ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(2):171-178
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.314:622 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Ю.В. Шевырев

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: uvshev@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрено улучшение качества электроэнергии в случае применения преобразователя частоты для регулирования скорости асинхронного электропривода горных машин и установок. Применение многопульсных схем выпрямителя в составе преобразователя частоты уменьшает искажения формы напряжения в точке присоединения полупроводникового преобразователя частоты к сети. Выполнены расчеты суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения для 6-пульсной и 12-пульсной схем выпрямителя в составе преобразователя частоты. 12-пульсная схема выпрямителя значительно улучшает форму линейного тока в питающей линии 6 кВ по сравнению со случаем 6-пульсной схемы выпрямителя. Уровень высших гармоник заметно влияет на величину потерь мощности и падения напряжения в питающей линии горного предприятия. Наибольшие потери мощности и падение напряжения в линии имеют место для 6-пульсной схемы выпрямления. Подключение полупроводниковых преобразователей к питающей сети через специальный трехфазный сетевой реактор способствует уменьшению влияния преобразователей друг на друга. Получены зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения в линии от нагрузки при отсутствии и наличии реактора. В сетях горных предприятий со значительным содержанием высших гармоник необходимо применение фильтро-компенсирующих устройств. При выполнении условия обеспечения нормативного коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения сети применяют простые конденсаторные установки с антирезонансными реакторами. Применение антирезонансных реакторов в конденсаторных установках обеспечивает защиту конденсаторов от высших гармоник и позволяет уменьшить уровень высших гармоник до приемлемой величины. Для регулирования коэффициента мощности частотно-регулируемого электропривода, реализации обмена энергией с питающей сетью, получения формы сетевого тока, близкой к синусоиде, рекомендуется использование активных выпрямителей напряжения.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, потери мощности, падение напряжения, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, искажение синусоидальной формы напряжения, сетевой реактор, фильтро-компенсирующее устройство, активный выпрямитель.

Для цитирования: *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.

Power quality improvement in operation of semiconductor frequency converter

Yu.V. Shevyrev

National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia, e-mail: uvshev@yandex.ru

© Ю.В. Шевырев. 2020.

Abstract: Improvement of power quality by speed adjustment of asynchronous motors of mining machines and plants using frequency converters is discussed. Multi-pulse rectifies of frequency converters reduce voltage distortion at the connection point of the semiconductor frequency converter and electric main. The total rate of the harmonic voltage components are calculated for 6-pulse and 12-pulse rectifiers of frequency converters. The circuit of 12-pulse rectifies improves considerably the current path in the main of 6 kV as against 6-pulse circuit. The level of the higher harmonics noticeably influences the loss of power and voltage in the mine main. The highest power and voltage losses in the main are typical of 6-pulse rectifier. The connection of the semiconductor converters to the main via a special three-phase impedance coil weakens the cross-effect of the converters. The curves of the total rate of the harmonic voltage components on the line load with and without the coil are obtained. The mine mains with high content of higher harmonics need filtering and compensating devices. Given the rated voltage waveform distortion factor, simple capacitor assemblies with anti-resonance impedance coils are used. The anti-resonance impedance coils protect capacitor assemblies from higher harmonics and lower their level to an admissible value. For the control of the phase factor of the variable frequency drive, for the power interchange with the main and for generating the sinusoid current waveform, it is recommended to use active voltage rectifiers.

Key words: variable frequency drive, power loss, voltage loss, total rate of harmonic voltage components, sinusoidal voltage waveform distortion, impedance coil, filtering and compensating device, active rectifier.

For citation: Shevyrev Yu. V. Power quality improvement in operation of semiconductor frequency converter. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(2):171-178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.

Введение

Одним из основных направлений энергосбережения является переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому, дающий значительный эффект как в части экономии электроэнергии, так и в совершенствовании самого технологического процесса с точки зрения производительности и оптимального использования сырья и энергии.

С целью энергосбережения в настоящее время практически на всех горных предприятиях внедряются частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. Применение частотных преобразователей позволяет добиться экономии электроэнергии, уменьшить расходы на эксплуатацию, повысить надежность работы оборудования, увеличить срок службы двигателей и механизмов, повысить производительность, реализовать интеллектуальные системы управления электроприводами [1—3]. Однако широкое использование частотных преобразователей приводит к существенному отклонению формы напряжения в электрических сетях от синусоидальной [4—6]. Искажение синусоидальной формы кривой напряжения увеличивает потери мощности $P_{\wedge}$ и отклонение напряжения $U_{\wedge}$ в линии, от которой питается полупроводниковый частотный преобразователь.

В статье рассмотрены некоторые способы улучшения синусоидальной формы напряжения сети, доказавшие свою эффективность на практике: применение многопульсных схем, сетевых реакторов, пассивных фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), активных выпрямителей напряжения (АВН).

Приведены результаты расчетов, позволяющие оценить рассматриваемые способы повышения качества электроэнергии. Все расчеты были выполнены при помощи специально разработанных компьютерных программ, учитывающих свойства ПЧ и системы электроснабжения [7].

Многопульсные схемы

Применение многопульсных схем выпрямления способствует уменьшению искажения синусоидальной формы напряжения в точке присоединения к электрической сети преобразователя частоты. Пульсность схемы равна количеству пульсаций выпрямленного напряжения за один период частоты питающей сети. Примером 6-пульсной схемы является трехфазная мостовая схема Ларионова. Схемы с большей пульсностью (например 12-, 24-, 36-пульсные схемы) получают на основе нескольких схем Ларионова.

Для количественной оценки влияния на форму напряжения сети были выполнены расчеты суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U для 6-пульсной и 12-пульсной схем выпрямителя в составе преобразователя частоты.

На рис. 1 приведено сравнение результатов моделирования для 12-пульсной схемы и для 6-пульсной схемы в виде графиков зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U от нагрузки P — активной мощности электроприводов. Значение мощности берется в процентах от номинального значения. Величина K_U определялась в точке присоединения питающего трансформатора 6/0,66 кВ к сети 6 кВ.

Наличие 6-пульсной схемы выпрямителя вызывает увеличение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U по сравнению со случаем 12-пульсной схемы выпрямления. При больших нагрузках он превышает предельно допустимое значение 8% на стороне 6 кВ (ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения») по сравнению со случаем 12-пульсной схемы. На рис. 2 и 3 показаны полученные на модели графики линейных токов в линии 6 кВ при 6-пульсной и 12-пульсной схемах выпрямления.

Сравнение рис. 2 и рис. 3, где показаны графики линейных токов в линии 6 кВ, позволяет сделать вывод, что существующая 12-пульсная схема выпрямителя значительно улучшает форму линейного тока в питающей линии 6 кВ по сравнению со случаем 6-пульсной схемы выпрямителя.

Необходимо особо отметить, что уровень высших гармоник заметно влияет на величину потерь мощности $P_Л$ и падения напряжения $U_Л$ в линии 6 кВ. Иллюстрацией сказанного являются графики зависимостей потерь мощности $P_Л$ и падения напряжения $U_Л$ в линии 6 кВ от нагрузки P для 6-пульсной и 12-пульсной схем, представленные на рис. 4 и 5. Анализ данных графиков позволяет сделать следующие выводы.

Наибольшие потери мощности $P_Л$ и падение напряжения $U_Л$ в линии 6 кВ имеют место для 6-пульсной схемы выпрямления. По сравнению со случаем

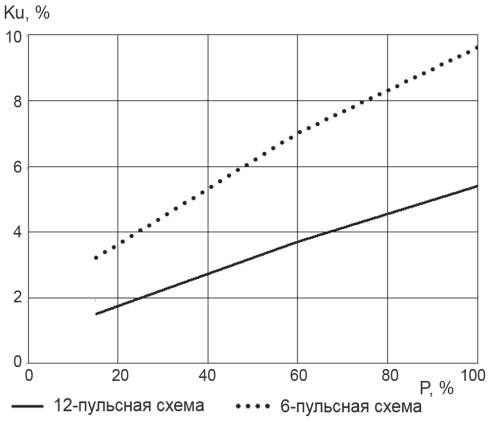

Рис. 1. Графики зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U от нагрузки P для 6-пульсной и 12-пульсной схем

Fig. 1. Total rate of harmonic voltage components, K_U, versus load in 6-pulse and 12-pulse rectifiers

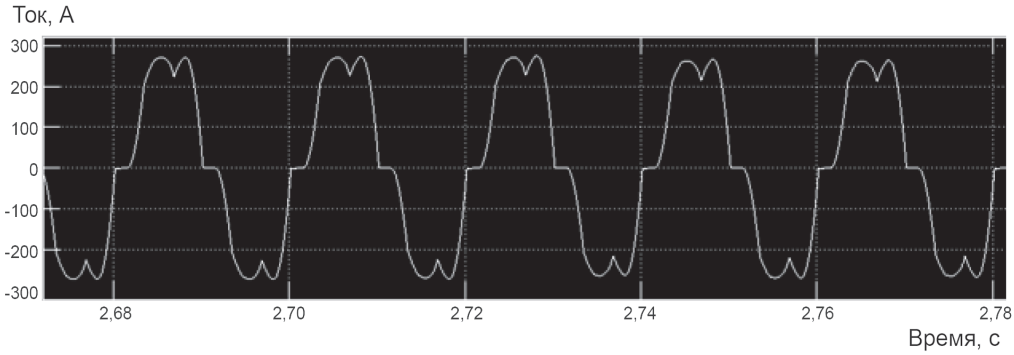

Рис. 2. Линейный ток в линии 6 кВ при нагрузке 100% и 6-пульсной схеме выпрямителя
Fig. 2. Linear current in 6 kV main at the 100% load and with 6-pulse rectifier

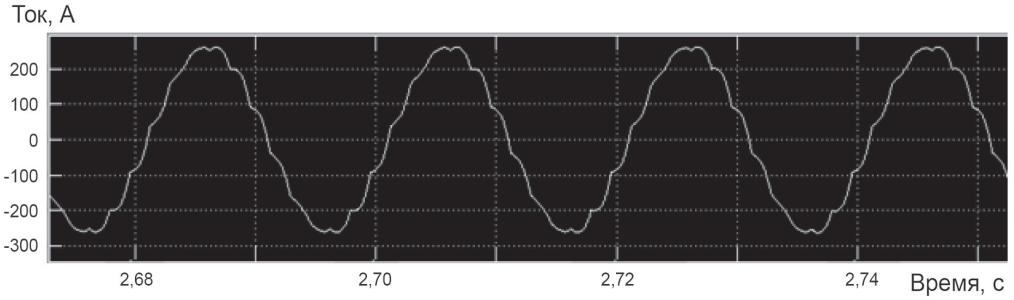

Рис. 3. Линейный ток в линии 6 кВ при нагрузке 100% и 12-пульсной схеме выпрямителя
Fig. 3. Linear current in 6 kV main at the 100% load and with 12-pulse rectifier

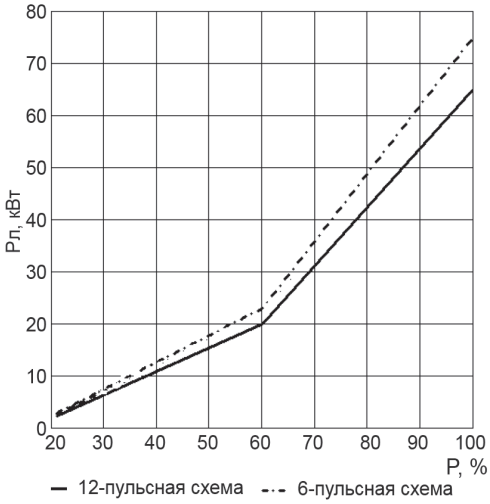

Рис. 4. Графики зависимостей потери мощности $P_л$ в линии 6 кВ от нагрузки Р для 6-пульсной и 12-пульсной схем
Fig. 4. Power loss P_l in 6 kV main versus load P in case of 6-pulse and 12-pulse rectifiers

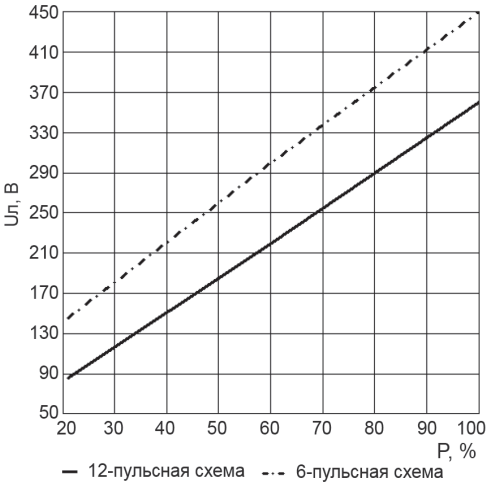

Рис. 5. Графики зависимостей падения напряжения $U_л$ в линии 6 кВ от нагрузки Р для 6-пульсной и 12-пульсной схем
Fig. 4. Voltage drop U_l in 6 kV main versus load P in case of 6-pulse and 12-pulse rectifiers

12-пульсной схемы потери возрастают на 5 кВт и падение напряжения увеличивается на 40 В.

Применение сетевых реакторов. Для снижения влияния преобразователей частоты друг на друга при их питании от одного трансформатора, уменьшения перенапряжения при коммутации, снижения уровня высших гармоник в питающей сети, обеспечения надежной работы ПЧ в случае существенного отклонения формы напряжения сети от синусоидальной следует обязательно подключать ЧРЭП к питающей сети через сетевой реактор L_p [7].

Сравнение результатов моделирования для 12-пульсной схемы при отсутствии сетевых реакторов L_p и при их включении в виде графиков зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в линии 6 кВ от нагрузки P приведено на рис. 6. Включение сетевого реактора приводит к уменьшению коэффициента K_U.

Пассивные фильтро-компенсирующие устройства [8—11]. Наличие многопульсных схем и сетевых реакторов в электрических сетях при большом содержании высших гармоник, которые генерируются преобразователями частоты, не решает в полной мере задачу улучшения формы напряжения сети. Поэтому в данном случае следует включать пассивные фильтро-компенсирующие устройства (ФКУ). ФКУ позволяют обеспечить как компенсацию реактивной мощности на основной частоте, так и фильтрацию высших гармоник напряжения. ФКУ рекомендуется подключать к узлу, от которого питается преобразователь частоты.

В составе ФКУ параллельно включенные ступени, которые настроены на фильтрацию нижнего спектра канонических высших гармоник. Они генерируются частотными преобразователями (v = 5, 7, 11, 13). Ступени ФКУ представляют собой последовательно соединенные конденсаторы и реакторы, являющиеся резонансными LC-цепочками, одновременно генерируя емкостной ток основной частоты в сеть.

Следует отметить, что полная фильтрация высших гармоник на практике отсутствует. Их необходимо снизить до

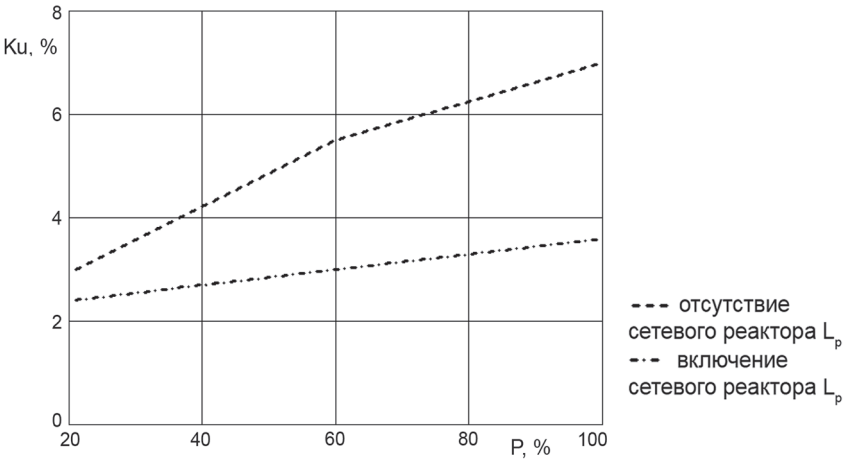

Рис. 6. Графики зависимостей суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U в линии 6 кВ от нагрузки P для 12-пульсной схемы при отсутствии сетевого реактора L_p и его наличии

Fig. 6. Total rate of harmonic voltage components, K_U, in 6 kV main versus load P for 12-pulse rectifier with and without impedance coil L_p

значений, определяемых согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия.

Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Поэтому, если ФКУ обеспечивает допустимый суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения сети при отклонениях частоты сети и параметров ФКУ от расчетных, то чтобы получить допустимый уровень гармоник напряжения сети в этом случае, можно применить более простые схемы ФКУ. Поэтому рекомендуется применение конденсаторных установок с антирезонансными реакторами в случае получения нужного уровня высших гармоник при их включении.

Конденсаторные установки с антирезонансными реакторами. Данные устройства представляют собой конденсаторные установки со ступенчатым регулированием реактивной мощности.

Отдельные ступени установки подключаются быстродействующими тиристорными ключами к сети, что позволяет ступенчато регулировать реактивную мощность [12]. Наличие в составе ФКУ антирезонансных реакторов со смещенной резонансной частотой относительно частоты канонической гармоники позволяет защитить конденсаторы от высших гармоник. Чтобы избежать резонанса токов, в электрической сети должны отсутствовать гармоники с частотами ниже резонансной частоты ФКУ.

Реакторы, кроме защиты конденсаторов, уменьшают искажения синусоидальной формы напряжения.

Выбор реакторов осуществляется по величине коэффициента расстройки $p = (X_L / X_c)100\%$, который равен отношению индуктивного и емкостного сопротивлений на основной частоте сети.

Коэффициент расстройки зависит от резонансной частоты ступени ФКУ в соответствии со следующим выражением:

$$\nu_p = 50 \cdot \sqrt{\frac{100}{p\%}}.$$

Обычно ступени ФКУ настраиваются на следующие резонансные частоты: 134, 189 и 210 Гц, при которых коэффициенты расстройки равны соответственно 14%, 7% и 5,67%.

Применение преобразователей частоты с активным выпрямителем напряжения [13, 14] является перспективным методом повышения качества электроэнергии при работе ЧРЭП. Активный выпрямитель напряжения (АВН) выполнен на полностью управляемых полупроводниковых приборах (силовые транзисторы и т.п.).

Алгоритмы управления полупроводниковыми элементами обеспечивают требуемые показатели качества электроэнергии, что позволяет получить коэффициент мощности, близкий к единице, и допустимый суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения сети. АВН реализуют обмен энергией между преобразователем частоты и питающей сетью, что существенно повышает энергетические показатели приводов горных машин и установок.

Примерами применения ЧРЭП с активным выпрямителем в горной промышленности могут служить экскаваторы и карьерные автосамосвалы [15], где реализация режима рекуперации энергии в сеть может обеспечить заметную экономию электроэнергии.

Заключение

Применение многопульсных схем уменьшает искажения синусоидальной формы напряжения. Подключение полупроводниковых преобразователей к питающей сети на горных предприятиях необходимо через сетевой реактор, чтобы уменьшить взаимное влияние полупроводниковых преобразователей, питающихся от одного трансформатора.

При наличии в электрических сетях горных предприятий высших гармоник необходимо применение фильтрокомпенсирующих устройств.

Применение антирезонансных реакторов в конденсаторных установках обеспечивает защиту конденсаторов от высших гармоник и позволяет уменьшить уровень высших гармоник до приемлемой величины.

Активные выпрямители напряжения в составе частотных преобразователей повышают качество электроэнергии на горных предприятиях и снижают потребление электроэнергии для горных машин и механизмов с ЧРЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров А. Н., Семенов А. С., Харитонов Я. С., Федоров О. В.* Анализ эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в условиях алмазодобывающих предприятий // Горный журнал. — № 2. — 2019. — С. 77—82.

2. *Копылов К. Н., Кубрин С. С., Решетняк С. Н.* Повышение уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты // Горный журнал. — № 4. — 2019. — С. 85—89.

3. *Blagodarov D. A., Dulnev N. N., Safonov Y. M., Fedortsov N. N., Kostin A. A., Kryukov O. V.* Intelligent control of electric machine drive systems / X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk, Russia, 3—6 Oct. 2018. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571670. 13.12.2018 IEEE Xplore Digital Library.

4. *Суслов М. А., Чуриков А. М., Шевырев Ю. В.* Улучшение показателей качества электроэнергии в нефтепромысловых сетях / Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. Т. 2. — Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. — С. 177—182.

5. *Milesevic B., Uglešić I., Filipovic-Grcic B.* Power quality analysis in electric traction system with three-phase induction motors // Electric Power Systems Research. 2016. Vol. 138. Pp. 172—179.

6. *Boudebbouz O., Boukadoum A., Medoued A.* Effective electric power quantities and the sequence reference frame. A comparison study // Electric Power Systems Research. 2016. Vol. 140. Pp. 485—492.

7. *Онищенко Г. Б.* Теория электропривода. — М.: ООО Образование и исследование, 2013. — 352 с.

8. *Шевырев Ю. В., Шевырева Н. Ю., Плехов А. С., Титов Д. Ю.* Применение компьютерных моделей для выбора регуляторов качества электроэнергии при работе электроприводов с полупроводниковыми преоразователями. — Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. — 180 с.

9. *Добрусин Л. А.* Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники. — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2003. — 84 с.

10. *Жежеленко И. В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 264 с.

11. *Ziad M. Ali, Faisal Q. Alenezi, Sameh S. Kandil, Shady H. E. Abdel Aleem* Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in nonsinusoidal power systems // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2018. Vol. 103. Pp. 660—675.

12. *Шевырева Н. Ю.* Влияние на качество электроэнергии ступенчатого фильтро-компенсирующего устройства при работе буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 1. — С. 408—415.

13. *Yoon John* Motors, drives, and HVAC efficiency // Consulting — Specifying Engineer. 2016. No 1. Pp. 50—63.

14. *Pollefliet J.* Power Electronics: Drive Technology and Motion Control. London: Academic Press, 2017. 412 p.

15. *Козярук А. Е.* Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. — 2019. — № 3. — С. 33—37. ГИАБ

REFERENCES

1. Egorov A.N., Semenov A.S., Kharitonov Ya.S., Fedorov O.V. Efficiency of variable frequency drive in diamond mining. *Gornyy zhurnal*, no 2. 2019, pp. 77—82. [In Russ].

2. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Improvement of energy efficiency and safety in coal longwalls. *Gornyy zhurnal*, no 4. 2019, pp. 85—89. [In Russ].

3. Blagodarov D.A., Dulnev N.N., Safonov Y.M., Fedortsov N.N., Kostin A.A., Kryukov O.V. Intelligent control of electric machine drive systems. *X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. Novocherkassk, Russia, 3—6 Oct. 2018. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571670. 13.12.2018 IEEE Xplore Digital Library.

4. Suslov M.A., Churikov A.M., Shevyrev Yh.V. Improving electricity quality indicators in oil field networks. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. T. 2 [Proceedings of the VIII International (XIX all-Russian) conference on automated electric drive AEP-2014. Vol. 2], Saransk, Izd-vo Mordovskogo un-ta, 2014, pp. 177—182. [In Russ].

5. Milesevic B., Uglešić I., Filipovic-Grcic B. Power quality analysis in electric traction system with three-phase induction motors. *Electric Power Systems Research*. 2016. Vol. 138. Pp. 172—179.

6. Boudebbouz O., Boukadoum A., Medoued A. Effective electric power quantities and the sequence reference frame. A comparison study. *Electric Power Systems Research*. 2016. Vol. 140. Pp. 485—492.

7. Onishchenko G.B. *Teoriya elektroprivod* [Theory of electric drive], Moscow, OOO Obrazovanie i issledovanie, 2013, 352 p.

8. Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu., Plekhov A.S., Titov D.Yu. *Primenenie komp'yuternykh modeley dlya vybora regulyatorov kachestva elektroenergii pri rabote elektroprivodov s poluprovodnikovymi preorazovatelyami* [The use of computer models for the selection of electric power quality regulators when operating electric drives with semiconductor converters], Nizhniy Novgorod, NGTU im. R.E. Alekseeva, 2018, 180 p.

9. Dobrusin L.A. *Fil'trokompensiruyushchie ustroystva dlya preobrazovatel'noy tekhniki* [Filter-compensating devices for converting equipment], Moscow, NTF «Energoprogress», 2003, 84 p.

10. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises], Moscow, Energoatomizdat, 1994, 264 p.

11. Ziad M. Ali, Faisal Q. Alenezi, Sameh S. Kandil, Shady H.E. Abdel Aleem Practical considerations for reactive power sharing approaches among multiple-arm passive filters in non-sinusoidal power systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2018. Vol. 103. Pp. 660—675.

12. Shevyreva N.Yu. Influence on the quality of electric power of a step-down filter-compensating device when operating drilling rigs with variable-frequency electric drives. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no 1, pp. 408—415. [In Russ].

13. Yoon John Motors, drives, and HVAC efficiency. *Consulting — Specifying Engineer*. 2016. No 1. Pp. 50—63.

14. Pollefliet J. *Power electronics: drive technology and motion control*. London: Academic Press, 2017. 412 p.

15. Kozyaruk A.E. Modern effective electric drives of production and transport mechanisms. *Elektrotekhnika*. 2019, no 3, pp. 33—37. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шевырев Юрий Вадимович — д-р техн. наук, профессор,
НИТУ «МИСиС», e-mail: uvshev@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yu.V. Shevyrev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: uvshev@yandex.ru,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 30.04.2019; получена после рецензии 25.09.2019; принята к печати 20.01.2020.
Received by the editors 30.04.2019; received after the review 25.09.2019; accepted for printing 20.01.2020.