

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

А. В. Капустин<sup>1</sup>, Н. И. Щуров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

**Аннотация:** Статья посвящена вопросу повышения энергоэффективности тягового электропривода карьерного самосвала за счёт применения энергоэффективного преобразователя энергии. Совершенствование бортового преобразователя энергии как составляющей тягового электрического привода является важнейшей задачей повышения энергоэффективности автономного источника питания карьерного самосвала. В качестве бортового преобразователя энергии на карьерных самосвалах применяются традиционные инверторы, но их энергетические показатели, а именно КПД и коэффициент мощности, могут быть существенно повышены. В статье приведена информация о многоуровневых инверторах как о более энергоэффективной замене традиционных инверторов. Использование многоуровневых инверторов может кардинально изменить профиль энергопотребления карьерных самосвалов, что приведет к повышению эффективности работы, то есть к экономии электроэнергии и снижению воздействия на окружающую среду. Многоуровневый инвертор веерного типа, с усовершенствованной топологией в сравнении с традиционными многоуровневыми инверторами, предложен для повышения энергоэффективности тягового привода карьерного самосвала. Приведено имитационное моделирование топологии усовершенствованного инвертора веерного типа. Для демонстрации положительного эффекта от внедрения предлагаемой топологии приведён сравнительный анализ результатов моделирования традиционного мостового инвертора, пятиуровневого инвертора с нейтральной точкой и усовершенствованного инвертора веерного типа.

**Ключевые слова:** многоуровневый инвертор, усовершенствованный инвертор веерного типа, повышение энергоэффективности тягового электропривода, энергоэффективность, преобразователи энергии, силовая электроника, коэффициент мощности инвертора, инвертор для тягового электропривода.

**Для цитирования:** Капустин А. В., Щуров Н. И. Повышение энергоэффективности тягового электропривода карьерного самосвала // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 229–244. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_229.

### Improving the energy efficiency of the electric traction drive of a haul truck

A. V. Kapustin<sup>1</sup>, N. I. Shchurov<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The article is devoted to increasing energy efficiency of traction electric drive of haul truck, due to the use of energy efficient energy converter. Improvement of on-board energy

converter, as a component of traction electric drive, is the most important task of increasing energy efficiency of an autonomous power supply of a haul truck. As an on-board power converter, traditional inverters are used on dump trucks, but their energy performance, namely efficiency and power factor can be significantly increased. This article provides information about multilevel inverters as a more energy-efficient replacement for traditional inverters. The use of these multilevel inverters can fundamentally change the energy consumption profile of dump trucks, leading to increased operating efficiency, i.e. energy savings and reduced environmental impact. A new fan-type multilevel inverter with improved topology, in comparison with traditional multilevel inverters, is proposed to improve the energy efficiency of a haul truck traction drive. Simulation modeling of the improved fan-type inverter topology is given. To demonstrate the positive effect of implementing the proposed topology, a comparative analysis of simulation results of a traditional bridge inverter, a five-level inverter with a neutral point, and an advanced fan-type inverter is given.

**Key words:** multilevel inverter, advanced fan-type inverter, increasing of traction electric drive energy efficiency.

**For citation:** Kapustin A.V., Shchurov N.I. Improving the energy efficiency of the electric traction drive of a haul truck. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):229–244. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_101\_0\_229.

## 1. Введение

Горная промышленность является одной из наиболее энергоёмких отраслей, на неё приходится значительная часть мирового потребления энергии и выброса парниковых газов. В этой связи задачи по сокращению выброса парниковых газов являются актуальными. Одной из областей, где достигнут прогресс работ в этом направлении, является внедрение карьерных самосвалов, оборудованных тяговым электроприводом [1, 2]. Такие самосвалы обладают рядом преимуществ в сравнении с аналогичными дизельными, а именно: снижение эксплуатационных расходов и уменьшение выбросов парниковых газов.

Недавние исследования продемонстрировали эффективность электрических карьерных самосвалов при транспортировке полезных ископаемых. В [2] приводится расчет экономии дизельного топлива на километр пути. Экономия дизельного топлива на километр в килограммах для участков шахты или карьера с различным рельефом определяется следующим выражением:

$$\Delta F_{Ai} = F_{Ai} - \frac{c_2}{c_1} \cdot E_{Ai}, \quad (1)$$

где  $\Delta F_{Ai}$  — количество сэкономленного дизельного топлива на километр (кг) в районе места добычи  $A_i$ ;  $c_1$  — коэффициент перевода дизельного топлива в стандартный уголь, составляет 1,4571 кг стандартного угля/кг дизеля;  $c_2$  — коэффициент пересчета потребляемой мощности в стандартный уголь, 0,123 кг;  $E_{Ai}$  — площадь места добычи (все участки).

В соответствии с приведенными расчётами экономия энергии варьируется от 65,92 до 94,91% в зависимости от участка, а эмиссия парниковых газов отсутствует.

Применение тягового электропривода на карьерных самосвалах является крайне актуальным направлением развития индустрии [3]; вместе с тем, появляется необходимость совершенствования и повышения энергоэффективности составляющих привода [4, 5], одним из важнейших компонентов которого является преобразователь энергии [6]. Таким преобразователем является

тяговый инвертор. Достигнут определённый прогресс в совершенствовании инверторов. Проведенный анализ литературы по этой теме свидетельствует о том, что на данный момент наилучших показателей энергоэффективности, таких как коэффициент мощности и коэффициент гармонического искажения, позволяют добиться так называемые многоуровневые инверторы [7, 8]. Таким образом, в данной статье применение технологии многоуровневого инвертора предлагается в качестве средства повышения энергоэффективности тягового привода карьерного самосвала.

## 2. Многоуровневые инверторы напряжения

Данная статья посвящена анализу влияния топологии инвертора на его энергетические показатели, коэффициент мощности и  $THD$ . Актуальность развития инверторов в сторону повышения числа уровней подтверждается многочисленными публикациями по многоуровневым инверторам, например, [9]. Достижение лучшей энергоэф-

фективности обеспечивается за счёт создания ступенчатого выходного напряжения, которое существенно снижает гармонические искажения [10]. Ступенчатое напряжение на выходе преобразователя позволяет добиться лучшей синусоидальности напряжения при меньшей частоте коммутаций, а это означает сокращение потерь на переключение силовых полупроводниковых приборов и напрямую сказывается на эффективности работы преобразователя. В литературе представлено большое количество различных многоуровневых инверторов [11–13]. Некоторые из них являются типовыми и могут быть отнесены к одному из основных семейств топологий. На рис. 1 представлены простейшие представители семейств основных топологий.

Представленные простейшие инверторы являются трёхуровневыми, но на их основе при помощи вертикального, горизонтального или комбинированного каскадирования можно получить более многоуровневые топологии. Однако каскадирование тради-

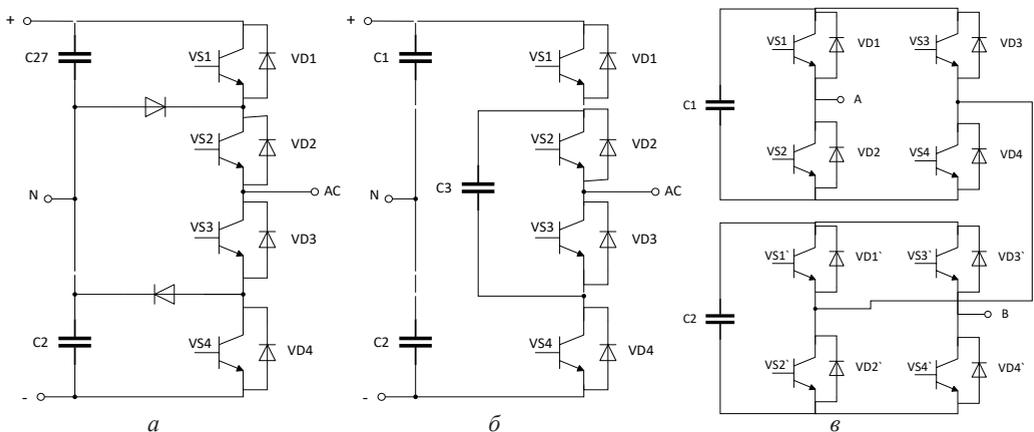


Рис. 1. Основные семейства многоуровневых инверторов: а – топология с фиксированной нейтралью [14], б – топология с плавающим конденсатором [15], в – мостовая топология [16]

Fig. 1. Main families of multilevel inverters, a – neutral point clamped topology [14], b – floating capacitor topology [15], c – bridge topology [16]

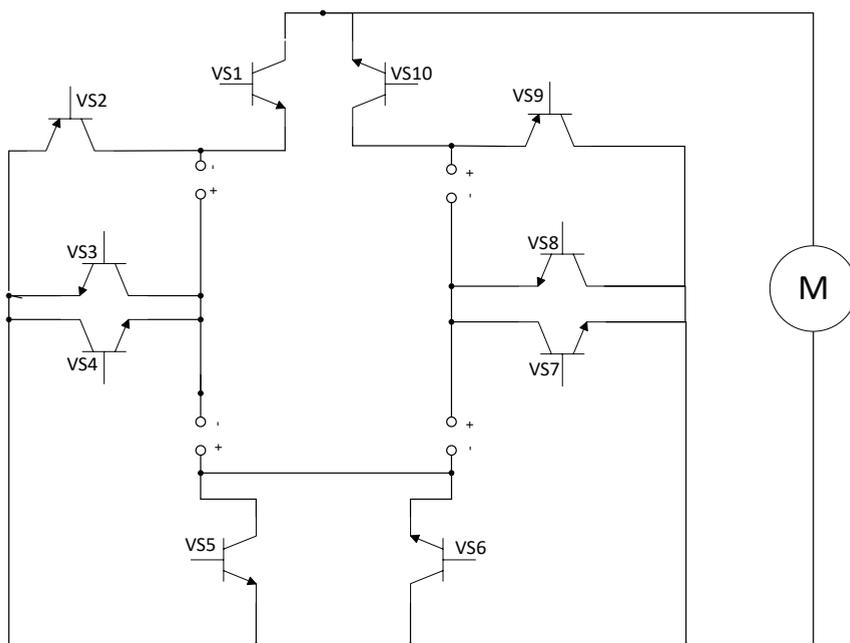


Рис. 2. Усовершенствованный инвертор веерного типа  
 Fig. 2. Improved fan-type inverter

ционных схем приводит к чрезмерному нагромождению и сильно увеличивает количество силовых полупроводниковых приборов (СПП), лежащих на пути протекания тока — из-за этого растут потери в полупроводниках, снижается эффективность и надёжность. К тому же одним из существенных недостатков традиционных схем является использование конденсаторных вторичных источников питания — это вызывает необходимость их балансировки [17]. Однако ввиду того, что на электротранспорте в качестве источника энергии могут быть использованы не только аккумуляторные батареи, но и независимые группы топливных элементов, появляется возможность реализации многоуровневого инвертора с независимыми источниками напряжения.

В данной статье рассматривается применение нового многоуровневого инвертора веерного типа.

Предлагаемый инвертор позволяет реализовать девятиуровневое выходное напряжение и предполагает использование не требующих балансировки независимых источников вторичного напряжения.

### 3. Метод

КПД и коэффициент мощности являются основными энергетическими показателями, позволяющими количественно измерить энергоэффективность электропривода. Сравнение КПД целесообразно для конкретных примеров при использовании на практике, однако теоретическая оценка коэффициента мощности возможна и в более обобщенном виде, результаты которого применимы для широкого ряда случаев, а не для одного конкретного примера. В данной статье рассматривается повышение энергоэффективности именно за счёт повышения коэффициента мощности.

Основной любого преобразователя является его топология. От топологического решения зависит ожидаемый результат работы, энергетические показатели и эффективность. В данной статье представлен анализ влияния топологии схемы тягового преобразователя на её энергетические показатели на основе имитационного моделирования в среде MATLAB Simulink. В качестве исследуемых топологий будут использованы: традиционный мостовой инвертор, пятиуровневый инвертор с фиксированной нейтралью (*5npc*) [18] и усовершенствованный инвертор веерного типа (рис. 3). Для большей наглядности результат работы каждой из преобразовательных схем будет рассмотрен на примере одной фазы.

Коэффициент мощности определяется по формуле

$$\chi = K_C \cdot K_H, \quad (2)$$

$$K_H = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD^2)}}, \quad (3)$$

где  $\chi$  — коэффициент мощности,  $K_C$  — коэффициент сдвига, обусловленный характером нагрузки,  $K_H$  — коэффициент искажения, зависящий от формы выходного напряжения.

Поскольку в данном моделировании исследуется влияние топологии на энергетические показатели,  $K_C$  принимается равным единице, так как на него влияет характер нагрузки [19], а вот  $K_H$ , напротив, напрямую зависит от формы выходного напряжения и его величина изменяется в зависимости от используемой топологии преобразователя. Частота регулирования, использованная для коммутации силовых полупроводниковых приборов каждого из преобразователей, составляет 3,5 kHz, а суммарное напряжение источников энергии для каждого преобразователя — 200 В. Таким образом, созда-

ются равные условия для исследования коэффициента мощности, обеспечиваемого каждой из топологий преобразователей.

#### 4. Результаты

Полученная имитационная модель усовершенствованного преобразователя веерного типа представлена на рис. 4.

Результаты моделирования удобно представить в виде таблицы, иллюстрирующей расчет энергетических показателей для каждой из схем. Традиционная топология позволяет реализовать три уровня выходного напряжения ( $-V$ ,  $0$ ,  $+V$ ), тогда как пятиуровневая и усовершенствованная веерная реализуют соответственно пяти- ( $-V/2$ ,  $-V/4$ ,  $0$ ,  $V/4$ ,  $V/2$ ) и девятиуровневый ( $-V$ ,  $-V/2$ ,  $-V/3$ ,  $-V/4$ ,  $0$ ,  $V/4$ ,  $V/3$ ,  $V/2$ ,  $V$ ). Графики выходного напряжения приведены в табл. 1.

В таблице представлены график выходного напряжения, гармонический анализ напряжений. В результате гармонического анализа значения  $THD$  для мостовой, *5npc* и веерной топологии равняются соответственно  $THD_{мост} = 51.85\%$ ;  $THD_{5npc} = 27.31\%$ ;  $THD_{веер} = 13.64\%$ . Расчет коэффициента мощности с учетом описанных ранее допущений на основе гармонического анализа и коэффициента гармонического искажения приведён в следующих формулах:

$$\chi_{мост} = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.5185^2)}} = 0.88, \quad (4)$$

$$\chi_{5npc} = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.2731^2)}} = 0.96, \quad (5)$$

$$\chi_{веер} = \frac{1}{\sqrt{1 + (0.1364^2)}} = 0.99, \quad (6)$$

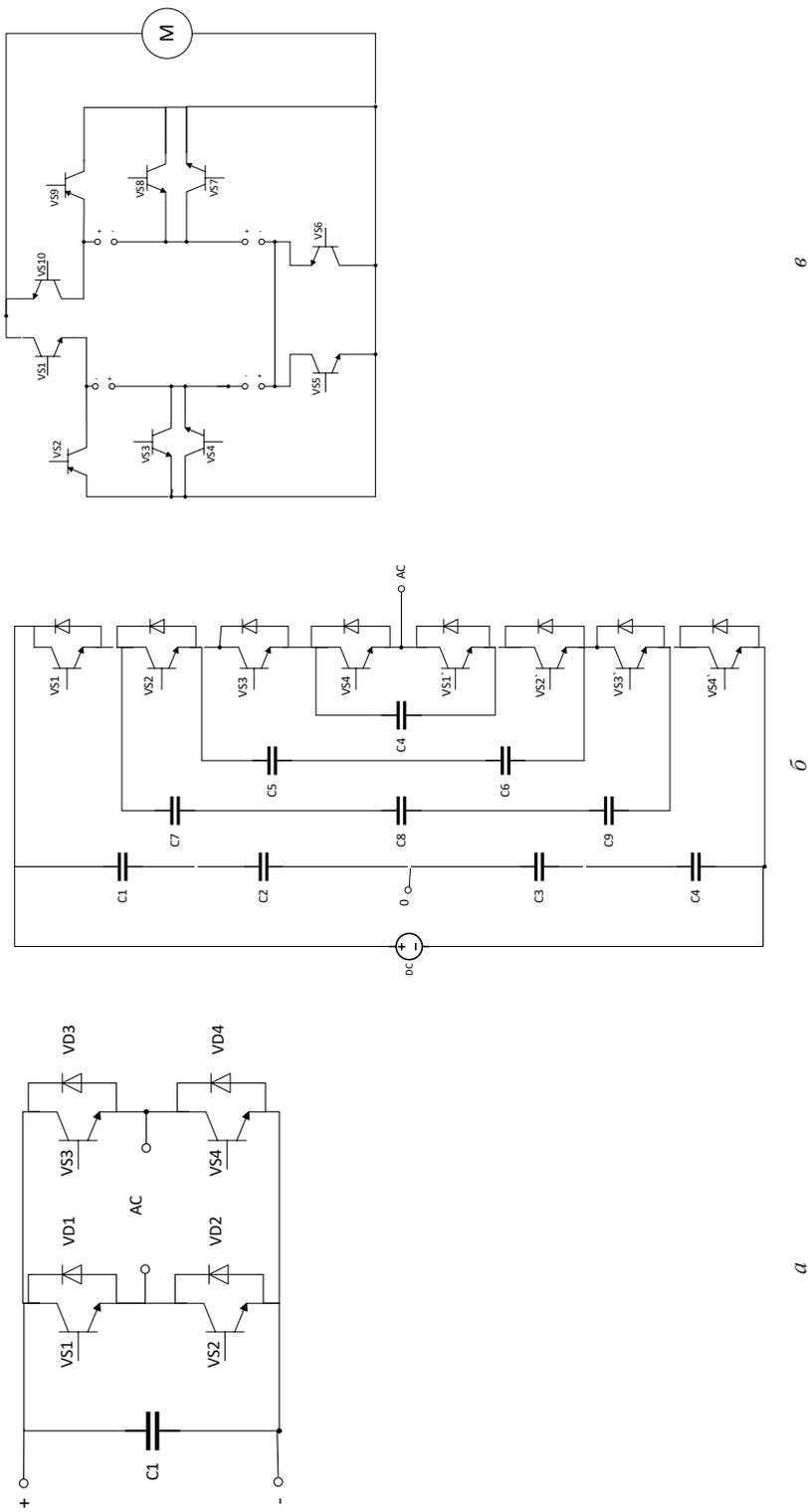


Рис. 3. Топологии многоуровневых инверторов, использованные для имитационного моделирования и анализа энергетических показателей: а — традиционная мостовая топология; б — топология пятиуровневого инвертора с фиксированной нейтралью; в — топология усовершенствованного инвертора с фиксированной нейтралью

Fig. 3. Multilevel inverter topologies used for simulation and energy performance analysis: а — traditional bridge topology; б — five-level inverter topology with neutral point clamped; в — advanced fan-type inverter topology

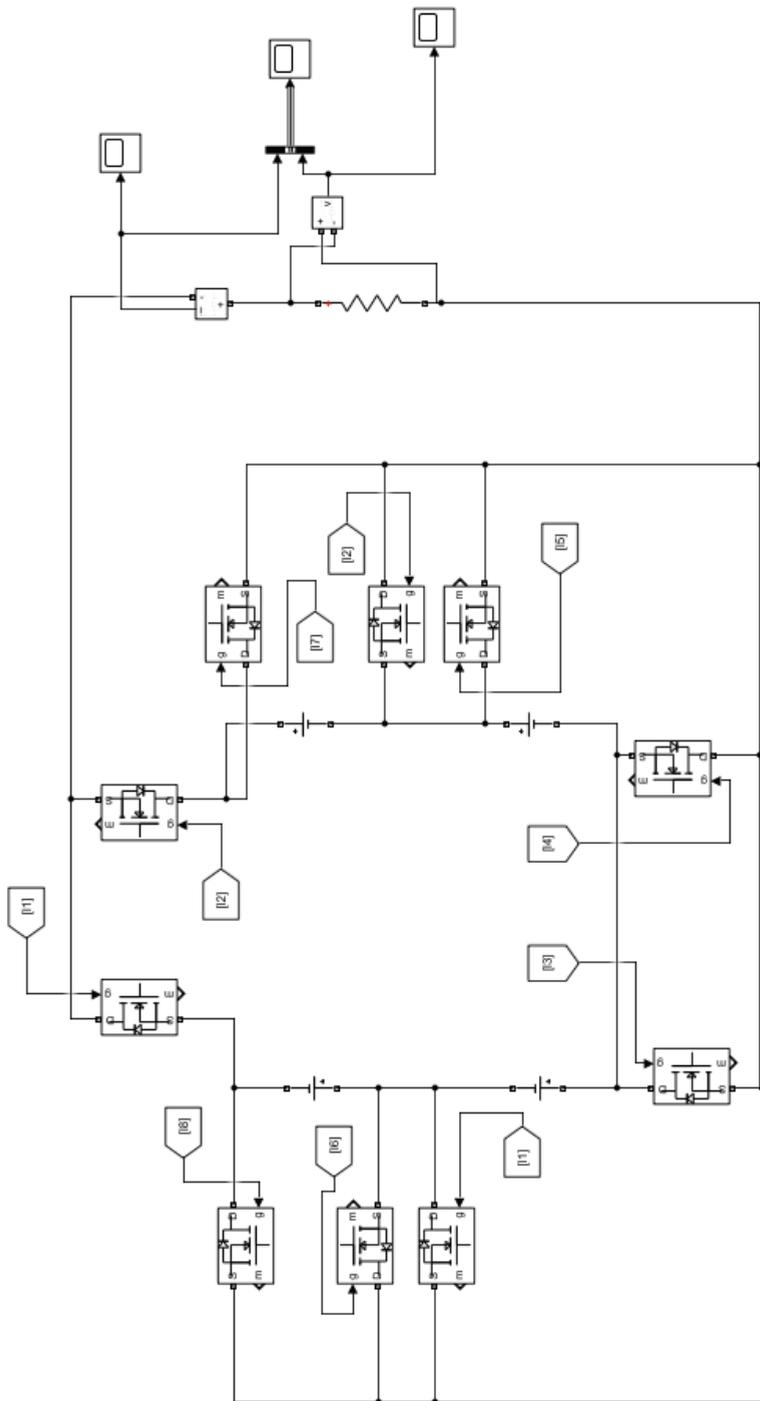
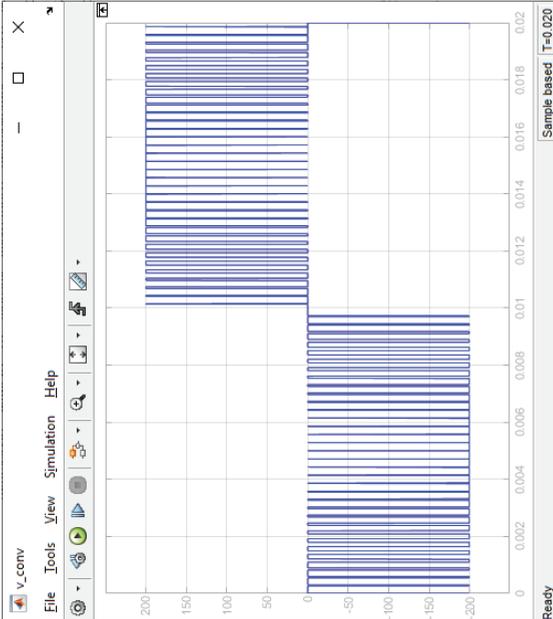
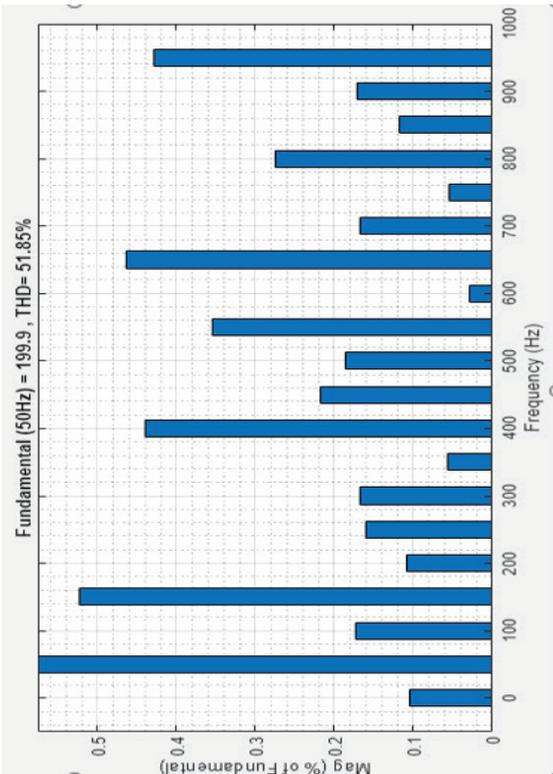
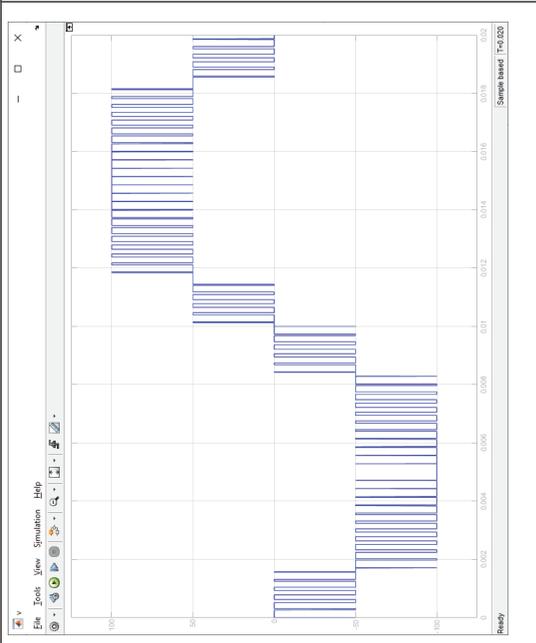
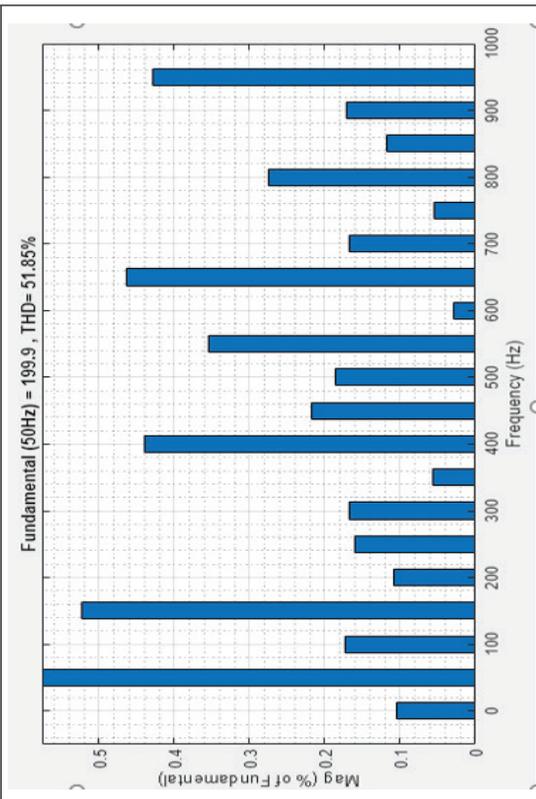


Рис. 4. Имитационная модель усовершенствованного веерного инвертора  
 Fig. 4. Simulation model of an improved fan inverter

Таблица 1  
 Результаты имитационного моделирования топологий тяговых инверторов и гармонический анализ напряжений  
 Simulation results of traction inverter topologies and harmonic voltage analysis

<p>Название</p>	<p>График выходного напряжения</p>	<p>Гармонический анализ выходного напряжения</p>
<p>Мостовая</p>		 <p>Fundamental (50Hz) = 199.9 , THD= 51.85%</p>

Продолжение табл. 1

<p>Название</p>	<p>График выходного напряжения</p> 	<p>Гармонический анализ выходного напряжения</p>
<p>5 прс</p>		<p>Гармонический анализ выходного напряжения</p>

Окончание табл. 1

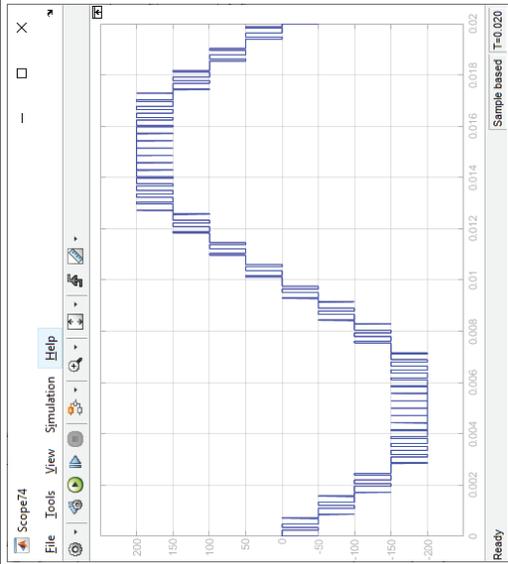
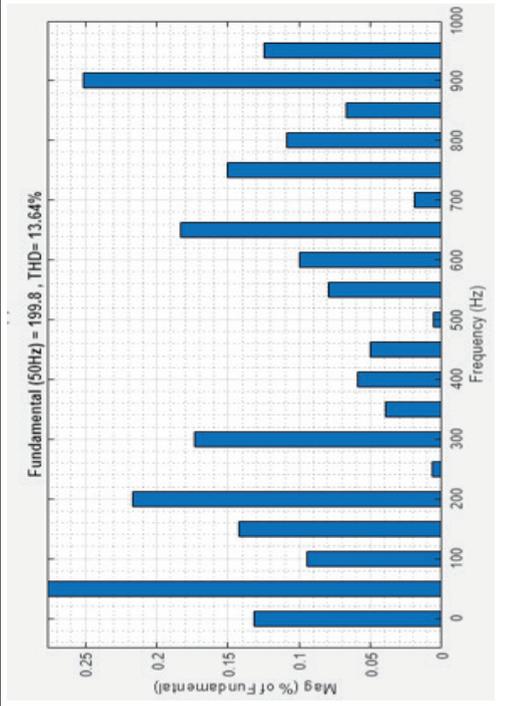
<p>Наз-ва-ние</p>	<p>График выходного напряжения</p>	<p>Гармонический анализ выходного напряжения</p>
<p>Вектор</p> 		

Таблица 2

Число полупроводниковых приборов, необходимое для реализации различных топологий  
*Number of semiconductors needed to implement different topologies*

Название топологии	Число вторичных источников энергии	Число транзисторов	Число диодов	Общее число СПП
<i>5nrc</i>	4	8	6	14
<i>9nrc</i>	8	16	12	28
Веерная	4	10	0	10

Коэффициент мощности мостового преобразователя в данном случае составил — 0,88, преобразователя с фиксированной нейтралью (*5nrc*) — 0,96, что иллюстрирует эффект от применения большего числа уровней. Веерный преобразователь характеризуется максимальным значением в 0,99.

Естественно, режим управления, допустимая частота коммутаций, наличие выходного фильтра также способны повлиять на эту величину [20, 21]. Однако, с точки зрения топологии, логично заключить, что большее число уровней позволяет обеспечить большую энергоэффективность. Полученные данные позволяют характеризовать девятиуровневый сигнал выходного напряжения как достаточный для достижения наивысшего результата и сделать вывод о том, что дальнейшее увеличение числа уровней в преобразователе не имеет смысла и окажется избыточным.

## 5. Обсуждение

Логичным в данной ситуации кажется вопрос о целесообразности сравнения пятиуровневого преобразователя с девятиуровневым. Ведь то, что девятиуровневый окажется лучше — вполне ожидаемо и логично. Смысл заключается в том, что веерная тополо-

гия позволяет реализовать девятиуровневый график напряжения на выходе преобразователя с использованием сопоставимого количества полупроводниковых приборов. В табл. 2 приведены данные о необходимом числе силовых полупроводниковых приборов для реализации различных топологий.

Для того чтобы создать девятиуровневый преобразователь по схеме с фиксированной нейтралью (*9nrc* получается по аналогии с *5nrc* — при помощи каскадирования *nrc*-топологии, рисунок в статье не приводится ввиду громоздкости), понадобилось бы практически в три раза больше полупроводниковых приборов. Тогда как, при прочих равных условиях, веерная топология позволяет добиться большей энергоэффективности преобразователя при меньшем количестве используемых СПП, при том, что требуемая мощность СПП для веерной топологии является той же, что и для пятиуровневой с фиксированной нейтралью. Кроме того, топология усовершенствованного инвертора веерного типа предусматривает возможность использования независимых вторичных источников напряжения, что открывает простор для дальнейшего исследования по организации интеллектуального управления преобразова-

телем на основе данных о рельефе местности применения, как в [2], или реализации системы на основе нечеткой логики и нейронных сетей, как в [22–24].

Предлагаемая усовершенствованная топология веерного типа способна повысить энергоэффективность тягового привода карьерного самосвала за счёт применения более энергоэффективной топологии, которая позволяет реализовать большее число уровней выходного напряжения при меньшем числе и меньшей мощности используемых СПП.

## 6. Заключение

Сравнительный анализ многоуровневых инверторов и результаты их имитационного моделирования показывают, что инвертор, выполненный по топологии веерного типа, имеет высокие энергетические показатели с коэффициентом мощности  $\chi = 0.99$ , а также при его реализации значительно снижается количество силовых полупроводниковых приборов, а это в конечном результате приводит к существенному повышению энергоэффективности электропривода карьерного самосвала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинкин Д. М., Карташов А. Б., Арутюнян Г. А., Бузунов Н. В., Сорокин К. П., Ялышев А. В. Современное состояние техники и технологий в области карьерных самосвалов с накопителями энергии // Горное оборудование и электромеханика. — 2020. — № 6(152). — С. 31–42. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42.
2. Huawei Zhang, Yong Ma, Zhenzhong Yang, Lijun Wang, Shuman Guo, Bin Hao. Study on energy conservation and emission reduction of pure electric non-road mining dump trucks // E3S Web of Conferences 268 VESEP2020, 2021. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801025>.
3. Виноградов А. Б., Гнездов Н. Е., Чистосердов В. Л., Коротков А. А. Улучшение характеристик тягового электрооборудования карьерных самосвалов // Сборник трудов XI Международной (XXII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП 2020. — СПб: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», 2021. — С. 53–57.
4. Малафеев С. И., Серебренников Н. А. Повышение энергетической эффективности карьерных экскаваторов на основе модернизации электрооборудования и систем управления // Уголь. — 2018. — № 10(1111). — С. 30–35. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-30-34.
5. Кузнецов К. Б., Горожанкин А. Н., Функ Т. А., Хусаинов Ш. Н., Круглов Г. А., Коржов А. В. Способы снижения потерь в электроприводах и повышение электробезопасности при их обслуживании // Электротехника. — 2017. — № 4. — С. 26–29.
6. Бережнов Д. А. Многоуровневый автономный инвертор напряжения // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 7. — С. 42–43.
7. Franquelo L. G., Rodriguez J., Leon J. I., Kouro S., Portillo R., Prats M. A. M. The age of multilevel converters arrives // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2008, vol. 2, no. 2, pp. 28–39. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519.
8. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Bin W., Rodriguez J., Perez M. A., Leon J. I. Recent Advances and Industrial Applications of

Multilevel Converters // IEEE Trans. Ind. Electron. 2010, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580. DOI: 10.1109/TIE.2010.2049719.

9. *Poorfakhraei A., Narimani M., Emadi A.* A Review of Multilevel Inverter Topologies in Electric Vehicles: Current Status and Future Trends // IEEE Open Journal of Power Electronics. 2021, vol. 2, pp. 155–170. DOI: 10.1109/OJPEL.2021.3063550.

10. *Balasubramanian M., Geetha B. T.* Reduction of Harmonics in Multilevel Inverter using Phase Disposition PWM compared with Conventional PWM based on Efficiency // 2022 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I), Uttar Pradesh, India, 2022, pp. 855–861. DOI: 10.1109/IC3I56241.2022.10072518.

11. *Panda A., Panda G.* Modular multilevel inverter configuration with lesser switch counts // 2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), Shillong, India. 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPE55035.2022.9798098.

12. *Haw L. K., Jefry N. A., Ing W. K.* The New Hybrid Multilevel Inverter with Reduced Number of Switches // 2021 IEEE 11th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET), Shah Alam, Malaysia. 2021, pp. 337–341. DOI: 10.1109/ICSET53708.2021.9612532.

13. *Rao S. N., Kumar D. V. A., Babu C. S.* New multilevel inverter topology with reduced number of switches using advanced modulation strategies // 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), Dindigul, India. 2013, pp. 693–699. DOI: 10.1109/ICPEC.2013.6527745.

14. *Nabae A., Takahashi I., Akagi H.* A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter // IEEE Transactions on Industry Applications. 1981, vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523. DOI: 10.1109/TIA.1981.4503992.

15. *Bouamrane O., Khalili T., Tyass I., Rafik M., Raihani A., Bahati L., Benhala B.* Flying capacitors multilevel inverter: architecture, control and active balancing. E3S Web of Conferences, 2022, vol 336. DOI: 10.1051/e3sconf/202233600039.

16. *Gaikwad A., Arbune P. A.* Study of cascaded H-Bridge multilevel inverter // 2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT), Pune, India. 2016, pp. 179–182. DOI: 10.1109/ICACDOT.2016.7877574.

17. *Капустин А. В., Щуров Н. И.* Обзор основных топологий многоуровневых инверторов // Электротехника. — 2023. — № 5. — С. 43–48.

18. *Burguete E., López J., Zabaleta M.* New Five-Level Active Neutral-Point-Clamped Converter // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 440–447. DOI: 10.1109/TIA.2014.2334737.

19. *Salcu S. I., Iuoraş A. M., Szekely N. C., Bojan M., Rusu C. G., Fasolă G. I.* Active Power Factor Compensation Based on a Geometric Phase Control Scheme // 2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Dubrovnik, Croatia. 2020, pp. 130–135. DOI: 10.1109/PEDG48541.2020.9244319.

20. *ElGebaly A. E., El-Wahab Hassan A., El-Nemr M. K.* Reactive Power Compensation by Multilevel Inverter STATCOM for Railways Power Grid // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia. 2019, pp. 2094–2099. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657058.

21. *Терованесов М. Р., Литвинова Е. А., Таранов С. В.* Вопросы компенсации реактивной мощности // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. — 2017. — № 47. — С. 4–10.

22. Jianyao H., Juan W., Hemeng P., Qi P., Qingli H. Application of fuzzy logic algorithm for optimization of control strategy in electric vehicles // 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China. 2017, pp. 2042–2045. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054375.

23. Жеребкин Б. В. Система векторного управления тяговым электроприводом рудничных электровозов с использованием аппарата нечеткой логики: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — СПб, 2005. — 22 с.

24. Шонин О. Б., Пронько О. Б. Энергосберегающие алгоритмы частотного управления асинхронным приводом с уточнением области минимума потерь на основе методов нечеткой логики // Записки Горного института. — 2016. — Т. 218. — С. 270–280. **ИВАБ**

## REFERENCES

1. Dubinkin D. M., Kartashov A. B., Arutyunyan G. A., Buzunov N. V., Sorokin K. P., Yalyshev A. V. Current state of the art and technologies in the field of quarry dump trucks with energy storage devices. *Mining equipment and electromechanics*. 2020, no. 6(152), pp. 31–42. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-31-42.

2. Huawei Zhang, Yong Ma, Zhenzhong Yang, Lijun Wang, Shuman Guo, Bin Hao. Study on energy conservation and emission reduction of pure electric non-road mining dump truck. *E3S Web of Conferences 268 VESEP2020*, 2021. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126801025>.

3. Vinogradov A. B., Gnezdov N. E., Chistoserdov V. L., Korotkov A. A. Performance Buildup of Electrical Traction Equipment of Mining Dump Trucks. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoj (XXII Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jelektroprivodu AJeP 2020*, Sankt-Peterburg. Sankt-Peterburg, Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija "National'nyj issledovatel'skij universitet ITMO". 2021, pp. 53–57. [In Russ].

4. Malafeev S. I., Serebrennikov N. A. Increasing energy efficiency of mining excavators through upgrade of electrical equipment and control systems. *Ugol*. 2018, no. 10(1111), pp. 30–35. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-10-30-34.

5. Kuznetcov K. B., Gorozhankin A. N., Funk T. A., Khusainov S. N., Kruglov G. A., Korzgov A. V. Ways to decrease losses in electric drives and improvement of electrical safety during their service. *Russian electrical engineering*. 2017, no. 4, pp. 26–29. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371217040125.

6. Berezhnov D. A. Mnogourovnevnyj avtonomnyj invertor naprjazhenija. *The Railway Transport magazine*. 2021, no. 7, pp. 42–43. [In Russ].

7. Franquelo L. G., Rodriguez J., Leon J. I., Kouro S., Portillo R., Prats M. A. M. The age of multilevel converters arrives. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2008, vol. 2, no. 2, pp. 28–39. DOI: 10.1109/MIE.2008.923519.

8. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Bin W., Rodriguez J., Perez M. A., Leon J. I. Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580. DOI: 10.1109/TIE.2010.2049719.

9. Poorfakhraei A., Narimani M., Emadi A. A Review of Multilevel Inverter Topologies in Electric Vehicles: Current Status and Future Trends. *IEEE Open Journal of Power Electronics*. 2021, vol. 2, pp. 155–170. DOI: 10.1109/OJPEL.2021.3063550.

10. Balasubramanian M., Geetha B. T. Reduction of Harmonics in Multilevel Inverter using Phase Disposition PWM compared with Conventional PWM based on Efficiency. *2022 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)*, Uttar Pradesh, India. 2022, pp. 855–861. DOI: 10.1109/IC3I56241.2022.10072518.
11. Panda A., Panda G. Modular multilevel inverter configuration with lesser switch counts. *2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*, Shillong, India. 2022, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICEPE55035.2022.9798098.
12. Haw L. K., Jefry N. A., Ing W. K. The New Hybrid Multilevel Inverter with Reduced Number of Switches. *2021 IEEE 11th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, Shah Alam, Malaysia. 2021, pp. 337–341. DOI: 10.1109/ICSET53708.2021.9612532.
13. Rao S. N., Kumar D. V. A., Babu C. S. New multilevel inverter topology with reduced number of switches using advanced modulation strategies. *2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, Dindigul, India. 2013, pp. 693–699. DOI: 10.1109/ICPEC.2013.6527745.
14. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1981, vol. IA-17, no. 5, pp. 518–523. DOI: 10.1109/TIA.1981.4503992.
15. Bouamrane O., Khalili T., Tyass I., Rafik M., Raihani A., Bahati L., Benhala B. Flying capacitors multilevel inverter: architecture, control and active balancing. *E3S Web of Conferences*. 2022, vol. 336. DOI: 10.1051/e3sconf/202233600039.
16. Gaikwad A., Arbune P. A. Study of cascaded H-Bridge multilevel inverter. *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, Pune, India. 2016, pp. 179–182. DOI: 10.1109/ICACDOT.2016.7877574.
17. Kapustin A. V., Schurov N. I. An Overview of Main Multilevel Inverter Topologies. *Russian electrical engineering*. 2023, no. 5, pp. 43–48. [In Russ].
18. Burguete E., López J., Zabaleta M. New Five-Level Active Neutral-Point-Clamped Converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015, vol. 51, no. 1, pp. 440–447. DOI: 10.1109/TIA.2014.2334737.
19. Salcu S. I., Luoraş A. M., Szekely N. C., Bojan M., Rusu C. G., Fasolă G. I. Active Power Factor Compensation Based on a Geometric Phase Control Scheme. *2020 IEEE 11th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Dubrovnik, Croatia. 2020, pp. 130–135. DOI: 10.1109/PEDG48541.2020.9244319.
20. ElGebaly A. E., El-Wahab Hassan A., El-Nemr M. K. Reactive Power Compensation by Multilevel Inverter STATCOM for Railways Power Grid. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, Saint Petersburg and Moscow, Russia. 2019, pp. 2094–2099. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657058.
21. Terovanesov M. R., Litvinova E. A., Taranov S. V. The issues of compensation of reactive power. *Sbornik nauchnyh trudov Doneckogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2017, no. 47, pp. 4–10. [In Russ].
22. Jianyao H., Juan W., Hemeng P., Qi P., Qingli H. Application of fuzzy logic algorithm for optimization of control strategy in electric vehicles. *2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, Chongqing, China. 2017, pp. 2042–2045. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8054375.

23. Zherebkin B. V. Vector control system for traction electric drive of mining electric locomotives using fuzzy logic apparatus: Abstract of Candidate of Technical Sciences thesis, Sankt-Peterburg, 2005, 22 p. [In Russ].

24. Shonin O. B., Pronko V. S. Energy-efficient control of asynchronous motor drive with current refinement of the loss minimum on the basis of fuzzy logic. *Journal of Mining Institute*. 2016, no. 218, pp. 270–280. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Капустин Андрей Владимирович*<sup>1</sup> – аспирант, e-mail: andrey.kapustinnstu@yandex.ru;  
*Щуров Николай Иванович*<sup>1</sup> – заведующий кафедры «Электротехнические комплексы», доктор технических наук, профессор, e-mail: nischurov@mail.ru;

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

**Для контактов:** *Капустин А. В.*, e-mail: andrey.kapustinnstu@yandex.ru

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Kapustin A. V.*<sup>1</sup>, PhD student, e-mail: andrey.kapustinnstu@yandex.ru;

*Shchurov N. I.*<sup>1</sup>, Head of the department, Professor, e-mail: nischurov@mail.ru;

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

**Corresponding author:** *Kapustin A. V.*, e-mail: andrey.kapustinnstu@yandex.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 05.06.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 05.06.2023; accepted for printing 10.10.2023.

