPECTRAL COMPOSITION OF RECTIFIER CURRENTS OF EIGHT-FOOT VENEER PEELING MACHINE MAIN DRIVE**

**V.V. Cherepanov**

ORCID: 0009-0004-6940-2961 e-mail: [cherepanov@vyatsu.ru](mailto:cherepanov@vyatsu.ru)

Vyatka State University

*Kirov, Russia*

**A.K. Toropova**

ORCID: 0000-0002-4450-7669 e-mail: [usr22264@vyatsu.ru](mailto:usr22264@vyatsu.ru)

Vyatka State University

*Kirov, Russia*

**Abstract.** The trouble-free functioning of electrical receivers in the power supply system is largely determined by the quality of electrical energy. At present, there is a tendency at plywood enterprises to increase the share of power electronic devices that are part of various electrotechnological installations. This leads to an increase in problems related to the quality of electrical energy. The number of units that have a significant negative impact on the quality of electricity also includes a veneer peeling machine used in the manufacture of plywood. The main drive of the machine is a DC motor, so it is equipped with a valve converter that generates currents of higher harmonics into the electrical network, which negatively affects the quality of electrical energy. To analyze the non-sinusoidal mode of the electrical network, it is necessary to have a calculation method for currents of higher harmonics generated rectifier the peeling machine. Now there is no such methodology. The difficulties of its creation include the lack of information about the control angles  $\alpha$  and switching  $\gamma$  of the rectifier and random fluctuations in the voltage of the electrical network. The purpose of the work is to develop a methodology for calculating the modules currents of higher harmonics generated by the rectifier of the main drive of the peeling machine with incomplete information about the parameters of the rectifier operating mode and network voltage levels. To achieve this goal, an experiment was conducted on a modern plywood enterprise located on the territory of the Kirov region. In the course of the study, analytical expressions were obtained for calculating the modules of the currents of higher harmonics generated by the straightening of the peeling machine in the absence of information about the angles  $\alpha$  and  $\gamma$  of the valve converter for averaging intervals of 200 ms, 10 min., 30 min. The obtained mathematical models for calculating the spectral composition of the current modules of the higher harmonics of the rectifier make it possible to calculate the mode of higher harmonics in electrical networks of

plywood production to solve a number of practical problems.

**Keywords:** higher harmonics, electric power quality, veneer peeling machine, non-sinusoidal waveform, abruptly variable load.

**For citation:** V.V. Cherepanov and A.K. Toropova, “Calculating spectral composition of rectifier currents of eight-foot veneer peeling machine main drive”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 25-35, 2024. EDN UPVRVH

## I. Введение

Качество электрической энергии (КЭЭ) – степень соответствия определенных характеристик электрической энергии (ЭЭ) в точках ее передачи от продавца к покупателю или показателей качества ЭЭ у потребителей, подключенных к электрическим сетям переменного тока различных классов напряжения с номинальной частотой, равной 50 Гц [1]. Одной из наиболее распространенных проблем, связанных с КЭЭ, является гармоническое загрязнение [2]. Наличие высших гармоник (ВГ) в системе электроснабжения (СЭС) может нарушить нормальную работу электронных систем управления и даже вызвать отключение, прерывание работы и повреждение электрооборудования, также приводящее к увеличению потерь у потребителя ЭЭ и снижающее производительность и эффективность предприятий [3-7].

Современные фанерные предприятия оснащаются установками, характеризующимися нелинейными и резкопеременными электрическими нагрузками, которые способны снижать КЭЭ и негативно воздействовать на элементы СЭС и на СЭС в целом [8]. Примером такой установки является лущильный станок (ЛС) для получения лущильного шпона. Главным приводом станка является двигатель постоянного тока (ДПТ). Для преобразования трехфазного переменного тока в постоянный станок оснащается УВ, который электрической сети является нелинейной нагрузкой и, соответственно, источником токов ВГ. Несинусоидальные токи выпрямителя, протекающие по элементам СЭС, искажают кривую напряжения сети, что приводит к негативным последствиям, перечисленным выше.

С 2013 г. в РФ действует ГОСТ 32144-2013, в котором утверждены показатели качества ЭЭ, относящиеся к несинусоидальности напряжения, и их нормы [9]. Следовательно, уже на стадии проектирования фанерных предприятий необходимо количественно оценивать уровень ВГ и анализировать спектральный состав токов, чтобы удовлетворить требования стандарта и избежать отрицательных воздействий ВГ. В связи с этим необходимо выполнять расчеты несинусоидального режима в сети фанерного предприятия и при необходимости применять организационные и технические мероприятия для снижения уровня ВГ [10, 11].

Известно, что электрическая нагрузка ЛС меняется случайным образом и носит резкопеременный характер. В процессе лущения случайными

являются амплитуда импульсов нагрузки, количество импульсов в цикле, продолжительность рабочего периода и холостого хода, амплитуды и фазы токов ВГ. Разложение кривых первичных токов в ряд Фурье показывает, что амплитуды и фазы ВГ токов зависят от углов коммутации  $\gamma$  и управления  $\alpha$  вентильного преобразователя, а также уровней напряжения сети, подведенного к выпрямителю. Так как напряжение сети, от которой получает питание УВ, меняется случайным образом, и на стадии проектирования СЭС проектировщику неизвестны  $\gamma$  и  $\alpha$ , воспользоваться известными формулами для расчета амплитуды и фазы ВГ невозможно. Чтобы минимизировать погрешность в расчетах и избежать применения упрощенных формул, дающих большие погрешности, необходимо получить аналитические выражения для расчета спектрального состава амплитуд токов ВГ выпрямителя при отсутствии сведений об углах  $\gamma$  и  $\alpha$  и отсутствии сведений о напряжении сети.

## II. Материалы и методы

В рамках исследования были использованы экспериментальные и теоретические методы.

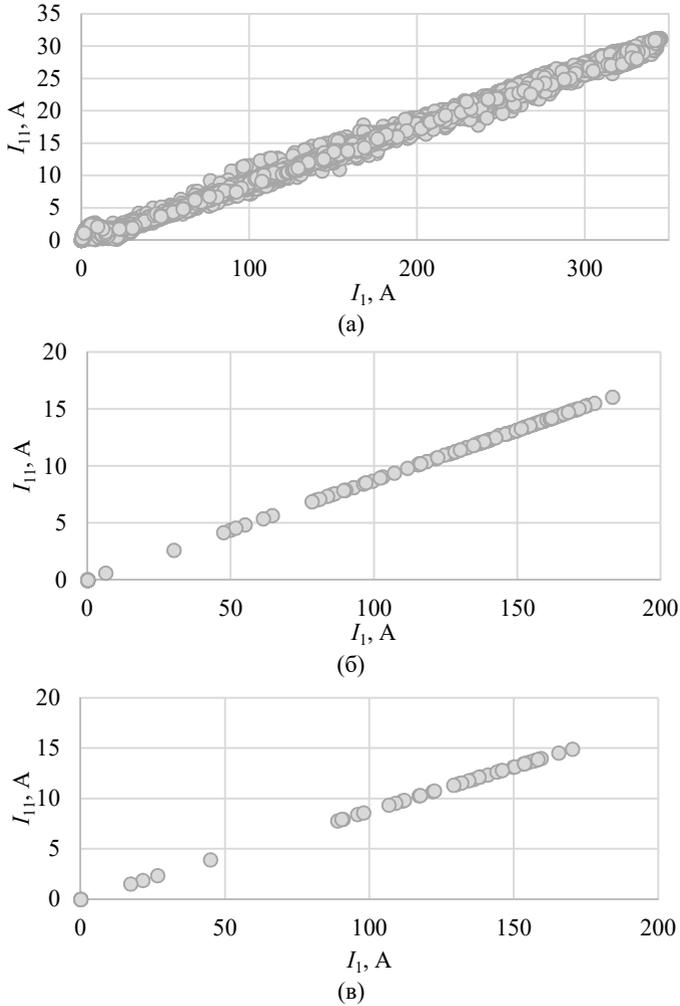
Для проведения экспериментального исследования было выбрано современное предприятие по производству фанеры, действующее с 2017 г. Объектом экспериментального исследования выступает восьмифутовый лущильный станок фирмы *Raute* с главным приводом на базе ДПТ фирмы *Siemens*, серии 1GG6, мощностью 154 кВт и ВП *Sinamics DCM* фирмы *Siemens*. Эксперимент длился одни сутки и был проведен в реальных условиях работы ЛС.

Для измерения и регистрации токов ВГ применялся анализатор КЭЭ фирмы *Sonel PQM-701*, поверенный согласно ГОСТ Р 8.656-2009 и прошедший сертификацию.

Измерения производились с шагом квантования 200 мс и 10 мин:

- интервал осреднения 200 мс позволяет определить пиковые значения гармонических составляющих тока;
- интервал осреднения 10 мин. необходим по требованиям ГОСТ 32144-2013 для оценки соответствия ПКЭ установленным стандартам и для расчета параметров электрической нагрузки на 30-минутном интервале осреднения.

На основании полученных экспериментальных данных построены зависимости амплитуд токов ВГ  $I_n$  от амплитуды тока первой гармоники  $I_1$  на интервалах осреднения 200 мс, 10 мин., 30 мин.  $I_n = f(I_1)$ . Так как зависимости, построенные для канонических гармоник – 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, имеет аналогичный вид, то в качестве примера представлена зависимость  $I_{11} = f(I_1)$  на различных интервалах осреднения (рис. 1).



**Рис. 1. Зависимость  $I_{11}$  от  $I_1$  на интервале осреднения:**  
(а) 200 мс; (б) 10 мин; (в) 30 мин

**Fig. 1. Dependence of  $I_{11}$  on  $I_1$  on the averaging interval:**  
(a) 200 ms; (b) 10 min; (в) 30 min

Для того, чтобы воспроизвести зависимость  $I_n$  от  $I_1$ , полученную на основе экспериментальных данных, без значительного «разброса», т.е. без случайных отклонений от видимой общей закономерности, был применен метод наименьших квадратов. Этот метод дает возможность при заданном

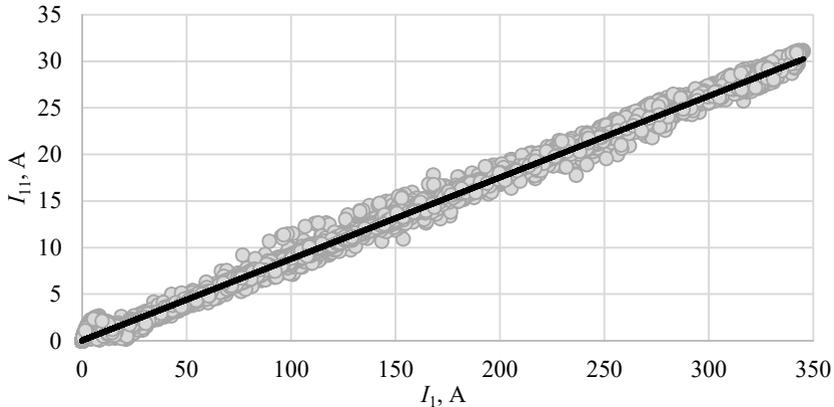
типе зависимости  $I_n = f(I_1)$  так выбрать ее числовые параметры, чтобы кривая  $I_n = f(I_1)$  в известном смысле наилучшим образом отражала экспериментальные данные. Суть данного метода сводится к тому, чтобы сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от сглаживающей кривой оказалась в минимум.

### III. Результаты

В данном исследовании установлено, что зависимость  $I_n = f(I_1)$  на различных интервалах осреднения для 7, 11, 17, 23 гармоник и для интервала осреднения 10 мин. и 30 мин. для 5, 13, 19, 25 гармоник может быть описана линейной функцией, имеющей следующий вид:

$$I_n = a \cdot I_1. \quad (1)$$

В качестве примера представлена зависимость  $I_{11} = f(I_1)$  на интервале осреднения 200 мс, описанная функцией  $I_{11} = 0,0878 \cdot I_1$  (рис. 2).



**Рис. 2.** Линейная аппроксимация зависимости  $I_{11}$  от  $I_1$  на интервале осреднения 200 мс

**Fig. 2.** Linear approximation of the dependence of  $I_{11}$  on  $I_1$  at an averaging interval of 200 ms

Для гармоник 5, 13, 19, 25 зависимость  $I_n = f(I_1)$  на интервале осреднения 200 мс может быть описана кусочной функцией, состоящей из двух прямых:

$$\begin{aligned} I_n &= a \cdot I_1 \pm b \text{ при } I_1 \geq z; \\ I_n &= c \cdot I_1 \text{ при } I_1 < z, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $z$  – значение тока  $I_1$  на пересечении двух прямых линий, А.

В качестве примера представлена зависимость  $I_{25} = f(I_1)$  на интервале осреднения 200 мс, описанная кусочной функцией:  $I_{25} = 0,035 \cdot I_1 - 1,5$ , при  $I_1 \geq 59,9$  и  $I_{25} = 0,01 \cdot I_1$ , при  $I_1 < 59,9$  (рис. 3).

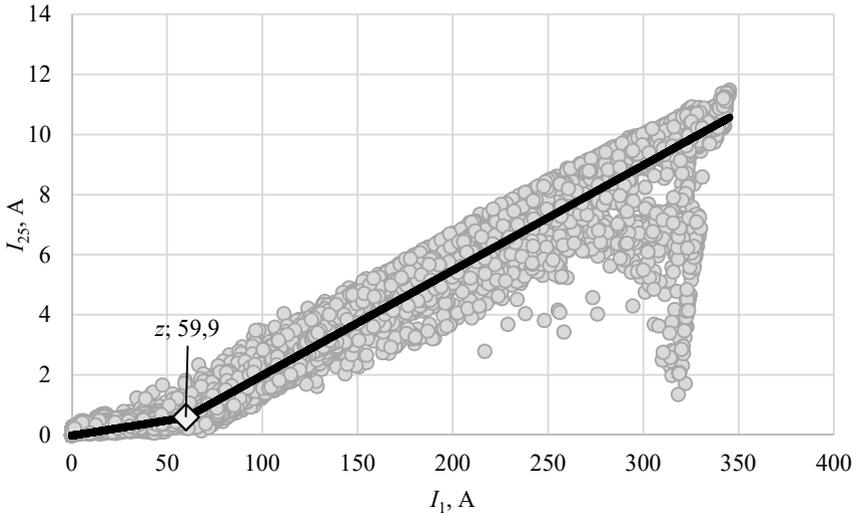


Рис. 3. Аппроксимация зависимости  $I_{25}$  от  $I_1$  на интервале осреднения 200 мс

Fig. 3. Approximation of the dependence of  $I_{25}$  on  $I_1$  at an averaging interval of 200 ms

Аналогично получены зависимости для канонических гармоник – 5, 7, 13, 17, 19, 23.

Для каждой канонической гармоники на различных интервалах осреднения получены коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  для (1), (2) и значение величины  $z$ , которые приведены в табл. 1.

После определения зависимостей был произведен расчет математического ожидания и среднеквадратичного отклонения по каждой гармонике и сравнение полученных значений с экспериментальными, путем расчета погрешности:

$$\Delta = 100 - \frac{\mathcal{E} \cdot 100}{P}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}$  – значение параметра, определенное по результатам эксперимента;  $P$  – значение параметра, рассчитанное по полученным зависимостям с учетом коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $c$ .

Таблица 1.  
Значения  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $z$

Table 1.  
Coefficient values  $a$ ,  $b$ ,  $c$  and  $z$

| Номер гармоники | Коэффициенты $a$ , $b$ и $c$ и величина $z$ на интервале осреднения |      |      |      |        |        |
|-----------------|---|------|------|------|--------|--------|
|                 | 200 мс  |      |      |      | 10 мин | 30 мин |
|                 | $a$   | $b$  | $c$  | $z$  | $a$    | $a$    |
| 5               | 0,2088  | 8,1  | 0,58 | 21,8 | 0,2470 | 0,2470 |
| 7               | 0,0950  |      | –    |      | 0,0950 | 0,0950 |
| 11              | 0,0878  |      | –    |      | 0,0878 | 0,0878 |
| 13              | 0,0700  | -3,0 | 0,03 | 75,0 | 0,0563 | 0,0560 |
| 17              | 0,0537  |      | –    |      | 0,0538 | 0,0537 |
| 19              | 0,0480  | -2,0 | 0,02 | 71,4 | 0,0389 | 0,0387 |
| 23              | 0,0372  |      | –    |      | 0,0372 | 0,0372 |
| 25              | 0,0350  | -1,5 | 0,60 | 59,9 | 0,0289 | 0,0288 |

Погрешность вычисления математического ожидания и среднеквадратичного отклонения ВГ тока по (1) и (2) в основном лежат в пределах от 0,007 до 9,868 %, не превышая во всех случаях 10 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности полученных аналитических выражений для расчета высших гармоник тока, генерируемых выпрямителем ЛС. Таким образом, полученные выражения рекомендуется использовать для расчета несинусоидального режима электрической сети фанерных производств, в которых применяются восьмифутовые лущильные станки с ДПТ и УВ.

#### IV. Заключение

Расчет амплитудного спектра сетевого тока выпрямителя ЛС невозможно выполнить по известным в литературе выражениям из-за отсутствия сведений об углах управления, коммутации, уровне напряжения сети и случайном характере изменения амплитуд ВГ.

На основании выполненных экспериментальных исследований на современном действующем фанерном производстве установлена связь между амплитудами канонических гармоник тока выпрямителя ЛС и амплитудой тока первой гармоники.

Полученные аналитические выражения для определения амплитуд токов канонических гармоник рекомендуется использовать при расчете несинусоидального режима в СЭС фанерного производства и решении инженерных задач таких как: определение загрузки батарей конденсаторов токами ВГ, определении пиковых токов для выбора автоматических выключателей и оценке влияния ВГ на работу других потребителей.

Результаты исследования рекомендуется использовать для восьми-

футовых лущильных станков с ДПТ и УВ. Возможность применения полученных результатов для других станков с другим типом привода требует дополнительных исследований.

© Черепанов В.В., 2024

© Торопова А.К., 2024

*Поступила в редакцию 25.11.2023*

*Принята к публикации 12.12.2023*

*Received 25.11.2023*

*Approved 12.12.2023*

### Библиографический список

- [1] Семенов А.С., Бондарев В.А., Заголило С.А. Контроль качества электроэнергии и анализ полученных результатов при измерении напряжения // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 9 (1). С. 86-92. DOI: 10.17513/fr.41709 2017 9 86
- [2] Dirik H., Duran I.U., Gezegin C. A Computation and Metering Method for Harmonic Emissions of Individual Consumers // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. № 68 (2). P. 412-420. DOI: 10.1109/tim.2018.2843538
- [3] Liu H., Niu J. Study on the influence of nonlinear load on complex power grid structure // *2021 5th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT)*, Oct 29-31, 2021, Haikou, China: IEEE, 2021. P. 455-459. DOI: 10.1109/acait53529.2021.9730888
- [4] Hu Z., Han Y., Zalhaf A.S., Zhou S., Jansen J., Yang P. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview // *Electric Power Systems Research*. 2023. № 218. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234
- [5] Bottura F.B., Oleskovicz M., Le T.D., Petit M. Optimal positioning of power quality meters for monitoring potential conditions of harmonic resonances in a MV distribution system // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2019. № 34 (5). P. 1885-1897. DOI: 10.1109/tpwr.2019.2923365
- [6] Donohue P.M., Islam S. The effect of nonsinusoidal current waveforms on electromechanical and solid-state overcurrent relay operation // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2010. № 46 (6). P. 2127-2133. DOI: 10.1109/tia.2010.2070054
- [7] Ding Y., Lihakanga R., Correia R., Goussetis G., Carvalho N.B. Harmonic suppression in frequency shifted backscatter communications // *IEEE Open Journal of the Communications Society*. 2020. № 1. P. 990-999. DOI: 10.1109/ojcoms.2020.3011520
- [8] Бакшаева Н.С., Вальц И.А. Анализ колебаний напряжения в системах электропитания с потребителями с резкопеременной нагрузкой // *Проблемы региональной энергетики*. 2019. № 3 (44). С. 1-16. DOI: 10.5281/zenodo.3562179
- [9] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электропитания общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

- [10] Вендин С.В., Килин С.В., Соловьев С.В. Оценка эффективности мероприятий по снижению несимметрии и несинусоидальности в распределительных сетях 0,4-10 кВ // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2018. № 2 (18). С. 3-19.
- [11] Самохин В.И., Самохин Д.В., Сухоставский И.В., Бабкин Е.Е. Основные направления энергосбережения на предприятиях и оборудование, используемое для энергосбережения // Электронные информационные системы. 2020. № 1 (24). С. 63-76.

### References

- [1] A.S. Semenov, V.A. Bondarev and S.A. Zagolilo, "Quality control of electricity and analysis the obtained results in measuring voltage", *Fundamental research*. vol. 9, no. 1, pp. 86-92, Sep. 2017. DOI: 10.17513/fr.41709 2017 9 86
- [2] H. Dirik, İ.U. Duran and C. Gezeğin, "A Computation and Metering Method for Harmonic Emissions of Individual Consumers", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 2, pp. 412-420, Jun. 2018. DOI: 10.1109/tim.2018.2843538
- [3] H. Liu and J. Niu, "Study on the influence of nonlinear load on complex power grid structure", in proc. *2021 5th Asian Conference on Artificial Intelligence Technology (ACAIT)*, Oct 29-31, 2021, Haikou, China, pp. 455-459. DOI: 10.1109/acait53529.2021.9730888
- [4] Z. Hu, Y. Han, A.S. Zalhaf, S. Zhou, J. Jonsen and P. Yang, "Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview", *Electric Power Systems Research*, vol. 218, May 2023. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234
- [5] F.B. Bottura, M. Oleskovicz, T.D. Le and M. Petit, "Optimal positioning of power quality meters for monitoring potential conditions of harmonic resonances in a MV distribution system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 5, pp. 1885-1897, Oct. 2019. DOI: 10.1109/tpwr.2019.2923365
- [6] P.M. Donohue and S. Islam, "The effect of nonsinusoidal current waveforms on electromechanical and solid-state overcurrent relay operation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 6, pp. 2127-2133, Nov.-Dec. 2010. DOI: 10.1109/tia.2010.2070054
- [7] Y. Ding, R. Lihakanga, R. Correia, G. Goussetis and N.B. Carvalho, "Harmonic suppression in frequency shifted backscatter communications", *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 990-999, Jul. 2020. DOI: 10.1109/ojcoms.2020.3011520
- [8] N.S. Bakshaeva, and I.A. Walz, "Analysis of voltage fluctuations in power supply systems with consumers with the rapidly changing load", *Problems of the Regional Energetics*, vol. 44, no. 3, pp. 1-16, 2019. DOI: 10.5281/zenodo.3562179
- [9] Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems, GOST 32144-2013, July 2014.
- [10] S.V. Vendin, S.V. Kilin and S.V. Solovev, "Evaluation of efficiency of measures to reduce nonmmetry and noninusuality in distribution networks 0,4-10 kv", *Innovations in Agricultural Complex: problems and perspectives*, vol. 18, no. 2, pp. 3-19, 2018.

- [11] V.I. Samokhin, D.V. Samokhin, I.V. Sukhostavskiy and Ye.Ye. Babkin, “Main areas of power saving at enterprises and equipment utilized for power saving”, *Electronic information systems*, vol. 24, no. 1, pp. 63-76, 2020.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Черепанов Вячеслав Васильевич**, доктор технических наук, профессор Вятского государственного университета, г. Киров, Российская Федерация.

**Торопова Анна Константиновна**, аспирант, старший преподаватель Вятского государственного университета, г. Киров, Российская Федерация.

**Vyacheslav V. Cherepanov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Vyatka State University, Kirov, Russian Federation.

**Anna K. Toropova**, postgraduate student, senior lecturer of the Vyatka State University, Kirov, Russian Federation.