

# ТРЕХУРОВНЕВЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ИНВЕРТОР С СИНУСОИДАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ В СИСТЕМЕ АВТОНОМНОГО ПИТАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С. В. Мятеж<sup>1</sup>, П. С. Лисицын<sup>1</sup>, Д. П. Кравченко<sup>1</sup>, Б. В. Малоземов<sup>1</sup>, А. А. Чернов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,  
Россия, e-mail: myatezh@corp.nstu.ru

**Аннотация:** Работа посвящена вопросам совершенствования автономного инвертора, формирующего трехфазную систему напряжений, гармонический состав которых полностью удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к качеству электрической энергии для сетей 0,4 кВ. Минимизация коэффициентов гармоник выходных напряжений решается в два этапа: в рамках оптимизационной задачи, предусматривающей поиск оптимальных форм питающих напряжений и токов для равномерной загрузки секций обмоток трансформаторов, и в рамках задачи рационального подбора пассивных синус-фильтров. Это в комплексе позволило получить инвертор трехфазного переменного тока с практически синусоидальными напряжениями, что может служить основой для создания систем автономного и резервного питания удаленных и ответственных потребителей электрической энергии, которые относятся к промышленной инфраструктуре горных выработок, шахт и рудников. Исследована возможность плавной регулировки уровней напряжений на выходе инвертора в пределах  $\pm 6\%$ , что может быть полезным при коррекции режимов работы системы электроснабжения. Для подтверждения достоверности полученных результатов построена и испытана физическая модель рассматриваемого автономного трехфазного инвертора. Результаты экспериментов подтверждают правильность изложенных теоретических положений и свидетельствуют о практической достижимости получения трехфазных систем напряжений с суммарным коэффициентом гармонических составляющих порядка 4,87%, что в 1,64 раза ниже порогового показателя в 8%, установленного в нормах на качество электрической энергии.

**Ключевые слова:** инвертор, уровень, трехфазная система, напряжение, гармоника, амплитуда, модифицированный синус, магнитный поток, модуляция, фильтрация.

**Для цитирования:** Мятеж С. В., Лисицын П. С., Кравченко Д. П., Малоземов Б. В., Чернов А. А. Трехуровневый трехфазный инвертор с синусоидальным напряжением в системе автономного питания ответственных электроприемников предприятий горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 11-1. – С. 201–221. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_111\_0\_201.

---

## Three-level three-phase inverter with sineusidal voltage in the autonomous power system of critical electric receivers of mining industry enterprises

S.V. Myatezh<sup>1</sup>, P.S. Lisitsyn<sup>1</sup>, D.P. Kravchenko<sup>1</sup>, B.V. Malozyomov<sup>1</sup>, A.A. Chernov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

---

**Abstract:** The work pays attention to the issues of improving an autonomous inverter that forms a three-phase voltage system, the harmonic composition of which fully satisfies modern requirements for the quality of electrical energy for 0.4 kV networks. Such an inverter, built on the basis of transformer technology and operating at an industrial network frequency of 50 Hz without the use of high-frequency pulse-width modulation, does not create powerful electromagnetic interference and does not contribute to accelerated wear of the insulation of the connected equipment. Minimization of harmonic coefficients of output voltages is solved in two stages: within the framework of the optimization problem, which involves searching for optimal forms of supply voltages and currents for uniform loading of transformer winding sections, and within the framework of the problem of rational selection of passive sine filters. This together made it possible to obtain a three-phase alternating current inverter with almost sinusoidal voltages, which can serve as the basis for creating autonomous and backup power systems for remote and critical consumers of electrical energy, which belong to the industrial infrastructure of mines, mines and pits. The possibility of smooth adjustment of voltage levels at the inverter output within  $\pm 6\%$  has been studied, which can be useful in correcting the operating modes of the power supply system. To confirm the reliability of the results obtained, a physical model of the autonomous three-phase inverter under consideration was built and tested. The experimental results confirm the correctness of the stated theoretical principles and indicate the practical achievability of obtaining three-phase voltage systems with a total coefficient of harmonic components of the order of 4.87%, which is 1.64 times lower than the threshold of 8% established in the standards for the quality of electrical energy.

**Key words:** inverter, level, three-phase system, voltage, harmonic, amplitude, modified sine, magnetic flux, modulation, filtering.

**For citation:** Myatezh S. V., Lisitsyn P. S., Kravchenko D. P., Malozyomov B. V., Chernov A. A. Three-level three-phase inverter with sineusidal voltage in the autonomous power system of critical electric receivers of mining industry enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(11-1):201–221. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_111\_0\_201.

---

### 1. Введение

Надежная и бесперебойная система электроснабжения удаленных и ответственных потребителей, которые относятся к промышленной инфраструктуре горных выработок, шахт и рудников, требует наличия системы резервного автономного питания [1]. Такие системы могут быть построены на базе трехфазных автономных инверторов, работающих от накопителей электрической энергии постоянного тока, например, от современных аккумуля-

муляторных батарей большой ёмкости. В этом случае напряжение на выходе трехфазных автономных инверторов должно иметь практически синусоидальную форму в соответствии с требованиями к качеству электрической энергии [ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014].

Алгоритмы широтно-импульсной модуляции (ШИМ), которые получили широкое распространение с развитием силовых полупроводниковых приборов (СПП), способны в электрических цепях нагрузки с индуктивным характером создать токи практически синусоидальной формы. Однако напряжения в цепях потребителей переменного тока при этом оказываются далеки от синусоидальной формы и представляют собой прямоугольные высокочастотные импульсы с большой амплитудой и богатым спектром высших гармоник. Для крупных потребителей переменного тока это порождает серьезные проблемы, связанные не только с ухудшением электромагнитной совместимости и дополнительными потерями, но и с ускоренным износом изоляции дорогостоящих электрических машин и трансформаторов [2–4].

Для приближения к синусоидальной форме выходного напряжения переменного тока трехфазный автономный инвертор должен располагать разными уровнями напряжений постоянного тока, из которых теоретически несложно создать ступенчатую кривую. Так устроены многоуровневые инверторы, формирующие модифицированный синус в кривой напряжения переменного тока. Как правило, разные уровни напряжений в таких инверторах получены за счет цепочек последовательно соединенных конденсаторов, работающих как ёмкостные делители напряжения [5–8]. Эти решения приводят к ряду недостатков: проблема балансировки напряжений на конденсаторах при работе с динамичной нагрузкой, сложные алгоритмы ШИМ, ограничения по режимным параметрам и массогабаритным показателям, особенно существенные для инверторов большой мощности [9, 10].

Поэтому для получения разных уровней напряжений целесообразен переход к амплитудной модуляции, реализованной в многообмоточных трансформаторах. При амплитудной модуляции требуемые уровни напряжений могут быть получены как путем сложения магнитных потоков, протекающих по разветвленным ветвям магнитопроводов силовых трансформаторов, так и путем сложения напряжений, наведенных в отдельных обмотках силовых трансформаторов.

Дальнейшее развитие и совершенствование трехфазных автономных инверторов предполагает решение важных с практической точки зрения задач, связанных с необходимостью регулирования уровней напряжений переменного тока без использования ШИМ и фильтрации высших гармоник в этих напряжениях. Решение указанных задач позволит создать полноценную систему бесперебойного питания на стороне понизительных подстанций для ответственных потребителей переменного тока предприятий горной промышленности.

## **2. Метод амплитудной модуляции магнитных потоков для создания трехуровневого автономного инвертора**

Многообмоточные трансформаторы в автономных инверторах могут быть использованы не только как необходимая гальваническая развязка при объединении систем постоянного и переменного тока, но и как средство для создания режима амплитудной модуляции.

На рис. 1, а приведена упрощенная схема трехуровневого инвертора [11] на базе трехстержневого трансформатора с первичными обмотками  $W_{1A}$ ,  $W_{1B}$  и вторичной обмоткой  $W_2$ , создающей в кривой напряжения  $u_2(t)$  моди-

фицированный синус для одной фазы. Питается данный инвертор от источника напряжения  $E$  постоянного тока. Первичная обмотка  $W_{1A}$  подключена к мостовому инвертору, построенному на базе ключей  $S_1 - S_4$ , которые формируют напряжение  $u_A(t)$ . Первичная обмотка  $W_{1B}$  подключена к мостовому инвертору, построенному на базе ключей  $S_5 - S_8$ , которые формируют напряжение  $u_B(t)$ . В среднем стержне происходит суммирование магнитных потоков  $\Phi_A + \Phi_B$ , которые созданы обмотками  $W_{1A}$ ,  $W_{1B}$ , размещенными на крайних стержнях. В результате напряжение  $u_2(t)$  на выходе инвертора приобретает ступенчатую форму, как это показано на рис. 1, б.

Уровень высших гармоник в кривой напряжения характеризуется показателем  $K_{ГУ}$ , который определен как отношение среднеквадратичного значения суммы высших гармоник (кроме первой) к значению первой гармоники:

$$K_{ГУ} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}, \quad (1)$$

где  $U_1$  — действующее значение первой гармоники напряжения,  $U_k$  — действующие значения высших гармоник напряжения с порядковыми номерами  $k$ .

Для того чтобы минимизировать уровень высших гармоник в кривой напряжения  $u_2(t)$ , необходимо отыскать оптимальное соотношение длительностей имеющихся в этой кривой ступеней. На рис. 2 показана кривая  $u_2(t)$ , в которой длительности ступеней можно определять через соотношения  $T_1/T_3$ ,  $T_2/T_3$ ,  $T_4/T_3$ ,  $T_5/T_3$ .

С учетом обозначений на рис. 2 и сохранения симметрии относительно временной оси  $0t$  для исключения гармоник с четными номерами, кривая  $u_2(t)$  будет определена двумя независимыми переменными  $t_1$  и  $t_2$ .

В этом случае действующее значение первой гармоники  $U_1$  кривой напряжения  $u_2(t)$  на рис. 2 определится

$$U_1 = \frac{2}{T} \int_0^T u_2(t) \cos(\omega t) dt = \frac{8}{\sqrt{2}T} \left( \int_0^{t_1} 2E \cos(\omega t) dt + \int_{t_1}^{t_2} E \cos(\omega t) dt \right) = \frac{4\sqrt{2}E(\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2))}{\omega T}$$

(2)

Действующее значение кривой напряжения  $u_2(t)$  на рис. 2

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_2(t))^2 dt} = \sqrt{\frac{4}{T} \left( \int_0^{t_1} (2E)^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} (E)^2 dt \right)} = 2E \sqrt{\frac{3t_1 + t_2}{T}}. \quad (3)$$

Отсюда действующее значение высших гармоник напряжений

$$U_{\Sigma k} = \sqrt{U^2 - U_1^2} = 2E \sqrt{\frac{3t_1 + t_2}{T} - \left( \frac{2\sqrt{2}}{\omega T} (\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2)) \right)^2}. \quad (4)$$

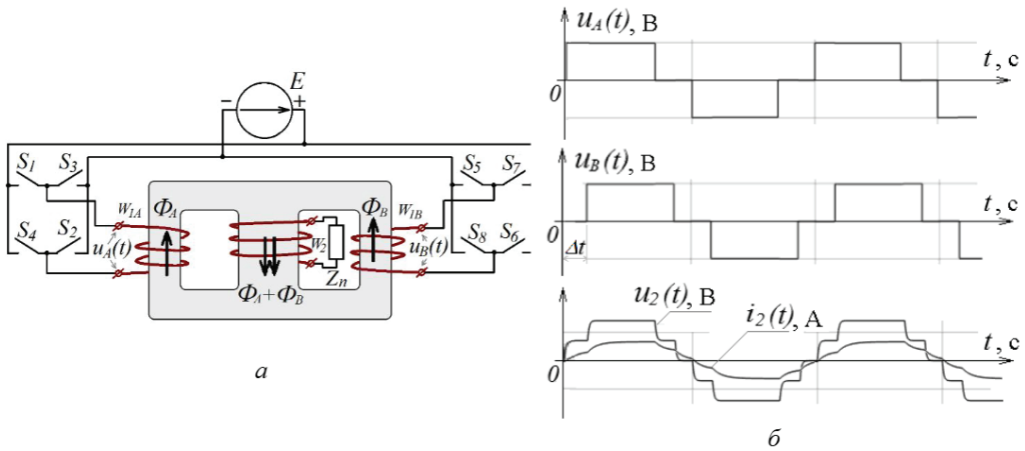


Рис. 1. Трехуровневый автономный инвертор с амплитудной модуляцией магнитных потоков: а – принципиальная схема на основе трехстержневого трансформатора; б – кривые напряжений и тока нагрузки

Fig. 1. Three-level autonomous inverter with amplitude modulation of magnetic fluxes: a – circuit diagram based on a three-rod transformer; b – voltage and current load curves

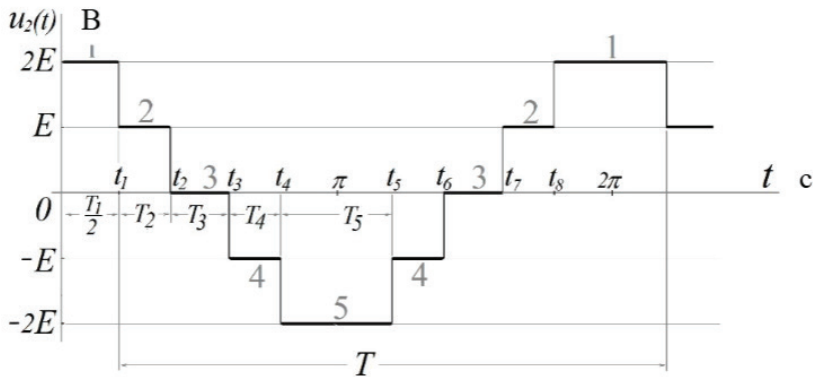


Рис. 2. Пятиступенчатая кривая напряжения  $u_2(t)$  для одной фазы трехуровневого автономного инвертора

Fig. 2. Five-stage voltage curve for one phase of a three-level off-grid inverter

Таким образом, для трехуровневого автономного инвертора, построенного по схеме на рис. 1, а, величина  $K_{\Gamma U}$  для кривой  $u_2(t)$  определяется как

$$K_{\Gamma U} = \frac{\sqrt{\frac{3t_1 + t_2}{T} - \left( \frac{2\sqrt{2}}{\omega T} (\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2)) \right)^2}}{\frac{2\sqrt{2}}{\omega T} (\sin(\omega t_1) + \sin(\omega t_2))}. \quad (5)$$

Оптимизационная задача минимизации высших гармоник напряжения, кроме целевой функции  $K_{\Gamma U} \rightarrow \min$ , в соответствии с рис. 2 строится с учетом ограничений

$$\begin{aligned} 0 \leq t_1 \leq \pi/2, \\ t_1 \leq t_2. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} T_1/T_3 = T_5/T_3 \approx 3,748, \\ T_2/T_3 = T_4/T_3 \approx 1,128 \end{aligned} \quad (8)$$

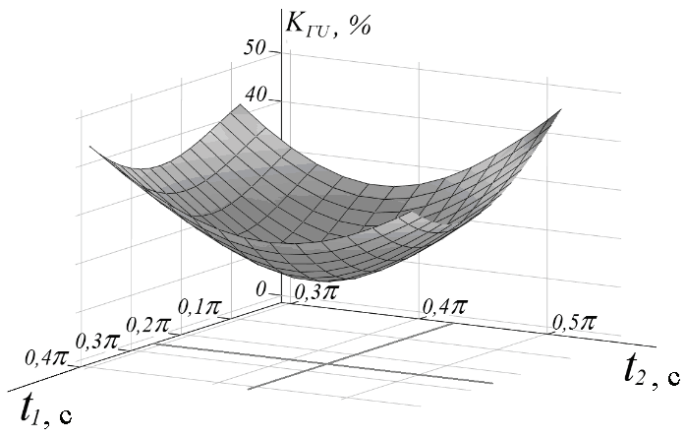
Решение дает оптимальные моменты времени

$$t_1 \approx 0,2676\pi \text{ и } t_2 \approx 0,4286\pi \quad (7)$$

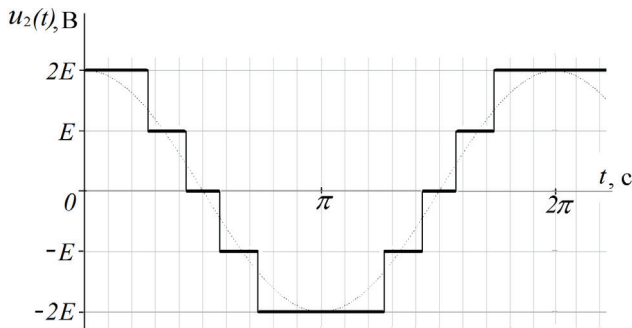
как координаты оптимальной точки функции  $K_{ГУ}(t_1, t_2)$  в трехмерном пространстве (рис. 3, а), определяющие оптимальные соотношения длительностей ступеней.

для кривой  $u_2(t)$ , построенной на рис. 3, б, с оптимальными соотношениями ступеней.

Для того чтобы обмотка  $W_2$  под действием совокупности магнитных потоков  $\Phi_A + \Phi_B$  индуцировала трехуровневую кривую  $u_2(t)$  с частотой  $f = 50\text{Гц}$ , как на рис. 3, б, на обмотках  $W_{1A}$  и  $W_{1B}$  при помощи ключей  $S_1 - S_8$



а



б

Рис. 3. Решение оптимизационной задачи для трехуровневого автономного инвертора: а – функция  $K_{ГУ}(t_1, t_2)$ ; б – пятиступенчатая кривая выходного напряжения, максимально приближенная к синусоиде

Fig. 3. Solution of the optimization problem for a three-level autonomous inverter: а – function; б – five-step output voltage curve, as close as possible to a sinusoid

необходимо создать напряжения  $u_A(t)$  и  $u_B(t)$ , как на рис. 1, б, и обеспечить между ними взаимный сдвиг  $\Delta t \approx 0,00161$  с.

### 3. Практическая реализация автономного трехфазного инвертора как результат использования метода амплитудной модуляции магнитных потоков

Объединение трех базовых схемных решений на рис. 1, а в единую систему

позволяет получить полноценный трехуровневый трехфазный инвертор (рис. 4), формирующий трехфазную систему напряжений  $u_{2A}(t)$ ,  $u_{2B}(t)$ ,  $u_{2C}(t)$  с модифицированным синусом без применения ШИМ. Соединение вторичных обмоток  $W_A$ ,  $W_B$ ,  $W_C$  в треугольник исключает образование в трехфазной системе гармоник напряжений, кратных трем. На вход данного инвертора поступает электрическая энергия от источника напряжения  $E$  постоянного тока, а к выходу инвертора

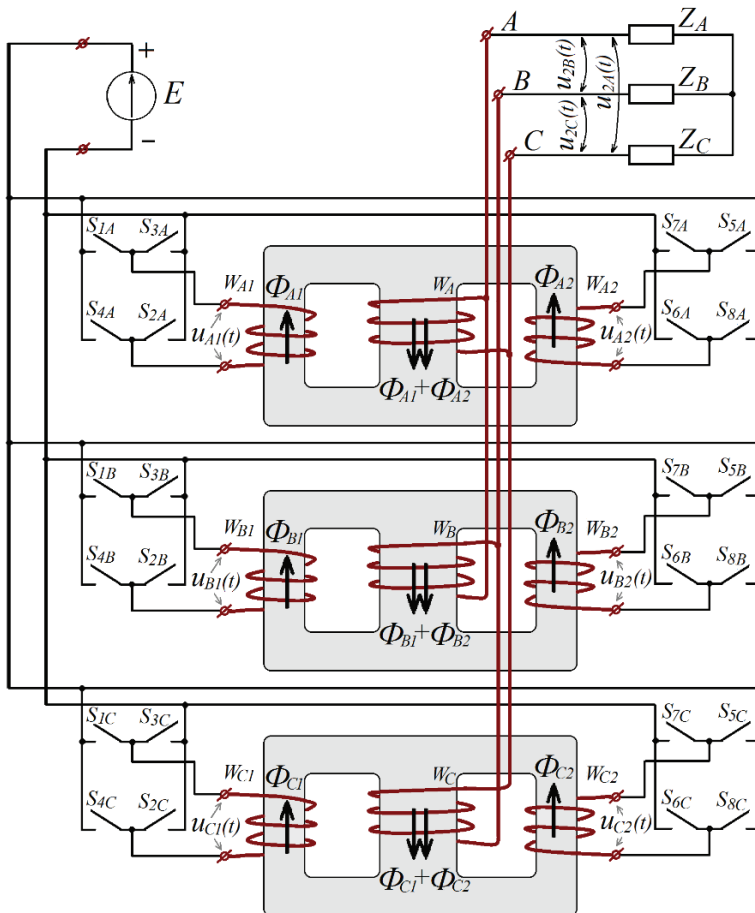


Рис. 4. Принципиальная схема автономного трехуровневого трехфазного инвертора с амплитудной модуляцией магнитных потоков

Fig. 4. Schematic diagram of an autonomous three-level three-phase inverter with amplitude modulation of magnetic fluxes

подключены потребители трехфазного переменного тока в виде обобщенной нагрузки  $Z_A, Z_B, Z_C$ .

Фазовые сдвиги в трехфазной системе напряжений  $u_{2A}(t), u_{2B}(t), u_{2C}(t)$  должны быть реализованы за счет фазовых задержек на величину  $2\pi/3$  при реализации временных диаграмм коммутации ключей  $S_{1B}-S_{4B}$

относительно  $S_{1A}-S_{4A}$  и коммутации ключей  $S_{5B}-S_{8B}$  относительно  $S_{5A}-S_{8A}$  (рис. 5, а и б). Аналогичную задержку на величину  $4\pi/3$  необходимо выдержать при реализации временных диаграмм коммутации ключей  $S_{1C}-S_{4C}$  относительно  $S_{1A}-S_{4A}$  и коммутации ключей  $S_{5C}-S_{8C}$  относительно  $S_{5A}-S_{8A}$  (рис. 5, а и в) [12].

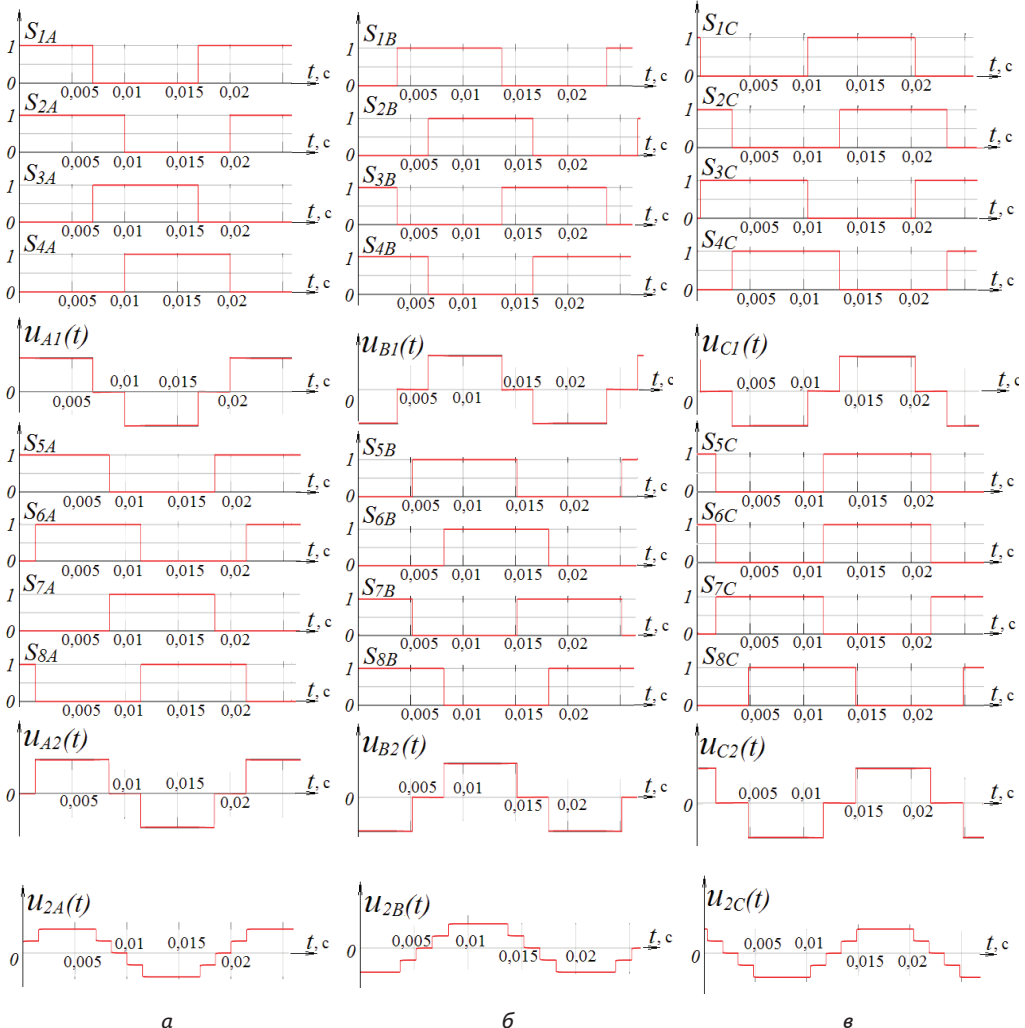


Рис. 5. Временные диаграммы коммутации ключей, обеспечивающие формирование симметричной трехфазной системы напряжений и равномерную загрузку первичных обмоток трансформаторов трехуровневого трехфазного инвертора

Fig. 5. Timing diagrams of switching switches, ensuring the formation of a symmetrical three-phase voltage system and uniform loading of the primary windings of transformers of a three-level three-phase inverter

В результате этого обеспечивается равномерная загрузка всех первичных обмоток трансформаторов и формируется симметричная трехфазная система напряжений  $u_{2A}(t)$ ,  $u_{2B}(t)$ ,  $u_{2C}(t)$  без гармоник, кратных трем. Интервалы времени определены таким образом, чтобы частота переменного тока данного инвертора соответствовала частоте промышленной сети  $f = 50$  Гц.

Для управления режимами работы в системе электроснабжения удаленных и ответственных потребителей, где в качестве источника резервного питания установлен трехуровневый трехфазный инвертор, необходимо предусмотреть средства регулирования уровней напряжений трехфазного переменного тока [13].

Ступенчатую регулировку уровней этих напряжений можно получить, предусмотрев отпайки для переключения рабочих секций в обмотках  $W_A$ ,  $W_B$ ,  $W_C$  (рис. 4), как это реализовано в обычных силовых трансформаторах [14, 15].

Плавную регулировку уровней напряжений может обеспечить сам трехуровневый трехфазный инвертор за счет небольшого сдвига значений переменных  $t_1$  и  $t_2$  относительно их оптимальных величин (7).

Мгновенные значения напряжений вторичных обмоток, зависящие от переменных  $t_1$  и  $t_2$ , можно задать в общем случае аналитически в виде систем, предусмотрев в них общий угол произвольного сдвига  $\phi$  для всех фаз:

$$u_{2A}(t) = \begin{cases} -2E, & \text{при } \pi - t_1 + \phi < t \leq -\pi + t_1 + \phi \\ -E, & \text{при } -\pi + t_1 + \phi < t \leq -\pi + t_2 + \phi \\ 0, & \text{при } -\pi + t_2 + \phi < t \leq -t_2 + \phi \\ E, & \text{при } -t_2 + \phi < t \leq -t_1 + \phi \\ 2E, & \text{при } -t_1 + \phi < t \leq t_1 + \phi \\ E, & \text{при } t_1 + \phi < t \leq t_2 + \phi \\ 0, & \text{при } t_2 + \phi < t \leq \pi - t_2 + \phi \\ -E, & \text{при } \pi - t_2 + \phi < t \leq \pi - t_1 + \phi \\ -2E, & \text{при } \pi - t_1 + \phi < t \leq \pi + t_1 + \phi \end{cases} \quad (9)$$

$$u_{2B}(t) = \begin{cases} E, & \text{при } -4\pi/3 + t_1 + \phi < t \leq -4\pi/3 + t_2 + \phi \\ 0, & \text{при } -4\pi/3 + t_2 + \phi < t \leq -\pi/3 - t_2 + \phi \\ -E, & \text{при } -\pi/3 - t_2 + \phi < t \leq -\pi/3 - t_1 + \phi \\ -2E, & \text{при } -\pi/3 - t_1 + \phi < t \leq -\pi/3 + t_1 + \phi \\ -E, & \text{при } -\pi/3 + t_1 + \phi < t \leq -\pi/3 + t_2 + \phi \\ 0, & \text{при } -\pi/3 + t_2 + \phi < t \leq 2\pi/3 - t_2 + \phi \\ E, & \text{при } 2\pi/3 - t_2 + \phi < t \leq 2\pi/3 - t_1 + \phi \\ 2E, & \text{при } 2\pi/3 - t_1 + \phi < t \leq 2\pi/3 + t_1 + \phi \\ E, & \text{при } 2\pi/3 + t_1 + \phi < t \leq 2\pi/3 + t_2 + \phi \end{cases} \quad (10)$$

$$u_{2C}(t) = \begin{cases} E, & \text{при } -2\pi/3 - t_2 + \phi < t \leq -2\pi/3 - t_1 + \phi \\ 2E, & \text{при } -2\pi/3 - t_1 + \phi < t \leq -2\pi/3 + t_1 + \phi \\ E, & \text{при } -2\pi/3 + t_1 + \phi < t \leq -2\pi/3 + t_2 + \phi \\ 0, & \text{при } -2\pi/3 + t_2 + \phi < t \leq \pi/3 - t_2 + \phi \\ -E, & \text{при } \pi/3 - t_2 + \phi < t \leq \pi/3 - t_1 + \phi \\ -2E, & \text{при } \pi/3 - t_1 + \phi < t \leq \pi/3 + t_1 + \phi \\ -E, & \text{при } \pi/3 + t_1 + \phi < t \leq \pi/3 + t_2 + \phi \\ 0, & \text{при } \pi/3 + t_2 + \phi < t \leq 4\pi/3 - t_2 + \phi \\ E, & \text{при } 4\pi/3 - t_2 + \phi < t \leq 4\pi/3 - t_1 + \phi \end{cases} \quad (11)$$

Однако изменять формы напряжений  $u_{2A}(t)$ ,  $u_{2B}(t)$ ,  $u_{2C}(t)$  при помощи переменных  $t_1$  и  $t_2$  можно только таким образом, чтобы при соединении соответствующих обмоток  $W_A$ ,  $W_B$ ,  $W_C$  в треугольник не возникало уравнительных токов. Иными словами, в процессе регулирования уровней напряжений необходимо всегда выдерживать дополнительное условие

$$u_{2A}(t) + u_{2B}(t) + u_{2C}(t) = 0. \quad (12)$$

Совместное решение выражений (9) – (12) с учетом существующих ограничений (6) дает зависимость  $t_2 = f(t_1)$  (рис. 6, а), где переменные  $t_1$  и  $t_2$  заданы в радианах, а точка  $K$  характеризует оптимальную координату, для которой  $K_{\Gamma U}(t_1, t_2) \rightarrow \min$  по выражению (7).

Кроме того, необходимо также выяснить, в каких пределах будет изменяться  $K_{\Gamma U}(t_1, t_2)$  относительно своего оптимального значения при изменении переменных  $t_1$  и  $t_2$ . Используя выражение (5), определяем характер изменения  $K_{\Gamma U}(t_1, t_2)$  в виде поверхности (рис. 6, б) и в табличном виде (таблица) при соблюдении перечисленных выше дополнительных условий.

Отсюда следует, что величина  $K_{\Gamma U}(t_1, t_2)$  относительно своего минимального значения 0,162 будет возрастать менее чем на 35%, если на рис. 6,

а переменные изменять в пределах от  $t_1 = 0,62$ ,  $t_2 = 1,51$  (точка  $K_1$ ) до  $t_1 = 1,05$ ,  $t_2 = 1,15$  (точка  $K_2$ ).

Изменение уровней выходных напряжений инвертора при этом можно оценить действующими значениями по выражению (3). Для точки  $K_1$  получаем  $U \approx 1,46E$ , для точки  $K_2$  соответственно  $U \approx 1,65E$ , а для исходной точки  $K$  действующее значение составит  $U \approx 1,55E$ . Таким образом, изменением переменных  $t_1$  и  $t_2$  в пределах отрезка  $K_1 - K_2$  (рис. 6, а) можно плавно регулировать величину действующего напряжения на выходе инвертора в пределах  $U \approx 1,55E \pm 6\%$ .

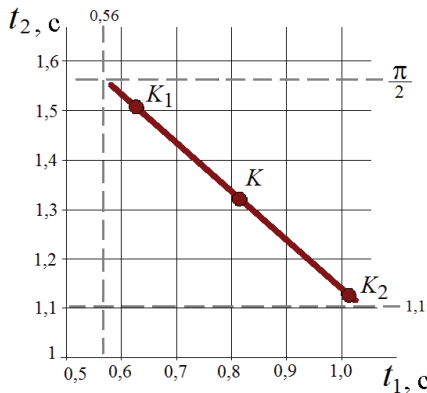
Дальнейшее уменьшение величины  $K_{\Gamma U}$  данного инвертора можно получить как за счет повышения количества его уровней, так и путем применения дополнительной фильтрации.

Эффективность применения дополнительной фильтрации определяется на примере простых пассивных синус-фильтров [16, 17], представляющих Г-образные однозвенные соединения реактивных элементов ЛС (рис. 7, а), где катушка индуктивности представлена элементом  $L_{\square}$ , конденсатор – элементом  $C_{\square}$ , а  $R_{\square}$  характеризует суммарное активное сопротивление цепей переменного тока инвертора.

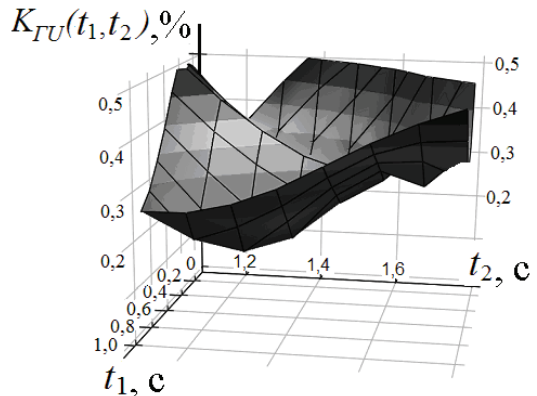
Фильтры, собранные по схеме на рис. 7, а, будут эффективны, если

**Зависимости  $K_{ГУ}(t_1, t_2)$  при соблюдении условий (9) – (12)**  
**Dependencies  $K_{ГУ}(t_1, t_2)$  if conditions (9) – (12) are met**

$K_{ГУ}(t_1, t_2)$ 1,1		$t_2$							
		1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	
$t_1$	0,1	0,368	0,35	0,448	0,534	0,624	0,727	0,9	1,127
	0,2	0,451	0,339	0,344	0,44	0,517	0,63	0,792	0,996
	0,3	0,49	0,396	0,323	0,334	0,432	0,539	0,698	0,885
	0,4	0,506	0,424	0,353	0,294	0,333	0,445	0,611	0,79
	0,5	0,515	0,438	0,375	0,326	0,297	0,352	0,529	0,706
	0,6	0,46	0,381	0,316	0,264	0,221	0,294	0,374	0,555
	0,7	0,394	0,309	0,233	0,177	0,271	0,325	0,297	0,377
	0,8	0,338	0,245	0,162	0,226	0,3	0,353	0,359	0,325
	0,9	0,29	0,195	0,225	0,272	0,332	0,381	0,408	0,414
	1,0	0,262	0,263	0,284	0,318	0,365	0,413	0,453	0,484



а



б

Рис. 6. Зависимости с учетом принятых ограничений: а – зависимость  $t_2 = f(t_1)$ , б – зависимость  $K_{ГУ}(t_1, t_2)$  при соблюдении условий (9)–(12)

Fig. 6. Dependencies taking into account accepted restrictions: а – dependence,  $t_2 = f(t_1)$ , б –  $K_{ГУ}(t_1, t_2)$  dependence subject to conditions (9)–(12)

инвертор использует ШИМ, частота которой значительно выше частоты  $f_1$  первой (основной) гармоники выходного напряжения  $u_2(t)$  инвертора. В этом случае образуется достаточно широкая промежуточная область частот между основной гармоникой и областью высших гармоник, в которой нетрудно расположить частоты собственных резонансов  $f_p$  синус-фильтров.

Если инвертор не использует ШИМ, то между основной гармоникой и областью высших гармоник кривой  $u_2(t)$  в частотном спектре не будет достаточного зазора, где можно предусмотреть частоту  $f_p$  синус-фильтра без опасений вызвать нежелательное увеличение (резонанс) амплитуд части высших гармоник с младшими номерами [17].

Поэтому частоту  $f_p$  необходимо вынести за пределы области распреде-

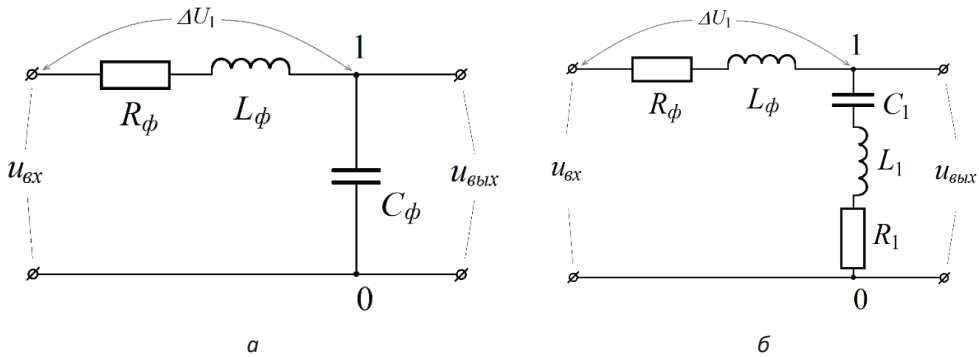


Рис. 7. Схемы пассивных фильтров высших гармоник, подключаемых на выходе к каждой фазе автономного инвертора: а – Г-образный фильтр на элементах LC; б – фильтр с последовательным резонансным контуром

Fig. 7. Circuits of passive filters of higher harmonics connected at the output to each phase of an autonomous inverter: a – L-shaped filter on LC elements; b – filter with a series resonant circuit

ления высших гармоник, выдержав для этого простое условие

$$f_p < f_1. \quad (13)$$

Однако это условие для обычного Г-образного LC-фильтра практически трудно выполнить, не ухудшив его характеристики. На практике рекомендуется, чтобы падение напряжения  $\Delta U_1$  первой гармоники на продольной ветви фильтра не превышало 5–10% от номинального значения [18]. Ёмкость  $C_\phi$  при этом выбирается из расчета компенсации существенной части реактивной мощности  $Q_n$  (приблизительно 80–95%), подключаемой к инвертору нагрузки  $S_n$ .

Приняв для типовой нагрузки  $\cos \phi \approx 0.8$  и необходимость компенсации 80% всей  $Q_n$ , получаем

$$C_\phi \approx 0,8 \frac{S_n \sin \phi}{U^2 2\pi f_1}. \quad (14)$$

Считая  $R_\phi \rightarrow 0$ , определяем падение напряжения  $\Delta U_1 = \frac{S_n}{U} 2\pi f_1 L_\phi$ , причем  $\Delta U_1 \approx 0,1U$ . Отсюда

$$L_\phi \leq \frac{0,1U^2}{S_n 2\pi f_1}. \quad (15)$$

Поскольку  $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_\phi C_\phi}}$ , то из (14)

и (15) получаем, что

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{0,1U^2 \cdot 0,8 \frac{S_n \sin \phi}{U^2 2\pi f_1}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{0,08 \cdot 0,6}{4\pi^2 f_1^2}}} \approx 5f_1. \quad (16)$$

Таким образом, условие (16) для такого фильтра противоречит условию (13).

Чтобы Г-образный LC-фильтр, не проявляя резонанса, подавлял все высшие гармоники, формально требуется сохранить условие (13) и, допустив перекомпенсацию  $Q_n$ , проигнорировать условие (14), увеличив  $C_\phi$  в несколько раз. Однако это неизбежно вызовет значительные реактивные токи, нежелательные для работы автономного инвертора.

В этом случае целесообразно рассмотреть варианты использования фильтров более высоких порядков, отдав предпочтение таким топологиям

соединения элементов LC, для которых  $f_p$  в меньшей степени зависит от параметров  $S_n$ , как, например, у пассивных фильтров с последовательным резонансным контуром [18, 19], возможная схема которого изображена на рис. 7, б.

Для фильтра по схеме на рис. 7, б также должно соблюдаться условие (15), определяющее  $L_\phi$ . При этом параметры последовательного резонансного контура  $L_1$ ,  $C_1$  следует настроить на область подавления частот высших гармоник с младшими порядковыми номерами. Кроме того, в цепи  $R_\square - L_\square - C_1 - L_1 - R_1$  этого фильтра не должен возникнуть резонанс напряжений при протекании тока основной гармоники  $f_1$ . Это определяют выражения

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = f_{3-5} = (3...5)f_1,$$

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{(L_\phi + L_1)C_1}} \geq f_1, \quad (17)$$

где  $f_{3-5}$  – усредненная частота настраиваемого диапазона на подавление высших гармоник с младшими порядковыми номерами  $k = 3...5$ . Демпфирующее сопротивление  $R_1$  в резонансном контуре  $C_1 - L_1$  предназначено для корректировки желаемой добротности этого контура.

Принимая во внимание, что вторичные обмотки каждой фазы автономного инвертора (см. рис. 4) располагаются отдельно от первичных обмоток, на практике они будут обладать повышенными сопротивлениями рассеяния [20]. Поэтому их целесообразно использовать как заменитель элемента  $L_\phi$  на схеме на рис. 7, б. В этом случае синус-фильтр внешне будет представлен только простыми цепочками  $C_1 - L_1 - R_1$ , подключаемыми на выходе к каждой фазе автономного инвертора.

#### 4. Проверка основных положений на физической модели и обсуждение результатов

Физическая модель трехуровневого автономного трехфазного инвертора показана на рис. 8. Для проверки работоспособности модели, зависящей от корректности принципиальной схемы (см. рис. 4) и временных диаграмм (см. рис. 5), вначале были сняты осциллограммы напряжений соседних фаз без наличия внешних фильтров при условии, что сам инвертор работает на номинальную нагрузку, эквивалент которой представляют сопротивления  $Z_A$ ,  $Z_B$ ,  $Z_C$  с активно-индуктивным характером.

Осциллограммы напряжений и их гармонический состав показан на рис. 9. Величина  $K_{ГУ}$ , определенная по экспериментальным кривым  $u_2(t)$  (рис. 9, а), составила  $K_{ГУ} \approx 14,2\%$ , что несколько ниже теоретического значения, равного  $16,2\%$ , и объясняется фильтрующим действием уже имеющихся индуктивностей рассеяния обмоток трансформаторов [20, 21].

Полученные результаты подтверждают корректность изложенных выше положений, описывающих работу трехуровневого автономного трехфазного инвертора с амплитудной модуляцией магнитных потоков.

Для оценки эффективности применения дополнительной фильтрации из отдельных цепочек  $C_1 - L_1 - R_1$  по схеме на рис. 7, б был собран в трехфазном исполнении фильтр с последовательным резонансным контуром. Для этого предварительно были учтены активные сопротивления вторичных обмоток трансформаторов, которые составили  $R_\phi = 0,084$  Ом, и определена индуктивность рассеяния вторичных обмоток как  $L_\phi = 5,2 \cdot 10^{-3}$  Гн. С учетом соотношений (13) – (17) уточнены параметры элементов цепочек резонансного контура:  $C_1 = 75 \cdot 10^{-6}$  Ф,  $L_1 = 1 \cdot 10^{-2}$  Гн,  $R_1 = 1$  Ом.

Если подключить цепочку  $C_1 - L_1 - R_1$  к каждой фазе на выходе инвертора, то эффективность фильтрации будет зависеть от коэффициента передачи

$$K(f) = \frac{U_{\text{вых}}(f)}{U_{\text{вх}}(f)}, \quad (18)$$

который для фильтра, собранного по схеме на рис. 7, б, определяется из баланса токов для узла 1, записанного в соответствии с первым законом Кирхгофа:

$$\frac{U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}}{R_{\phi} + j\omega L_{\phi}} + \frac{U_{\text{вх}}}{j\omega C_1 + j\omega L_1 + R_1} + \frac{U_{\text{вх}}}{z_n} = 0, \quad (19)$$

где  $z_n$  – сопротивление нагрузки, подключаемой к выходу фильтра.

Выразив отношение (18) из (19) и подставив числовые значения, получаем характеристику коэффициента передачи фильтра (рис. 10).

Сопоставив зависимость  $K(f)$  (см. рис. 10) и распределение высших гар-

моник в выходном напряжении (см. рис. 9, б), можно сделать вывод, что данный фильтр должен достаточно эффективно снижать их уровень.

Для экспериментальной проверки были сняты две осциллограммы напряжений: одна – напряжение  $u_{\text{вх}}(t)$  до фильтра, вторая – напряже-

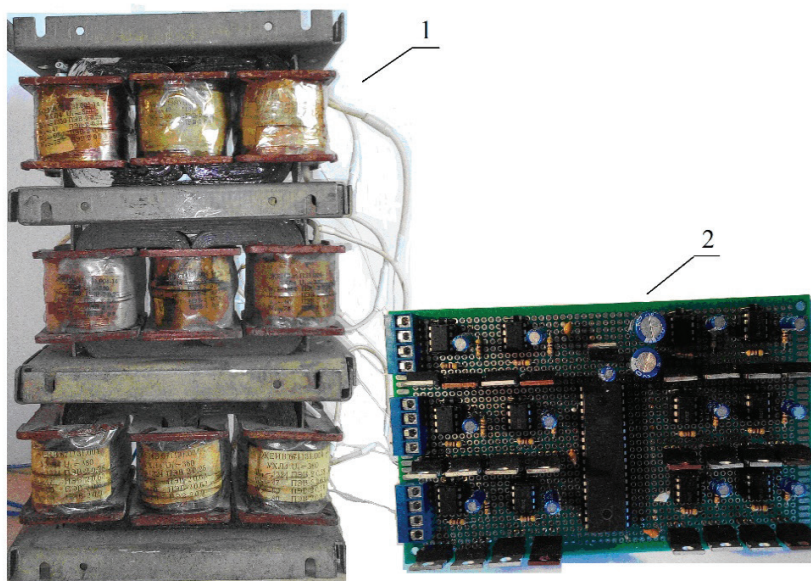


Рис. 8. Физическая модель трехуровневого автономного трехфазного инвертора: 1 – трехстержневые трансформаторы; 2 – электронные ключи, управляемые микропроцессорной системой

Fig. 8. Physical model of a three-level autonomous three-phase inverter: 1 – three-rod transformers; 2 – electronic keys controlled by a microprocessor system

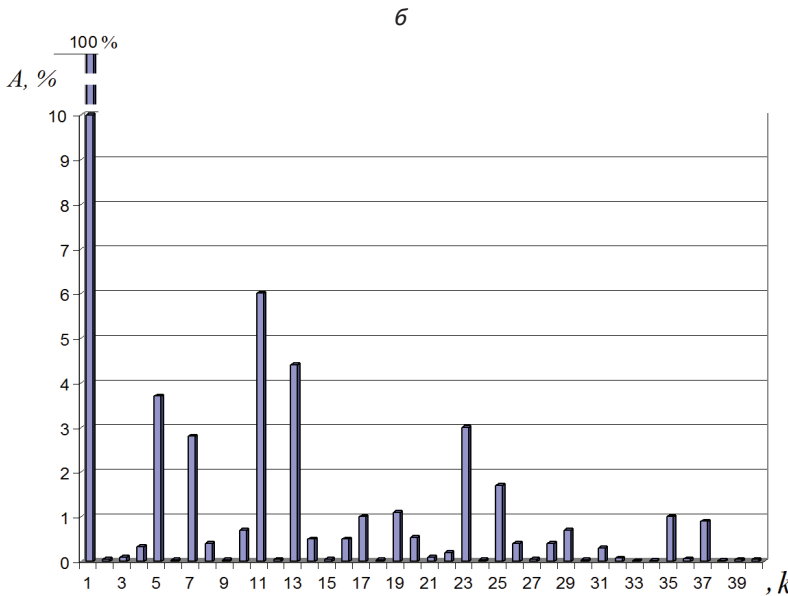
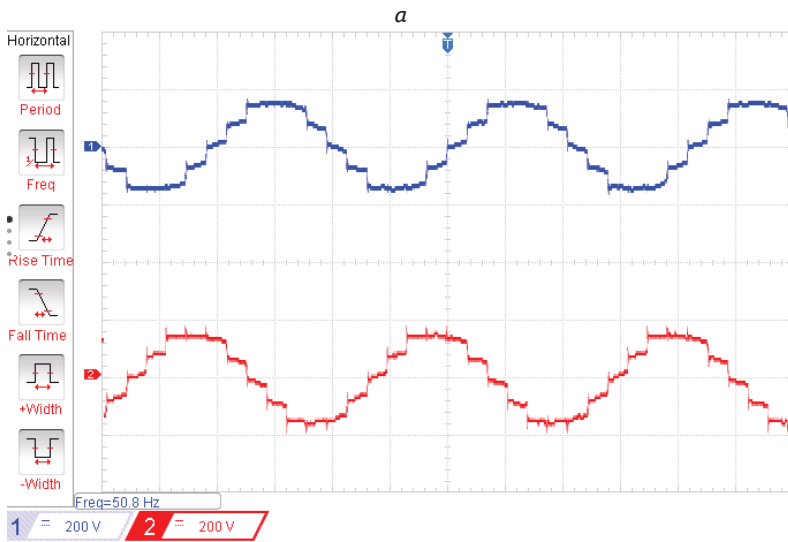


Рис. 9. Осциллограммы напряжений в соседних фазах физической модели трехуровневого автономного трехфазного инвертора (а); их гармонический состав (б)

Fig. 9. Voltage oscillograms in adjacent phases of the physical model of a three-level autonomous three-phase inverter – a; their harmonic composition – b

ние  $u_{\text{вых}}(t)$  после фильтра (рис. 11, а). Как видно, форма выходных напряжений существенно приблизилась к синусоиде. Величина  $K_{\Gamma U}$ , определенная количественно по экспериментальным кривым  $u_2(t)$  (см. рис. 11, а), составила  $K_{\Gamma U} \approx 4,87\%$ , что суще-

ственно ниже значения  $8\%$ , допустимого для сети  $0,38$  кВ. При этом по отдельности гармонические составляющие (рис. 11, б) также не превышают предельных значений, установленных нормами на качество электрической энергии.

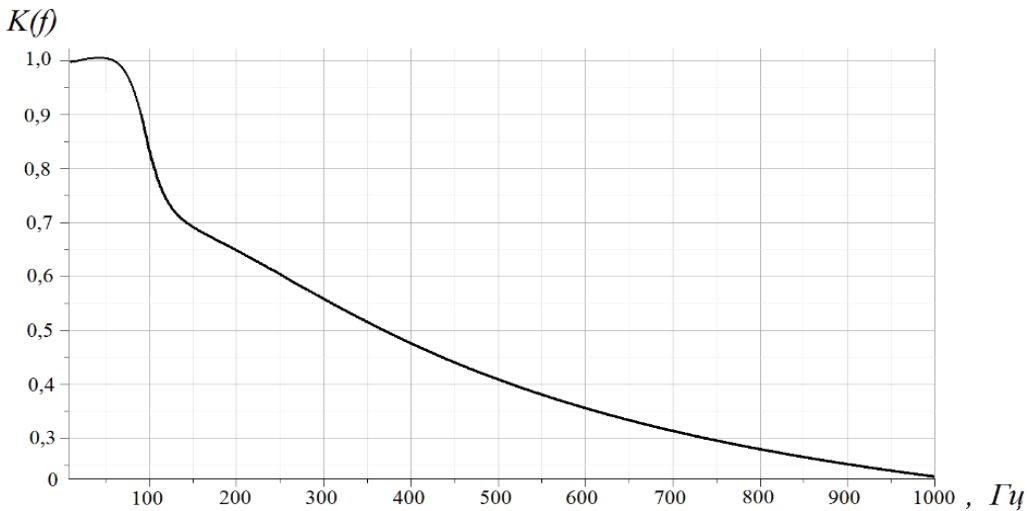


Рис. 10. Коэффициент передачи фильтра с последовательным резонансным контуром  
 Fig. 10. Series Resonant Filter Gain

## 5. Заключение

1. Показано, что форму кривых напряжений инверторов можно приблизить к синусоиде без применения ШИМ, используя простое суммирование магнитных потоков в разветвленных трехстержневых магнитопроводах силовых трансформаторов. В результате на выходе автономного инвертора кривая напряжения принимает ступенчатую форму модифицированного синуса. Преимущество амплитудной модуляции магнитных потоков заключается в достижении равномерной загрузки всех секций обмоток силовых трансформаторов.

2. Сформулированы и решены оптимизационные задачи, определившие, что ширина крайних ступеней в выходном напряжении трехуровневого инвертора должна быть в 3,748 раза больше ширины нулевых ступеней, а ширина промежуточных ступеней должна быть в 1,128 раза больше ширины нулевых ступеней. Форма такой кривой выходного напряжения дает минимальный уровень высших гармоник порядка  $K_{ГУ} \approx 16,2\%$ .

3. Предложен способ плавного регулирования уровня выходного напряжения за счет такой коррекции форм ступенчатой кривой выходного напряжения, при которой не возникает уравнительных токов в обмотках трехфазного трансформатора, соединенных в треугольник. Установлено, что изменение действующего значения выходного напряжения на  $\pm 6\%$  приведет к увеличению  $K_{ГУ}$  в пределах с 16,2% до 22,1%.

4. Исследована возможность использования пассивных синус-фильтров для снижения величины  $K_{ГУ}$  до требуемого уровня 8%, установленного нормами на качество электрической энергии для сетей 0,4 кВ. Показано, что с практической точки зрения наиболее рационально применение LC-фильтров с последовательным резонансным контуром, в котором индуктивные сопротивления рассеяния вторичных обмоток, расположенные на отдельных стержнях трансформаторов, используются в качестве продольного сопротивления синус-

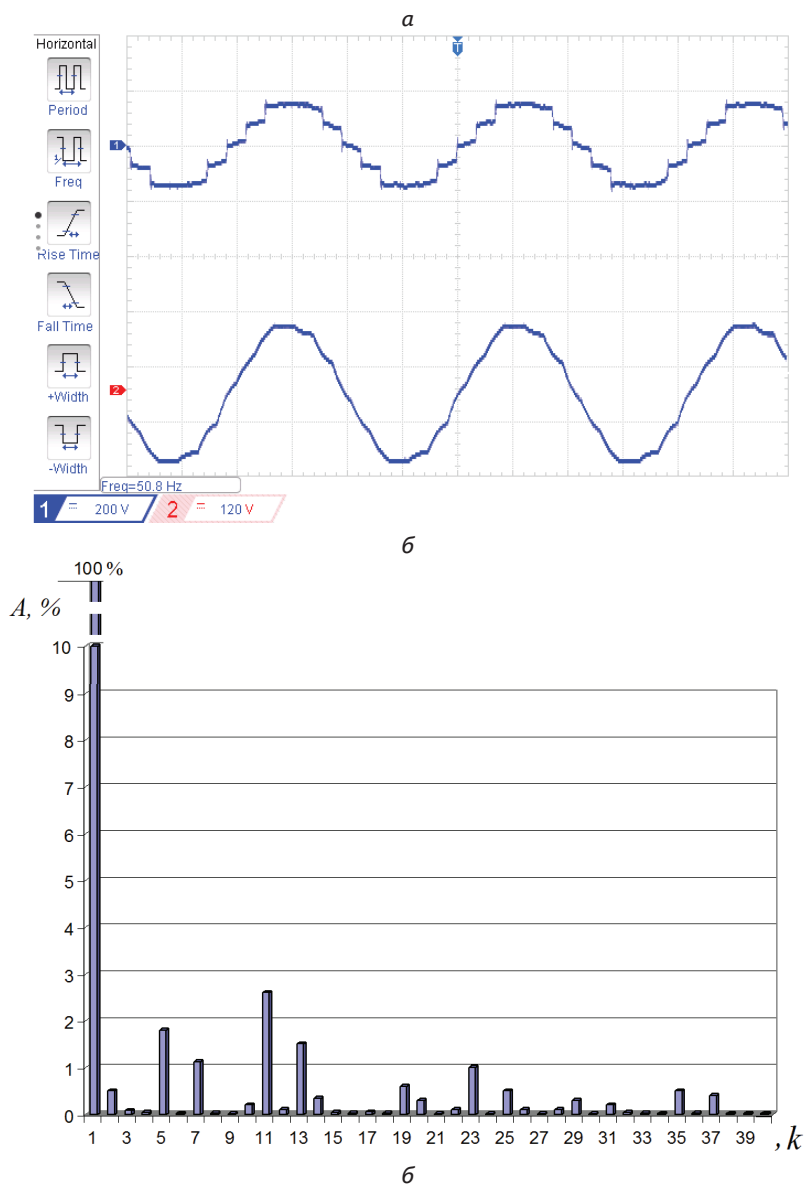


Рис. 11. Осциллограммы напряжений физической модели трехуровневого автономного трехфазного инвертора: а – до и после фильтрации; б – гармонический состав напряжений после фильтрации

Fig. 11. Voltage oscillograms of the physical model of a three-level autonomous three-phase inverter: а – before and after filtering; б – harmonic composition of stresses after filtration

фильтра. Это упрощает схемное решение фильтрующего устройства и уменьшает количество реактивных элементов в целом.

5. Построена физическая модель и проведены испытания, которые подтверждают достоверность изложенных ранее теоретических положений

и работоспособность предложенного трехуровневого автономного инвертора, а также свидетельствуют о достижимости получения кривых выходных напряжений трехфазной системы, приближенных к синусоидальной форме без использования ШИМ. Расчет и результаты последующих экспериментов показали принци-

пиальную возможность подавления всех канонических гармоник кривой выходного напряжения инвертора с амплитудной модуляцией магнитных потоков и достижения  $K_{ГУ} \approx 4,87\%$ , который в 1,6 раз меньше уровня 8%, установленного нормами на качество электрической энергии для сетей 0,4 кВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б. Н., Сычев Ю. А.* Методы и средства обеспечения энергетической безопасности промышленных предприятий с непрерывным технологическим циклом // Промышленная энергетика. — 2016. — № 9. — С. 18–22.
2. *Колесников С. В., Леонов А. П.* Надежность изоляции статорных обмоток частотно-управляемых электродвигателей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2022. — № 1. — Т. 18. — С. 33–62.
3. *Дудкин А. Н., Леонов А. П., Супуева А. С.* Влияние дефектов в межвитковой изоляции на ее стойкость к эксплуатационным нагрузкам, характерным для энергоэффективных способов управления электротехническим оборудованием // Известия ТПУ. — 2015. — Т. 326. — № 11. — С. 83–89.
4. *Сузгаев М. В.* Особенности мониторинга режимов работы и технического состояния трансформаторов тяговых подстанций при наличии высших гармоник // Железные дороги мира. — 2007. — № 6. — С. 58–60.
5. *Singh B., Mittal N., Verma K. S.* Multi-level inverter: a literature survey on topologies and control strategies // International Journal of Reviews in Computing. 2012, vol. 10, pp. 1–16.
6. *Panagis P., Stergiopoulos F., Marabeas P.* Comparison of State of the Art Multilevel Inverters // Power Electronics Specialists Conference, PESC–2008. IEEE Conference Publications, 2008, pp. 4296–4301.
7. *Баховцев И. А.* Сравнительный анализ способов управления двухуровневым АИН с ШИМ // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2008): Труды IX Междунар. науч.-техн. конф. «Силовая электроника и механотроника. Устройства автоматики и системы управления». — Новосибирск: НГТУ, 2008. — Т. 7. — С. 30–34.
8. *Виноградов А. Б., Коротков А. А.* Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты: монография. — Иваново: Изд-во Ивановского государственного энергетического университета, 2018. — 184 с.
9. *Colak I., Kabalci E., Bayindir R.* Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011, vol. 52, pp. 1114–1128.
10. *Ershov M. I., Prokofev V. E., Yanovich K. V.* Calculation of the main parameters of an inverter for electrical installations using solid oxide fuel cells // VA MTO. 2019, no. 3(4), pp. 110–116.
11. *McBee K. D., Simoes M. G.* Evaluating the long-term impact of a continuously increasing harmonic demand on feeder-level voltage distortion // IEEE transactions on industry applications. 2014, vol. 50, no. 3, pp. 2142–2149.

12. Myatezh S. V., Lisitsyn P. S. On Output-Voltage Shape Correction of Two- and Three-Level Single-Phase Autonomous Inverters without Pulse-Width Modulation // *Russ. Electr. Engin.* 2023, vol. 94, pp. 351–355. <https://doi.org/10.3103/S1068371223050115>.

13. Асташев М. Г., Панфилов Д. И., Горчаков А. В., Красноперов Р. Н., Рашитов П. А. Управление полупроводниковыми регуляторами напряжения трансформаторов под нагрузкой в распределительных сетях 6–10 кВ // МНИЖ. — 2021. — № 4–1. — С. 41–50.

14. Ивакин В. Н., Ковалев В. Д., Магницкий А. А. Нормирование энергоэффективности распределительных трансформаторов // Энергия единой сети. — 2017. — № 5 (34). — С. 20–31.

15. Пустоветов М. Ю. О параметрах фильтров для частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями // *Электричество*. — 2013. — № 5. — С. 41–44.

16. Чаплыгин Е. Е., Хухтиков С. В. Способ управления автономным инвертором напряжения с векторной ШИМ // *Практическая силовая электроника*. — 2010. — № 3(39). — С. 40–43.

17. Боярская Н. П., Довгун В. П., Егоров Д. Э. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: монография. — Красноярск: СФУ, 2014. — 192 с.

18. Пустоветов М. Ю. Расчёт параметров и компьютерное моделирование синусных фильтров в частотно-регулируемом электроприводе // *Вестник ДГТУ*. — 2012. — Т. 12. — № 3 (64). — С. 56–64.

19. Грачева Е. И., Давлетгареева Г. Р. Исследование зависимостей активного и реактивного сопротивления цеховых трансформаторов от их номинальной мощности // *Вестник КГЭУ*. — 2015. — № 4 (28). — С. 7–17.

20. Ucar M., Ozdemir S., Ozdemir E. A. four-leg unified series-parallel active filter system for periodic and non-periodic disturbance compensation // *Electric Power Systems Research*. 2010, no. 4, p. 1132.

21. Боярская Н. П., Довгун В. П., Егоров Д. Э., Синяговский А. Ф. Пассивные фильтры для компенсации гармоник в линиях электропередачи высокого напряжения // *Вестник КГЭУ*. — 2023. — № 1 (57). — С. 144–151. **PLAB**

## REFERENCES

1. Abramovich B. N., Sychev Yu. A. Methods and means of ensuring energy security of industrial enterprises with a continuous technological cycle. *Industrial energy*. 2016, no. 9, pp. 18–22. [In Russ].

2. Kolesnikov S. V., Leonov A. P. Reliability of stator windings of frequency-controlled electric motors. *Electrical and information complexes and systems*. 2022, no. 1, vol. 18, pp. 33–62. [In Russ].

3. Dudkin A. N., Leonov A. P., Supueva A. S. Defects in the interturn region associated with its resistance to loads typical for energy-efficient methods of controlling electrical devices were identified. *Izvestia TPU*. 2015, vol. 326, no. 11, pp. 83–89. [In Russ].

4. Suzgaev M. V. Features of the operating modes of the Diptychs and the technical condition of traction substation transformers in the presence of a higher harmonic. *Railways of the world*. 2007, no. 6, pp. 58–60. [In Russ].

5. Singh B., Mittal N., Verma K. S. Multilevel inverter: a review of the literature on topologies and control strategies. *International Journal of Reviews in Computing*. 2012, vol. 10, pp. 1–16.

6. Panagis P., Stergiopoulos F., Marabeas P. Comparison of modern multilevel inverters. *Conference of specialists in power electronics, PESC 2008. IEEE conference publications*. 2008, pp. 4296–4301.

7. Bakhovtsev I. A. Comparative analysis of the control method of a two-level inverter with PWM. *Actual. problems of electronic instrument making (APEP–2008): t. IX Int. scientific-technical. Conf.: Power electronics and mechatronics. Automation devices and control systems*. Novosibirsk, NSTU. 2008, vol. 7, pp. 30–34. [In Russ].

8. Vinogradov A. B., Korotkov A. A. Control algorithms for a high-voltage multilevel frequency converter: monograph. Ivanovo, Publishing house Ivanovo State Power Engineering University, 2018, 184 p. [In Russ].

9. Colak I., Kabalchi E., Bayindir R. Review of topologies and control schemes of multilevel voltage source inverters. *Energy Conversion and Control*. 2011, vol. 52, pp. 1114–1128.

10. Ershov M. I., Prokofiev V. E., Yanovich K. V. Calculation of the main parameters of the inverter for electrical installations using solid oxide fuel cells. *VA MTO*. 2019, no. 3(4), pp. 110–116.

11. McBee K. D., Simoes M. G. Assessing the long-term impact of continuously increasing harmonic demand on voltage distortion at the feeder level. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014, vol. 50, no. 3, pp. 2142–2149.

12. Mitez S. V., Lisitsyn P. S. On the Correction of the Output Voltage Shape of Two- and Three-Level Single-Phase Autonomous Inverters without Pulse-Width Modulation. *Electrical Engineering*. 2023, vol. 94, pp. 351–355. <https://doi.org/10.3103/S1068371223050115>.

13. Astashev M. G., Panfilov D. I., Gorchakov A. V., Krasnoperov R. N., Rashitov P. A. Control of Semiconductor Voltage Regulators of Transformers for Connection in 6–10 kV Distribution Networks. *MNIZH*. 2021, no. 4–1, pp. 41–50. [In Russ].

14. Ivakin V. N., Kovalev V. D., Magnitsky A. A. Standardization of energy efficiency of distribution transformers. *Energy of the unified grid*. 2017, no. 5 (34), pp. 20–31. [In Russ].

15. Pustovetov M. Yu. On additional filters for a frequency-controlled electric drive with asynchronous motors. *Electricity*. 2013, no. 5, pp. 41–44. [In Russ].

16. Chaplygin E. E., Khukhtikov S. V. Ability to control an autonomous voltage inverter with vector PWM. *Practical power electronics*. 2010, no. 3 (39), pp. 40–43. [In Russ].

17. Boyarskaya N. P., Dovgun V. P., Egorov D. E. Synthesis of filter compensating devices for power supply systems: monograph. Krasnoyarsk, SFU, 2014, 192 p. [In Russ].

18. Pustovetov M. Yu. Calculation of parameters and computer modeling of sine filters in a frequency-controlled electric drive. *Bulletin of DSTU*. 2012, vol. 12, no. 3 (64), pp. 56–64. [In Russ].

19. Gracheva E. I., Davletgareeva G. R. Study of dependencies of active and reactive response of shop transformers on their rated power. *Bulletin of KGEU*. 2015, no. 4 (28), pp. 7–17. [In Russ].

20. Ucar M., Ozdemir S., Ozdemir E. A. Four-branch unified series-parallel active filter system for compensating for periodic and non-periodic interference. *Research of electric power systems*. 2010, no. 4, p. 1132.

21. Boyarskaya N. P., Dovgun V. P., Egorov D. E., Sinyagovsky A. F. Passive filters for the appearance of harmonics in high-voltage power transmission lines. *Bulletin of KGEU*. 2023, no. 1 (57), pp. 144–151. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Мятеж Сергей Владимирович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: myatezh@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-8450-4027;

*Лисицын Павел Сергеевич*<sup>1</sup> — ассистент, e-mail: nik-nokia@mail.ru;

*Кравченко Даниил Павлович*<sup>1</sup> — ассистент, e-mail: kradap@gmail.com;

*Малозёмов Борис Витальевич*<sup>1</sup> — канд. техн. наук, доцент, e-mail: mbv5@mail.ru, Scopus AuthorID: 10239844500, ResearcherID: J-1723-2016, РИНЦ AuthorId: 176629, ORCID: 0000-0001-8686-9556;

*Чернов Алексей Александрович*<sup>1</sup> — младший научный сотрудник научно-исследовательской части, e-mail: al-exxe-y@mail.ru;

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет.

**Для контактов:** *Мятеж С. В.*, e-mail: myatezh@corp.nstu.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Myatezh S. V.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, e-mail: myatezh@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-8450-4027;

*Lisitsyn P. S.*<sup>1</sup>, assistant, e-mail: nik-nokia@mail.ru;

*Kravchenko D. P.*<sup>1</sup>, assistant, e-mail: kradap@gmail.com;

*Malozyomov B. V.*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: mbv5@mail.ru; Scopus AuthorID: 10239844500 ResearcherID: J-1723-2016 RISC AuthorId: 176629 ORCID: 0000-0001-8686-9556;

*Chernov A. A.*<sup>1</sup>, junior researcher of the research unit, e-mail: al-exxe-y@mail.ru;

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia.

**Corresponding author:** *Myatezh S. V.*, e-mail: myatezh@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 01.07.2024; получена после рецензии 25.08.2024; принята к печати 10.10.2024.

Received by the editors 01.07.2024; received after the review 25.08.2024; accepted for printing 10.10.2024.

