

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА БАТАРЕЮ И ДВИГАТЕЛЬ АСИНХРОННОГО ПРИВОДА ШАХТНЫХ ГОРНОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Б.Ю. Васильев<sup>1</sup>, Т.Х. Нгуен<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: Vasilev\_BYu@pers.spmi.ru

**Аннотация:** В настоящее время наиболее перспективным видом транспорта в горнодобывающей промышленности считаются электрические горнотранспортные машины, питающиеся от аккумуляторной батареи. Несмотря на положительные эффекты от использования данных машин, их применение в горнодобывающей промышленности остается сопряженным с ограничениями. Одним из основных ограничений является то, что максимальный рабочий диапазон электрических горнотранспортных машин значительно ниже, чем у машин с двигателем внутреннего сгорания, из-за ограниченной емкости батареи и наличия гармоник асинхронного привода. Для решения проблемы негативных гармоник существуют два основных метода: применение активных фильтров и внедрение более эффективного типа полупроводниковых преобразователей и их системы управления. Проведены исследования различных типов полупроводниковых преобразователей, работающих в режиме инвертора напряжения, с помощью компьютерного моделирования Matlab Simulink. Приведено описание имитационных моделей асинхронного привода при подключении асинхронных двигателей к аккумуляторной батарее через двух- и трехуровневые автономные инверторы. Анализ полученных результатов показал, что, по сравнению с двухуровневым инвертором, при подключении двигателя к трехуровневому инвертору система обеспечивает более высокий уровень установившейся частоты вращения двигателя при работе под нагрузкой, при этом с меньшими коэффициентами искажений напряжений и токов двигателя, меньшими пульсациями напряжения и тока батареи. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований двигательной системы управления асинхронного привода.

**Ключевые слова:** активный фильтр, гармоническое искажение, автономный инвертор, векторная широтно-импульсная модуляция, имитационное моделирование, математическое описание, Matlab Simulink.

**Для цитирования:** Васильев Б. Ю., Нгуен Т. Х. Анализ влияния полупроводниковых преобразователей на батарею и двигатель асинхронного привода шахтных горнотранспортных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 9-1. – С. 299–318. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_299.

### Influence of semiconductor converters on asynchronous drive battery and motor in mining machines

B.U. Vasilev<sup>1</sup>, T.H. Nguyen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Vasilev\_BYu@pers.spmi.ru

---

**Abstract:** Currently, the most promising mode of transport in the mining industry is electric mining machines powered by accumulator batteries. Despite the benefits of the machines, their use in the mining industry remains limited. One of the main constraints is presented by the fact that the maximum operation range of the electric mining machines is much smaller than the combustion engine machines have, because of the limited capacity of batteries and owing to the synchronous drive harmonics. The problem connected with the negative harmonics is solved using two methods: application of active filters and introduction of more efficient semiconductor converters and their control. Different semiconductor converters operating in the mode of the voltage inverter are studied by way of computer modeling in Matlab Simulink. The simulation models of asynchronous drives switched to accumulator batteries via two- and three-level self-inclusive inverters are described. The analysis of the obtained results shows that, as against the two-level inverter, the drive switching to the three-level inverter ensures a higher steady-state rotational frequency of the drive in on-load operation at the lower voltage and current deflection ratios, and at the smaller voltage and current ripple. The obtained results can be used for the further research of the motor system of asynchronous drive control.

**Key words:** active filter, harmonic distortion, self-inclusive inverter, vector width-pulse modulation, simulation modeling, mathematical description, Matlab Simulink.

**For citation:** Vasilev B. U., Nguyen T. H. Influence of semiconductor converters on asynchronous drive battery and motor in mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023; (9-1):299-318. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_91\_0\_299.

---

## Введение

В настоящее время актуализируются вопросы разработки, внедрения и эксплуатации энергоэффективного оборудования горнодобывающих предприятий. Это обусловлено тем, что энергетическая составляющая в конечной стоимости продукции горнодобывающих предприятий имеет значительную величину [1–3]. Преобладающим видом топливно-энергетического ресурса является дизельное топливо, используемое на горнодобывающих предприятиях, которое необходимо для работы транспортных машин, например, шахтных погрузчиков и самосвалов. Несмотря на преимущества, такие как большая максимальная полезная нагрузка и простота в эксплуатации, со временем дизельные транспортные машины проявляют множество существенных недостатков. Главными недостатками этих машин являются низкая эф-

фективность, высокий уровень шума и вибрации, высокие уровни выбросов продуктов сгорания дизельного топлива и загрязнения окружающей среды, использование для работы огнеопасных жидкостей (дизельное топливо и горюче-смазочные материалы) [4].

Проблемы, упомянутые выше, становятся особенно серьезными по мере увеличения глубины добычи полезных ископаемых. Это приводит к увеличению затрат на работу системы вентиляции и возрастанию себестоимости продукции горнодобывающих предприятий. В некоторых шахтах во Вьетнаме с глубиной разработки более 300 м затраты на работу системы вентиляции могут превышать затраты на дизельное топливо [5].

Для повышения энергоэффективности горнодобывающих предприятий электрические горнотранспортные машины являются наиболее перспективными, так

как исключают затраты на дизельное топливо и горюче-смазочные материалы, снижают тепловыделение и уменьшают расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание. Это значительно снижает энергозатраты на работу системы вентиляции. Важной частью электрических горнотранспортных машин являются системы электродвижения. На данный момент на горнодобывающих предприятиях используются три основных способа энергообеспечения электрических горнотранспортных машин:

- с помощью силового кабеля;
- с помощью воздушной электрической линии;
- с помощью аккумуляторных батарей (АКБ).

Электрическая горнотранспортная машина, питающаяся от силового кабеля, требует специальной инфраструктуры, включая электростанции, кабели, системы эксплуатации и технического обслуживания. Такие машины подходят для объектов с относительно короткими расстояниями движения, так как при их перемещении в другую рабочую зону необходима специальная машина для их погрузки и транспортировки. Недостатком этого типа машин является ограниченный рабочий диапазон, который зависит от длины силового кабеля. Кроме того, силовой кабель легко повреждается во время движения или при запутывании в препятствиях. Поэтому во избежание аварий на определенной территории может работать только одна машина. Примеры машин, питающихся от силового кабеля: TORO LH514BE, EST-1030 и TORO 400E [5].

Электрическая горнотранспортная машина, питающаяся от воздушной электрической линии, подходит для местностей с возможностью установки воздушной электрической линии сети, например, при добыче полезных ископаемых открытым способом или внутри крупных

шахт и рудников. Недостатком этого типа машин является ограниченная маневренность и высокие капитальные затраты, так как данные машины могут передвигаться только вдоль воздушной электрической линии. Примеры машин, питающихся от воздушной электрической линии сети: Hitachi EH3500ACII и БЕЛАЗ-7530E [5].

Электрическая горнотранспортная машина, питающаяся от АКБ, имеет много преимуществ, таких как маневренность, меньшая потребность в техническом обслуживании. Данная машина подходит для подземных горных работ, где требования к вентиляции и защите окружающей среды имеют первостепенное значение. Недостатком этого типа машин является, по сравнению с другими машинами, меньшая максимальная грузоподъемность и малый запас хода. Другими недостатками являются большой вес батарей и их стоимость.

Примеры машин, питающихся от АКБ: Volvo HX-02, БЕЛАЗ-7558E и Cat R1700 XE [5].

### **Постановка исследования**

Электрические горнотранспортные машины, питающиеся от АКБ, считаются наиболее перспективным типом транспортных средств внутри шахт и рудников. Характерной чертой данных машин является то, что по сравнению с транспортными машинами, использующими двигатели внутреннего сгорания, они имеют менее сложную конструкцию, так как основным элементом электрических горнотранспортных машин, питающихся от АКБ, служит асинхронный привод, который состоит примерно из 20 деталей, а трансмиссия двигателя внутреннего сгорания той же грузоподъемности — почти из 2000 деталей [6, 7].

С другой стороны, при работе полупроводниковых преобразователей асинхронного привода возникают искажения

напряжения и тока из-за высокочастотной коммутации ключей (транзисторов) [8]. Эти искажения значительно снижают эффективное использование энергии батареи, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации электрических горнотранспортных машин [9–11]. Кроме того, батарея имеет ограниченную емкость.

Следовательно, перспективным направлением развития электрических горнотранспортных машин, питающихся от АКБ, является повышение времени их работы от батареи за счет снижения искажений напряжения и тока асинхронного привода. Существует два метода снижения искажений напряжения и тока асинхронного привода:

- первый метод заключается в использовании активных фильтров, установленных на выходной батарее. Использование активных фильтров обеспечивает высокую точность фильтрации [12]. Эти фильтры имеют большие возможности настройки и адаптации к различным задачам и способны фильтровать широкий диапазон частот, что позволяет использовать их в различных областях применения. Несмотря на преимущества, активные фильтры требуют использования дорогой электроники и привлечения специалистов для установки и обслуживания. Такое решение фильтрации высших гармоник может быть более дорогим, чем другие методы минимизации искажений. Кроме того, эти фильтры требуют сложной системы управления и настройки, которая может быть довольно сложной для инженеров в производстве и эксплуатации;

- второй способ является более простым и эффективным — внедрение более эффективного типа полупроводниковых преобразователей и их системы управления.

В данной статье рассматриваются два типа инвертора: двухуровневый и трех-

уровневый с применением алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции (ВШИМ). Алгоритмы ВШИМ рассмотрены в [13, 14].

Использованы методы математического моделирования в среде Matlab Simulink, основные теории электропривода для выбора типа автономного инвертора [15–17].

Цель статьи — проведение исследования различных типов полупроводниковых преобразователей, работающих в режиме инвертора напряжения, с помощью компьютерного моделирования и анализ полученных результатов на их основе. По результатам исследования предложенный вариант обеспечивает снижение искажений напряжения и тока асинхронного привода.

### Теоретические исследования

В асинхронных приводах широко используются двухуровневые автономные инверторы, которые состоят из следующих элементов:

- стойка инверторэто транзисторы, которые подключены к выходной фазе А, В, С;
- анодная группа ключей — это транзисторы, подключенные к положительной клемме батареи;
- катодная группа ключей — это транзисторы, подключенные к отрицательной клемме батареи.

Для математического описания данного инвертора примем следующие допущения математической модели АИ:

- время включения транзисторов равно нулю:  $T_{\text{вкл}} = 0$ ;
- время выключения транзисторов равно нулю:  $T_{\text{выкл}} = 0$ ;
- сопротивление транзисторов во включенном состоянии равно нулю:  $R_{\text{вкл}} = 0$ ;
- сопротивление транзисторов в выключенном состоянии равно бесконечности:  $R_{\text{выкл}} \rightarrow \infty$ .

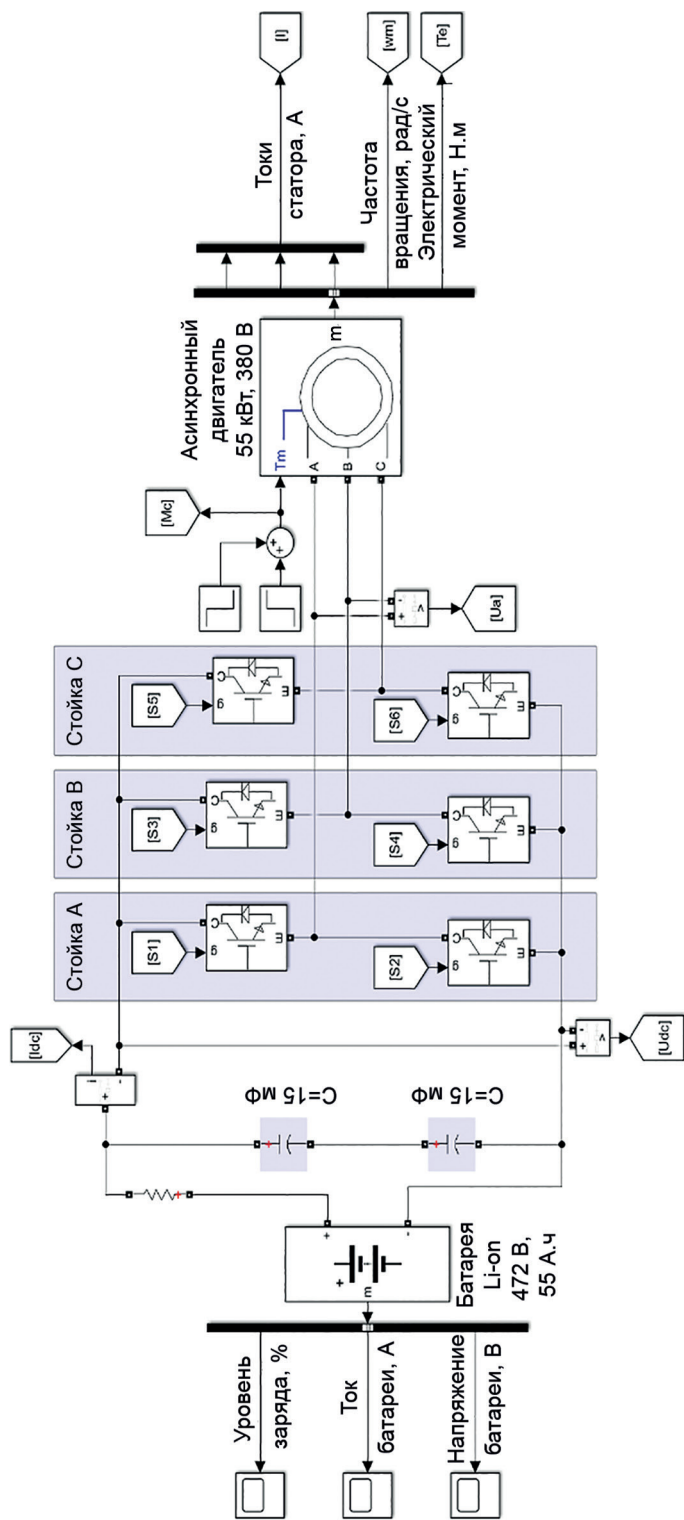


Рис. 1. Имитационная модель асинхронного привода с двухуровневым инвертором (составлено авторами)  
 Fig. 1. Simulation model of an asynchronous drive with a two-level inverter (compiled by the authors)

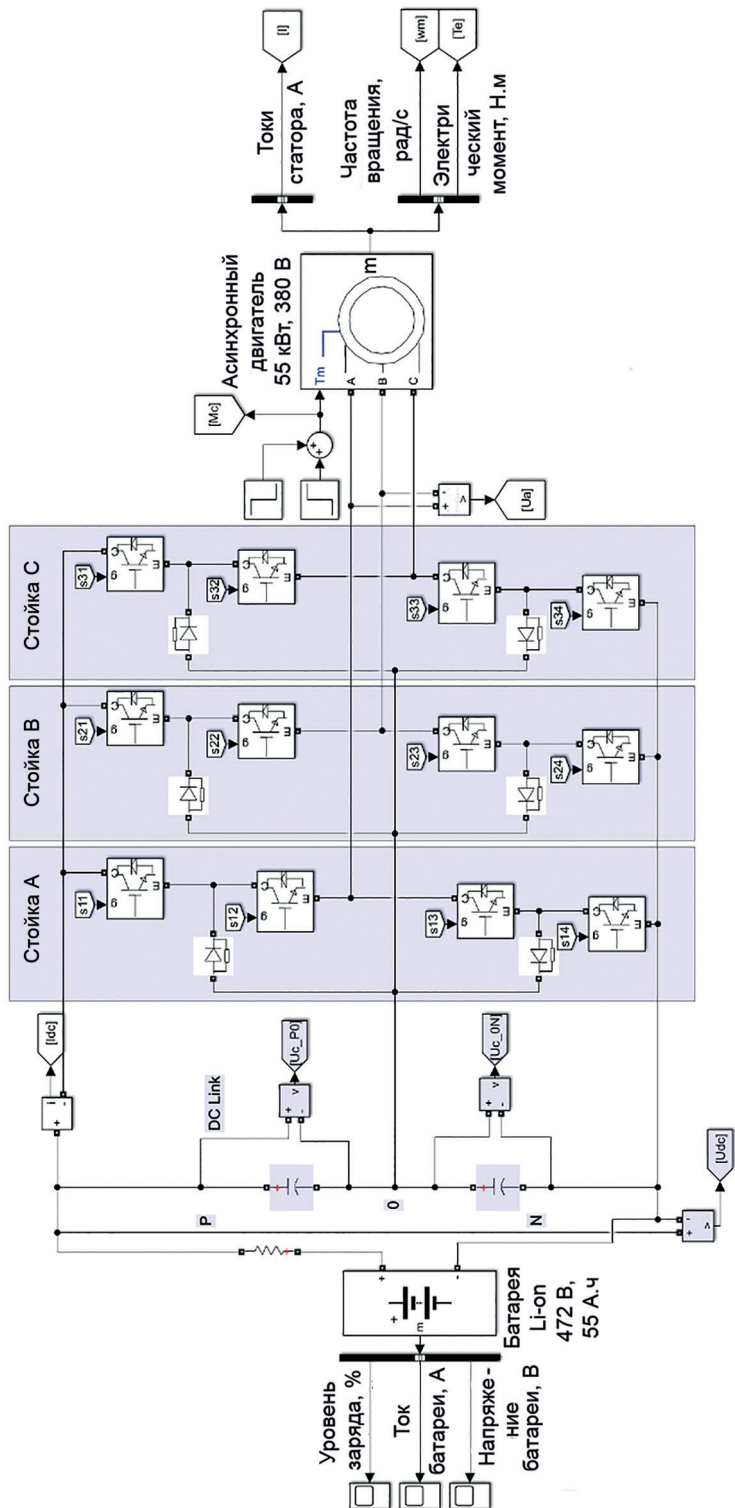


Рис. 2. Имитационная модель асинхронного привода с трехуровневым инвертором (составлено авторами)  
 Fig. 2. Simulation of an asynchronous electric drive system when connected to a three-level autonomous inverter (compiled by the authors)

Состояние транзистора ( $S$ ) определяется двумя величинами:

- $S = 1$ , если транзистор замкнут;
- $S = 0$ , если транзистор разомкнут.

Аналитические уравнения математической модели двухуровневого АИ с учетом изложенного выше можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} U_a &= \frac{1}{3} U_{dc} (+2S_A - S_B - S_C); \\ U_b &= \frac{1}{3} U_{dc} (-S_A + 2S_B - S_C); \\ U_c &= \frac{1}{3} U_{dc} (-S_A - S_B + 2S_C). \end{aligned} \quad (1)$$

где  $U_{dc}$  – постоянное напряжение на входе;  $U_a, U_b, U_c$  – выходные фазные напряжения;  $S_1, S_2$  – коммутационные функции транзисторов стоек фаз А;  $S_3, S_4$  – коммутационные функции транзисторов стоек фаз В;  $S_5, S_6$  – коммутационные функции транзисторов стоек фаз С;  $S_A, S_B, S_C$  – коммутационные функции стоек фаз А, В и С (см. рис. 1).

$$\begin{aligned} S_A &= 1, \text{ если } S_1 = 1 \text{ и } S_2 = 0; \\ S_A &= 0, \text{ если } S_1 = 0 \text{ и } S_2 = 1; \\ S_B &= 1, \text{ если } S_3 = 1 \text{ и } S_4 = 0; \\ S_B &= 0, \text{ если } S_3 = 0 \text{ и } S_4 = 1; \\ S_C &= 1, \text{ если } S_5 = 1 \text{ и } S_6 = 0; \\ S_C &= 0, \text{ если } S_5 = 0 \text{ и } S_6 = 1. \end{aligned}$$

Помимо схемы двухуровневого автономного инвертора, существует трехуровневый автономный инвертор с разделительными диодами.

В анодной и катодной группах автономного инвертора устанавливаются два последовательно соединенных конденсатора (см. рис. 2). Входное напряжение инвертора (PON) имеет точку с нулевым потенциалом (точка 0).

Разделительные диоды предназначены для подключения нулевой точки входного напряжения инвертора к точке соединения транзисторов анодной и катодной групп стоек автономного инвертора.

Аналитические уравнения математической модели трехуровневого АИ можно представить следующим образом:

- уравнения стоек фаз А, В и С:

$$\begin{aligned} U_1 &= U_{PO} \cdot S_{11} \cdot S_{12} - U_{ON} \cdot S_{13} \cdot S_{14}; \\ U_2 &= U_{PO} \cdot S_{21} \cdot S_{22} - U_{ON} \cdot S_{23} \cdot S_{24}; \\ U_3 &= U_{PO} \cdot S_{31} \cdot S_{32} - U_{ON} \cdot S_{33} \cdot S_{34}. \end{aligned} \quad (2)$$

- уравнения силового блока трехуровневого автономного инвертора:

$$\begin{aligned} U_a &= \frac{1}{3} (+2U_1 - U_2 - U_3); \\ U_b &= \frac{1}{3} (-U_1 + 2U_2 - U_3); \\ U_c &= \frac{1}{3} (-U_1 - U_2 + 2U_3). \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}$  – коммутационные функции транзисторов стоек фаз А (см. рис. 2);  $S_{21}, S_{22}, S_{23}, S_{24}$  – коммутационные функции транзисторов стоек фаз В;  $S_{31}, S_{32}, S_{33}, S_{34}$  – коммутационные функции транзисторов стоек фаз С;  $U_1, U_2, U_3$  – напряжения стоек А, В, С инвертора;  $U_a, U_b, U_c$  – выходные фазные напряжения;  $U_{PO}, U_{ON}$  – постоянные напряжения на анодной и катодной группах транзисторов.

$$U_{PO} = U_{ON} = \frac{1}{2} U_{dc}. \quad (4)$$

Таблица 1

**Технические характеристики асинхронного двигателя**  
**Asynchronous drive specifications**

№	Наименование	Значение
1	Номинальная мощность, Вт	55 000
2	Номинальное напряжение, В	380
3	Номинальная частота, Гц	50
4	Сопrotивление статора, Ом	0,12
5	Индуктивность статора, мГн	0,19
6	Сопrotивление ротора, Ом	0,4258
7	Индуктивность ротора, мГн	5,3
8	Взаимная индуктивность, мГн	51
9	Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	0,4
10	Число пар полюсов	2

Таблица 2

**Технические характеристики батареи и конденсатора**  
**Battery and capacitor specifications**

№	Наименование	Значение
1	Номинальное напряжение, В	472
2	Тип батареи	Li-ion
3	Емкость батареи, А.ч.	55
4	Сопротивление батареи, Ом	0,001
5	Емкость конденсатора, мФ	15
6	Частота несущего сигнала, Гц	2000

**Имитационное исследование в сфере Matlab Simulink**

Построение имитационных моделей асинхронных приводов в Matlab Simulink [18 – 22] (см. рис. 1 и 2).

Технические характеристики двигателя показаны в табл. 1.

Выполнение осциллографирования следующих переменных: частоты вращения; электрического момента; токов статора; линейного напряжения.

Технические характеристики батареи и конденсатора показаны в табл. 2.

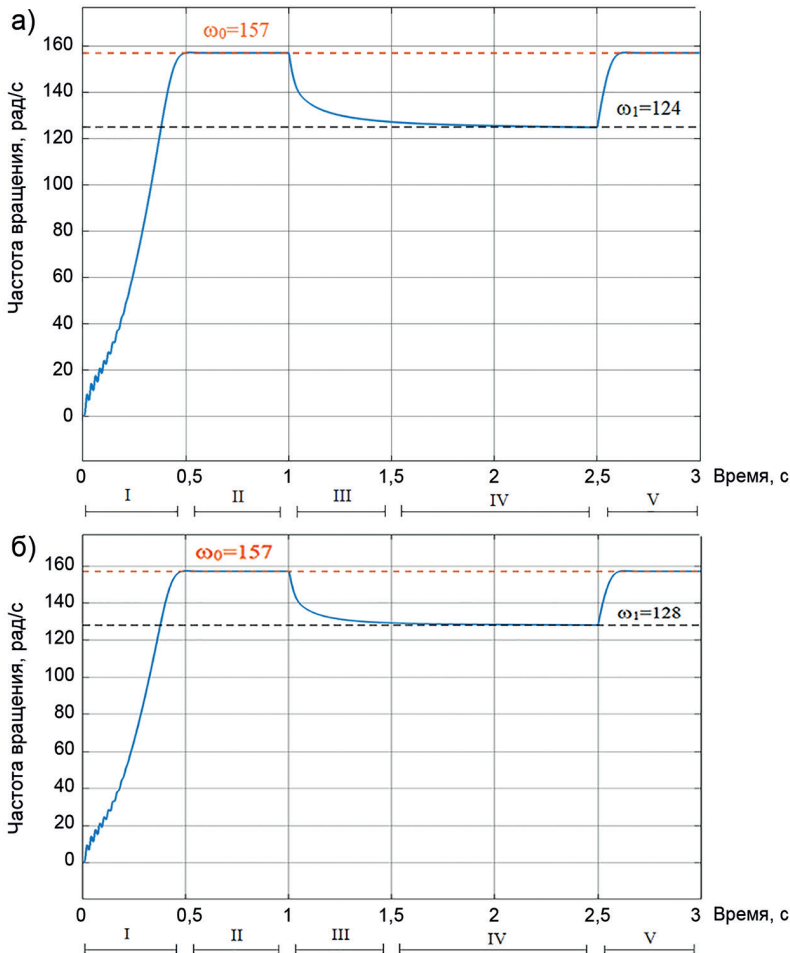


Рис. 3. Частота вращения: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 3. Rotation frequency: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)



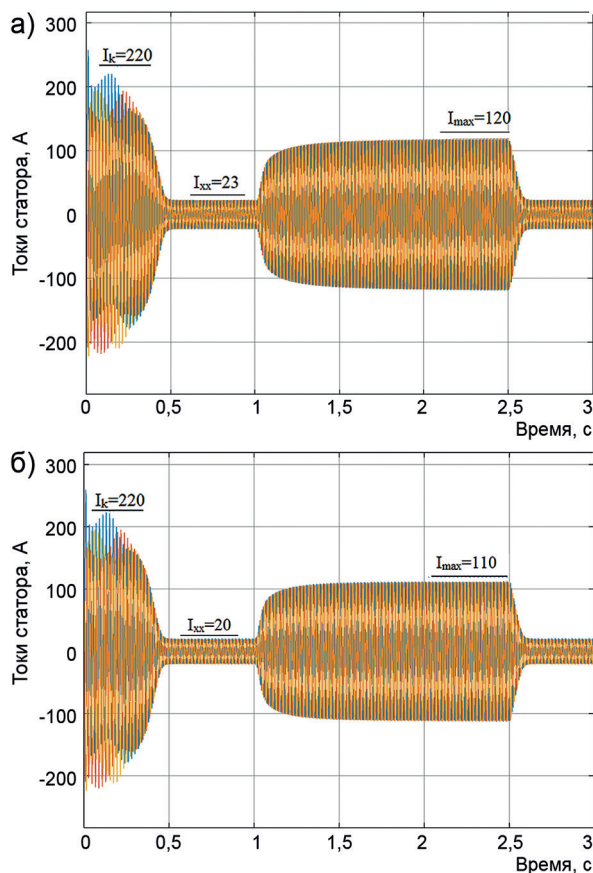


Рис. 4. Токи статора: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 4. Stator currents: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

Выполнение осциллографирования следующих переменных: уровня зарядки батареи; тока батареи; напряжения батареи.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчета частоты вращения, токов статора, электрического момента и линейного напряжения асинхронного электропривода при подключении его к различным типам инверторов представлены на рис. 3–6 (соответственно).

Результаты расчета уровня зарядки, тока и напряжения батареи представлены на рис. 11–13 (соответственно).

Анализ данных переменных асинхронного электропривода выполняется в следующие интервалы: прямой пуск двигателя без нагрузки (интервал I, время 0–0,5 с); работа двигателя без нагрузки в режиме холостого хода (интервал II, время 0,5–1 с); наброс нагрузки (интервал III, время 1–1,5 с); работа двигателя под нагрузкой (интервал IV, время 1,5–2,5 с); сброс нагрузки (интервал V, время 2,5–3 с).

Из рис. 3–5 видно, что время разгона двигателя без нагрузки (интервал I), работа двигателя без нагрузки в режиме холостого хода (интервал II) и сброс на-

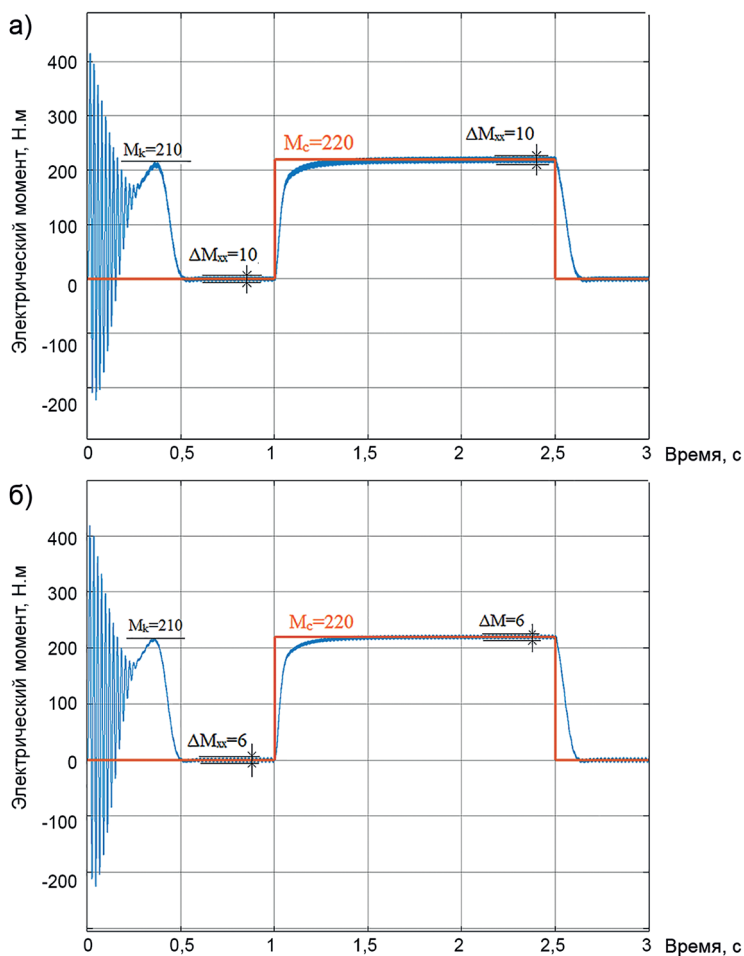


Рис. 5. Электрический момент: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)  
 Fig. 5. Electric moment: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

грузки (интервал V) имеют одинаковые параметры. Вне зависимости от типа инвертора разгон двигателя осуществляется за 0,5 с до установившейся частоты вращения двигателя, которая равна 157 рад/с.

Из осциллограмм частоты вращения видно, что при набросе нагрузки  $M_c = 220$  Н·м (интервал III) при подключении двигателя к трехуровневому инвертору данная система сокращает, по сравнению со случаем подключения двигателя к двухуровневому инвертору, время

стабилизации частоты вращения на 40% с повышением установившейся частоты вращения на 3% (интервал IV) (см. рис. 3).

Из осциллограмм токов статора видно, что при работе двигателя в режиме холостого хода ток статора при подключении двигателя к трехуровневому инвертору, по сравнению со случаем подключения двигателя к двухуровневому инвертору, уменьшается на 15%, а при работе под нагрузкой — на 9% (см. рис. 4).

Из осциллограмм электрического момента видно, что при подключении двигателя к двух- и трехуровневому инвертору критический момент АД имеет одинаковое значение. Однако при работе под нагрузкой подключение АД к трехуровневому инвертору имеет величину пульсации момента в 1,6 раза меньше (см. рис. 5).

В асинхронном двигателе преобладают потери мощности, которые возникают в обмотках ротора вращающегося вала [23]. Эти потери, в частности, зависят от частоты вращения вала двигателя.

Следовательно, увеличение частоты вращения двигателя приводит к уменьшению потери мощности, тем самым повышается КПД двигателя.

Таким образом, при подключении двигателя к трехуровневому инвертору, по сравнению со случаем подключения асинхронного двигателя к двухуровневому инвертору, повышается КПД двигателя.

Уровень (степень) совместимости преобразователя частоты с асинхронным двигателем определяется коэффициентами искажения формы напряжений и

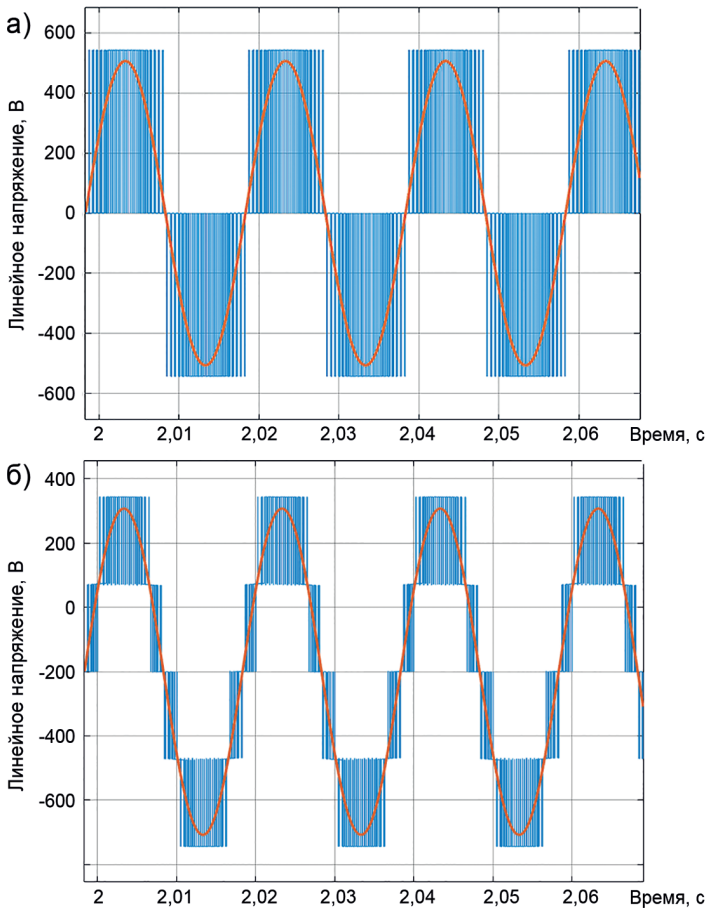


Рис. 6. Выходное напряжение: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 6. Output voltage: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

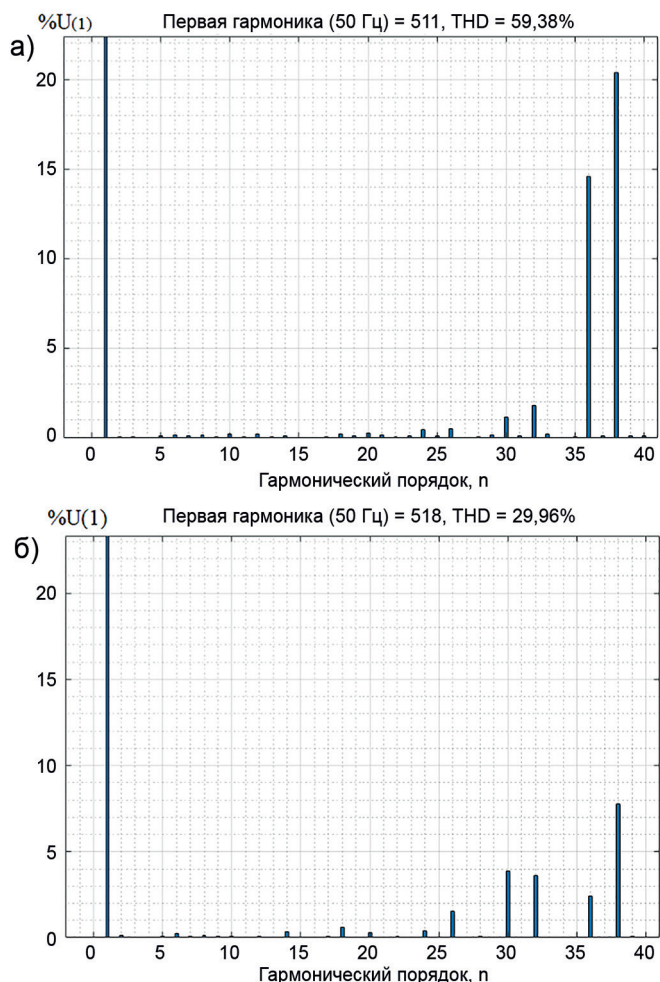


Рис. 7. Гармонический порядок: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 7. Harmonic order: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

токов, потребляемых статором двигателя. Для анализа уровня совместимости преобразователя частоты с асинхронным двигателем были построены осциллограммы напряжений и их коэффициентов искажений при работе под нагрузкой (рис. 6–8).

Из рис. 6–8 видно, что, по сравнению со случаем подключения двигателя к двухуровневому инвертору, подключение двигателя к трехуровневому инвертору улучшает качество линейного

напряжения (коэффициент искажений снижается в 1,9 раза).

С помощью конденсатора и алгоритма ВШИМ в данной системе отсутствуют 5-я, 7-я, 11-я и 13-я гармоники (рис. 7). Большинство гармоник напряжений находится в области, близкой к кратной частоте несущего сигнала  $f_{set} = 2000$  Гц (рис. 8).

Необходимо отметить, что гармонический состав выходного линейного напряжения автономного инвертора вы-

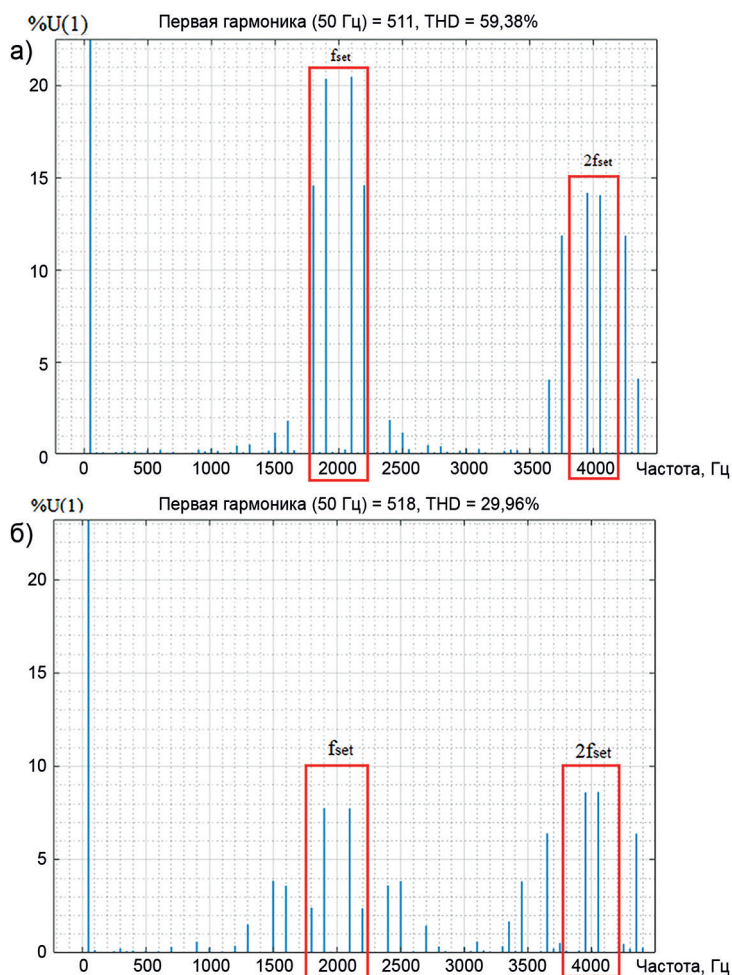


Рис. 8. Спектральный состав: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 8. Spectral composition: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

зывает искажения формы тока статора. Это может привести к увеличению потерь и снижению эффективности двигателя и батареи [24].

Для анализа влияния искажений линейных напряжений на ток статора были построены осциллограммы токов и их коэффициентов искажений (см. рис. 9 и 10).

Из осциллограмм токов и их спектрального состава видно, что ток статора и коэффициент искажения тока при

подключении двигателя к трехуровневому инвертору (соответственно 110 А и 0,76%) меньше, тем при подключении данного двигателя к двухуровневому инвертору (соответственно 115 А и 1,59%). Большинство гармоник токов также находится в области, близкой к кратной частоте несущего сигнала.

Наличие гармоник может вызвать различные негативные последствия для работы батарей, включая сокращение их срока службы, повышение рабочей

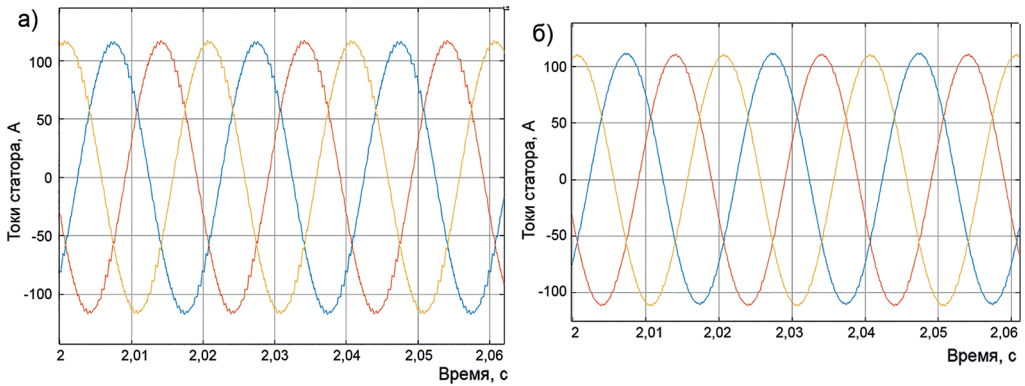


Рис. 9. Токи статора: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 9. Stator currents: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

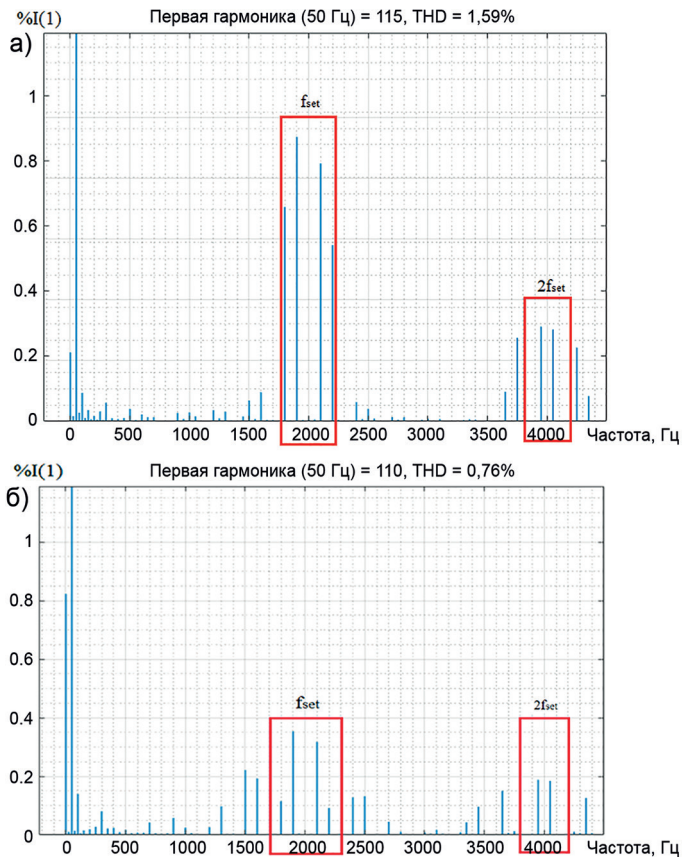


Рис. 10. Спектральный состав: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 10. Spectral composition: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

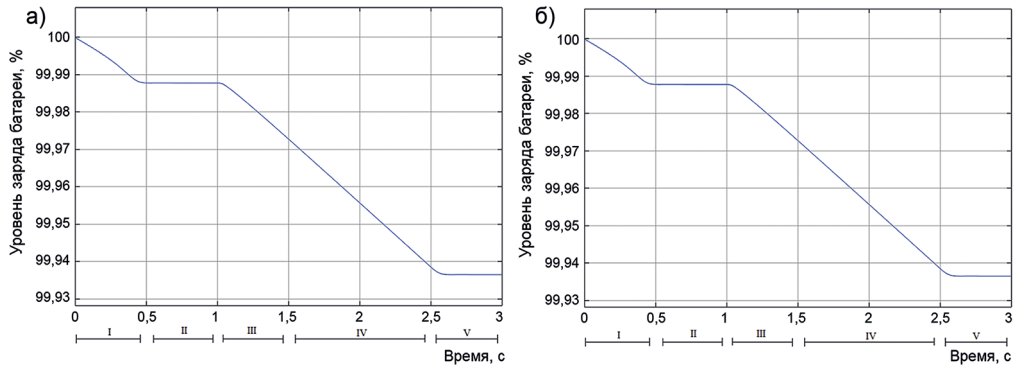


Рис. 11. Уровень зарядки батареи: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 11. State-of-charge: when the motor is connected to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

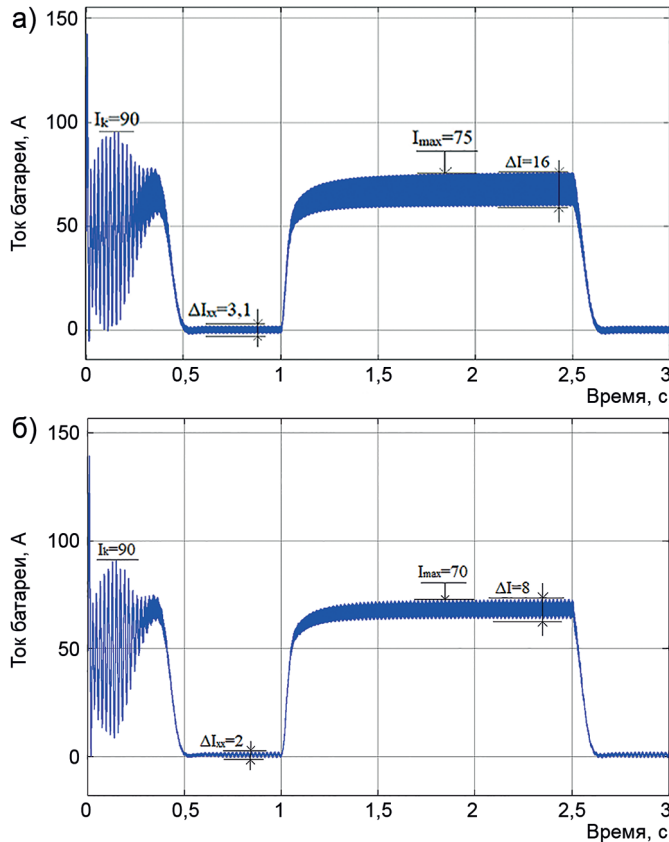


Рис. 12. Ток батареи: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 12. Battery current: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

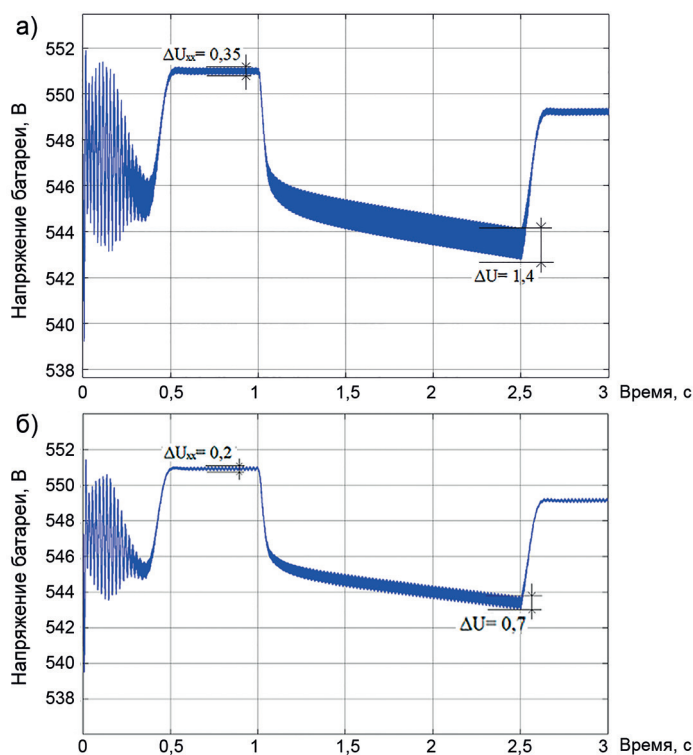


Рис. 13. Напряжение батареи: при подключении двигателя к двухуровневому инвертору (а); при подключении двигателя к трехуровневому инвертору (б) (составлено авторами)

Fig. 13. Battery voltage: when connecting the motor to a two-level inverter (a); when connecting the motor to a three-level inverter (b) (compiled by the authors)

температуры, повышенный саморазряд и снижение эффективности.

Для анализа влияния искажений линейных напряжений и токов на батарею были построены осциллограммы уровня заряда батареи (где 100% — батарея полностью заряжена), токов и напряжений батареи. Анализ данных осциллограмм также выполняется на пяти интервалах (рис. 11).

Из рис. 11 — 13 видно, что на интервалах I, II и V также имеются одинаковые параметры. Однако на интервалах III и IV при подключении двигателя к трехуровневому инвертору, по сравнению со случаем подключения двигателя к двухуровневому инвертору, обеспечивается уменьшение пульсации тока и напряжения при работе системы в ре-

жиме холостого хода в 1,5 раза и при работе под нагрузкой в 2 раза (см. рис. 12).

Пульсации тока и напряжения снижают способность батареи эффективно накапливать и распределять энергию. Этот пульсирующий ток также создает дисбаланс между положительными и отрицательными клеммами батареи, что может привести к снижению производительности батареи и сокращению срока службы батареи. Кроме того, пульсации тока и напряжения могут увеличить скорость саморазряда батареи, что приведет к увеличению потерь энергии при ее хранении.

Анализ осциллограммы рис. 13 показал, что напряжение батареи со временем постепенно снижается, что является одним из основных недостатков ис-



пользования Li-ion батарей. Кроме того, в пусковом режиме двигателя ток батареи может увеличиваться до 2 раз по сравнению с нормальным рабочим током (см. рис. 12), что может привести к искрению двигателя внутри шахт и рудников.

Эти недостатки также следует учитывать при проектировании и эксплуатации электрических горнотранспортных машин в горной промышленности.

### **Заключение**

Основной причиной неэффективной работы асинхронного привода электрических горнотранспортных машин, питающихся от АКБ, является наличие искажений напряжений и токов, уменьшение напряжения батареи по времени.

В статье описаны имитационные моделирования асинхронного привода

при подключении двигателя к различным типам полупроводниковых преобразователей, работающих в режиме инвертора напряжения. С помощью этих моделирований можно исследовать работу двигателя и батареи в различных процессах.

Установлено, что внедрение трехуровневого инвертора и алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции снижает искажения напряжения и тока в двигателе и батарее, что позволяет улучшить энергетическую и динамическую характеристики асинхронного привода.

В дальнейших исследованиях представляет интерес разработка входного сглаживающего устройства, которое обеспечит стабилизацию напряжения аккумуляторной батареи на необходимом уровне, и двигательной системы управления электроприводом.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Абрамович Б. Н., Богданов И. А.* Повышение эффективности автономных электро-технических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 408–416. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

2. *Лях Д. Д., Худякова И. Н., Иванов С. Л.* Обоснование параметров модуля формования торфяного сырья и энергомассовых характеристик комплекса оборудования по добыче и переработке торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 93–108. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_93.

3. *Абрамович Б. Н.* Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 31–40. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31.

4. *Козярук А. Е., Камышьян А. М.* Повышение энергетической эффективности электро-механической трансмиссии карьерного автосамосвала // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 576–582. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.

5. *Нгуен Т. Х., Васильев Б. Ю.* Анализ автономных роботизированных машин горного производства с автономными системами электродвижения // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 5 (163). – С. 59–69. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69.

6. *Ещин Е. К.* Расчеты динамических режимов работы электроприводов самоходных горных машин // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 534–538. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.534.

7. *Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В.* Электропривод современных шахтных подъемных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5-2. – С. 145–162. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_145.

8. *Шевырев Ю. В.* Улучшение качества электроэнергии при работе полупроводникового преобразователя частоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 171–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.

9. Сычев Ю. А., Аладын М. Е., Зимин Р. Ю. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 7. — С. 164–179. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_164.

10. Сычев Ю. А., Костин В. Н., Сериков В. А., Аладын М. Е. Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 1. — С. 159–179. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_159.

11. Сычев Ю. А., Зимин Р. Ю. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально-сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 132–140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.

12. Шевырев Ю. В., Шевырева Н. Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 66–69.

13. Nguyen T. H., Vasilev B. Y. Analysis of the impact of autonomous inverter control algorithms on the battery and motor / 2022 International Russian Automation Conference (Rus AutoCon), Sochi, Russian Federation. 2022, pp. 649–654. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896280.

14. Фролов В. Я., Жилиглов Р. И. Разработка системы бездатчикового векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 92–97. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92.

15. Борисов С. В., Колтунова Е. А., Кладиев С. Н. Совершенствование структуры имитационной модели тягового асинхронного электропривода рудничного электровоза. // Записки Горного института. — 2021. — Т. 247. — С. 114–121. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.

16. Zhukovskiy Yu. L., Vasilev B. Y., Korolev N. A., Malkova Y. M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit // Indonesian Journal of Science and Technology. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 65–78. DOI:10.17509/ijost.v8i1.51983.

17. Жданкин Е. В., Устинов Д. А. Имитационное моделирование активной накопительной системы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». — 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 52–58. DOI: 10.14529/power180406.

18. Ляхомский А. В., Фащиленко В. Н. Исследование энергоэффективного управляемого электромеханического резонанса для процессов резания и разрушения горного массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 10. — С. 223–234. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-223-234.

19. Дмитриева В. В., Собынин А. А., Сизин П. Е. Моделирование различных режимов торможения ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11. — С. 80–95. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_80.

20. Бабицкий Д. Ю., Никулин Р. О. Энергоэффективный тяговый электропривод переменного тока и исследование его модификации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 34–46. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_34.

21. Котин Д. А., Сухинин С. Е., Иванов И. А. Сравнение различных видов пуска электрического двигателя ленточного конвейера угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 12-2. — С. 129–142. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_129.

22. Галкин В. И., Сазанкова Е. С. Влияние физико-механических свойств на пусковые процессы ленточных конвейеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 56. — С. 19–35.

23. Минакова Т. Е., Маларев В. И., Коржев А. А. Метод распознавания режимов работы асинхронных электродвигателей горных производств по субгармоническим параметрам //

Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 11. — С. 96–108. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_96.

24. Малафеев С. И., Малафеев С. С. К анализу энергетических процессов в питающей сети при работе карьерного экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3. — С. 126–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137. **MIAB**

## REFERENCES

1. Abramovich B. N., Bogdanov I. A. Improving the efficiency of autonomous electrical complexes of oil and gas enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 408–416. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.10.

2. Lyakh D. D., Khudyakova I. N., Ivanov S. L. Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 93–108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_6\_0\_93.

3. Abramovich B. N. Uninterruptible power supply system for mining industry enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 229, pp. 31–40. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31.

4. Kozyaruk A. E., Kamyshyan A. M. Improving the Energy Efficiency of the Electromechanical Transmission of an Open-pit Dump Truck. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 576–582. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.

5. Nguyen T. H., Vasiliev B. Yu. Analysis of autonomous robotic mining machines with autonomous electric propulsion systems. *Mining equipment and electromechanics*. 2022, no. 5 (163), pp. 59–69. [In Russ]. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-5-59-69.

6. Eshchin E. K. Calculations of dynamic operating modes of electric drives of self-propelled mining machines. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 233, pp. 534–538. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2018.5.534.

7. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevryev Yu. V. Electric drive of modern mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5-2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_145.

8. Shevryev Yu. V. Power quality improvement in operation of semiconductor frequency converter. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 171–178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.

9. Sychev Y. A., Aladin M. E., Zimin R. Y. Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 164–179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_7\_0\_164.

10. Sychev Yu. A., Kostin V. N., Serikov V. A., Aladin M. E. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 1, pp. 159–179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_1\_0\_159.

11. Sychev Y. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 132–140. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.

12. Shevryev Yu. V., Shevryeva N. Yu. Improvement of the voltage form in the power supply systems of enterprises of the mineral resource complex with an active rectifier. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 66–69. [In Russ].

13. Nguyen T. H., Vasilev B. Y. Analysis of the impact of autonomous inverter control algorithms on the battery and motor. 2022 *International Russian Automation Conference (Rus AutoCon)*, Sochi, Russian Federation. 2022, pp. 649–654. DOI: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896280.

14. Frolov V. Ya., Zhiligitov R. I. Development of sensorless vector control system for permanent magnet synchronous motor in Matlab Simulink. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 229, pp. 92–97. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.92.

15. Borisov S. V., Koltunova E. A., Kladijev S. N. Traction asynchronous electric drive of mine electric locomotivesimulation model structure improvement. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 114–121. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.12.

16. Zhukovskiy Yu. L., Vasilev B. Y., Korolev N. A., Malkova Y. M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit. *Indonesian Journal of Science and Technology*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 65 – 78. DOI:10.17509/ijost.v8i1.51983.

17. Zhdankin E. V., Ustinov D. A. Imitation modeling of active electricity storage system. *Bulletin of the South Ural state university. Series: Power engineering*. 2018, vol. 18, no. 4, pp. 52 – 58. [In Russ]. DOI: 10.14529/power180406.

18. Lyakhomsky A. V., Fashchilenko V. N. Development of energy-efficient controlled electro-mechanical resonance for processes of cutting and shattering of rock massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 10, pp. 223 – 234. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-223-234.

19. Dmitrieva V. V., Sobyenin A. A., Sizin P. E. Modeling of various modes of belt conveyor braking. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 80 – 95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_80.

20. Babitsky D. Yu., Nikulin R. O. Energy-efficient ac electric traction drive and study about its modification. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12-2, pp. 34 – 46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_34.

21. Kotin D. A., Sukhinin S. E., Ivanov I. A. Comparison of different types of starting the belt conveyor of the coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12-2, pp. 129 – 142. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_12\_0\_129.

22. Galkin V. I., Sazankova E. S. Influence of physical and mechanical properties on the starting processes of belt conveyors. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2014, no. S6, pp. 19 – 35. [In Russ].

23. Minakova T. E., Malarev V. I., Korzhev A. A. Method to identify operating regimes of asynchronous drivers by subharmonic parameters in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 11, pp. 96 – 108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_96.

24. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Analyzing energy processes in power line of operating open-pit excavator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3, pp. 126 – 137. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-3-0-126-137.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васильев Богдан Юрьевич<sup>1</sup> – канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: Vasilev\_BYu@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-4018-0507,

Нгуен Тхе Хиен<sup>1</sup> – аспирант,  
e-mail: s215000@stud.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-7539-0002,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

**Для контактов:** Васильев Б.Ю., e-mail: Vasilev\_BYu@pers.spmi.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

B.U. Vasilev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
e-mail: Vasilev\_BYu@pers.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-4018-0507,

T.H. Nguyen<sup>1</sup>, Graduate Student,  
e-mail: s215000@stud.spmi.ru,  
ORCID ID: 0000-0002-7539-0002,

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University,  
199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** B.U. Vasilev, e-mail: Vasilev\_BYu@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 14.03.2023; получена после рецензии 27.06.2023; принята к печати 10.08.2023.  
Received by the editors 14.03.2023; received after the review 27.06.2023; accepted for printing 10.08.2023.