ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(6):168-180
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622:621.31 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_168

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

А.В. Ляхомский[1], С.Н. Решетняк[1], Е.Н. Кутепова[1]

[1] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: reshetniak@inbox.ru

Аннотация: Представлены результаты исследования по оценке влияния показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты. Обоснована актуальность оценки влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования в электротехническом комплексе угольной шахты высокой производительности. Это обусловлено значительным увеличением числа оборудования, использующего в системах электропривода преобразовательную нагрузку, которое генерирует высшие гармонические составляющие напряжения и тока, негативно влияющие на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты. Что приводит: к нарушению номинальных режимов работы основного технологического оборудования снижая его производительность; вызывает ложные срабатывания защит от аварийных режимов в системе электроснабжения, приводящие к простоям оборудования; сокращает срок службы электрооборудования, включая кабельных линий из-за повышенного износа изоляции что увеличивает риск возникновения аварийных ситуаций, что является недопустимым, особенно в условиях угольных шахт опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Предложено использование в этих целях метод имитационного моделирования с помощью программного продукта Matlab и декомпозиционного анализа электротехнических систем для исследования влияния преобразовательной нагрузки на показатели качества электроэнергии, применительно к системам электроснабжения угольных шахт. Предложена синтезированная имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты с целью исследования генерации высших гармонических составляющих. На основе экспериментального исследования в условиях угольных шахт и имитационного моделирования генерации высших гармонических составляющих установлены закономерности, позволяющие выполнять оценку влияния суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению на отклонение напряжения в электротехническом комплексе угольной шахты.

Ключевые слова: угольная шахта, система электроснабжения, электротехнический комплекс, высшие гармонические составляющие, моделирование, показатели качества электроэнергии, суммарный коэффициент гармонических искажений по напряжению, отклонение напряжения, эффективность функционирования.

Для цитирования: *Ляхомский А. В., Решетняк С. Н., Кутепова Е. Н.* Оценка влияния показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 6. – С. 168–180. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_168.

© А.В. Ляхомский, С.Н. Решетняк, Е.Н. Кутепова. 2025.

Influence of power quality factors on performance efficiency of electrotechnical systems of coal mines

A.V. Lyakhomsky[1], S.N. Reshetnyak[1], E.N. Kutepova[1]

[1] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: reshetniak@inbox.ru

Abstract: The article describes assessment of influence exerted by power quality on performance efficiency of an electrotechnical system of a coal mine. It is substantiated to be relevant to evaluate the influence of higher harmonics on the performance efficiency of the electrotechnical system of a high-capacity coal mine. This is governed by an increase in the quantity of equipment with the converter loads in electrical drives, which generates higher current and voltage harmonics that affect the performance efficiency of the electrotechnical systems of coal mines. Such impact: leads to disturbance of rated duty of the main process equipment and decreases its production capacity; induces false response of emergency protection modes in power supply systems, which brings downtime of equipment and reduces its service life, including excessive wear of insulation of cable lines. The latter elevates the risk of accidents, which is intolerable in coal mines where hazard of gas and dust outbursts is very high. It is proposed to use the combination of Matlab-based simulation modeling and decomposition analysis of electrotechnical systems to study influence of a converter load on quality of electric power in power supply systems of coal mines. A synthesized simulation model of a coal mine power supply system is presented for the analysis of generation of higher harmonics. The experimental research carried out in coal mines and the simulation modeling of generation of higher harmonics revealed some consistent patterns which allow assessment of influence exerted by total harmonic voltage distortion on voltage distortion in electrotechnical systems of coal mines.

Key words: coal mine, power supply system, electrotechnical system, higher harmonics, modeling, power quality factors, total harmonic voltage distortion, voltage distortion, operating benefit.

For citation: Lyakhomsky A.V., Reshetnyak S.N., Kutepova E.N. Influence of power quality factors on performance efficiency of electrotechnical systems of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(6):168-180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_6_0_168.

Введение

Развитие добычи угля подземным способом вызвало необходимость внедрения новых технологических схем, которые потребовали современных технические средства их реализации. Это привело к увеличению мощности выемочной, подготовительной и транспортной техники, систем управления, защиты и информатизации [1—3].

Электроэнергия составляет до 70—80% в энергетическом балансе угольной шахты. Широкое применение технологического оборудования с использованием регулируемых систем управления электроприводами на основе преобразовательных устройств вносит значительные искажения в питающую сеть, посредством генерации высших гармонических составляющих (ВГС) напряжения и тока. Это приводит к ложным срабатываниям защит, нарушению режимов работы, простоям технологического оборудования, снижению его производительности, сокращается срок службы электрооборудования и кабельных линий за счет интенсивного старения изоляции и, как следствие этого, повы-

шается вероятность аварий, что является недопустимым, особенно в условиях угольных шахт, опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Интенсивное внедрение высокопроизводительных выемочных и проходческих комплексов, транспортных средств вызывает естественную необходимость внедрения устройств с нелинейной (преобразовательной) нагрузкой большой мощности, что негативно сказывается на качестве электрической энергии [4—6].

Наличие повышенного уровня высших гармонических составляющих влияет на устойчивость системы электроснабжения, непрерывность технологического процесса и безопасность эксплуатации электрооборудования. Это объясняет необходимость приведения ВГС к нормативным значениям, что возможно на основе управления их уровнем. В связи с этим назрела необходимость методологического обеспечения управления уровнем ВГС, для которого целесообразен мониторинг показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в условиях функционирования электротехнических комплексов угольных шахт, особенно высокопроизводительных. Это позволит установить режимы генерирования и способы рационализации ВГС в реальных условиях эксплуатации, что, в свою очередь, позволит выявить закономерности влияния качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнических систем (ЭТС).

Вопросам повышения эффективности функционирования электротехнических систем предприятий горнодобывающей промышленности, в последнее время, уделяется большое внимание как отечественными исследователями [7—10], так и зарубежными [11—13]. Вместе с тем, исследований режимов генерирования и снижения негативного влияния высших гармонических составляющих в электротехнических системах угольных шахт в аспекте разработанности проблемы недостаточно.

Вопросам влияния ВГС электрической энергии на эффективность работы оборудования выполнено значительное количество исследований для условий общепромышленных предприятий, в том числе по разработке устройств снижения негативного влияния ВГС (фильтров и контроллеров) [14—16]. В научных трудах [17, 18] сформулированы основные положения теории исследования высших гармонических составляющих в электрических сетях, также рассмотрены электромагнитные процессы, возникающие при этом помехи и возможности снижения их влияния на электрическую сеть в условиях общепромышленных предприятий.

При всей своей общности процессов технического и экономического характера система электроснабжения угольной шахты обладает специфическими качествами, связанными с высокой пространственно-временной динамичностью, близостью электрооборудования к технологическим зонам, значительной интенсивностью использования оборудования, неоднородностью и неопределенностью производственных процессов, сложностью и интенсивным воздействием внешней окружающей среды.

Основная часть

Исследование схемных решений систем электроснабжения угольных шахт высокой производительности, в условиях основных угледобывающих бассейнов Российской Федерации и Республики Казахстан, позволил определить наиболее распространенную структуру представленную на рис. 1. В состав структуры входят следующие элементы: ГПП — главная понизительная подстанция; ППП — подстанции потребителей поверхности; ПУ — подъемные установки (скиповая, клетьевая); ГВУ —

главные вентиляционные установки; ЦПП — центральная подземная подстанция; РП — распределительные пункты (подземная часть системы электроснабжения угольной шахты); ТП — трансформаторные подстанции (подземные, участковые). Питания потребителей как на поверхности, так и в подземных условиях, осуществляется от ГПП, на которую поступает высокое напряжение (35 кВ, 110 кВ) от энергосистемы и трансформируется в уровень напряжения 6 кВ. Именно этот уровень напряжения является основным при транспортировке электроэнергии до конечных потребителей (участков) угольной шахты. В соответствии со структурой электроснабжения, часть электроэнергии транспортируется по кабельным линия проложенным в стволах шахты, а часть электроэнергии транспортируется по воздушным линиям, а далее по кабельным линиям в скважинах, расположенных на флангах шахтного поля. Это позволяет снизить потери электроэнергии подземными потребителями расположенным на большом расстоянии от ЦПП угольной шахты. При использовании трехобмоточных трансформаторов на ГПП транспортировка электроэнергии осуществляется уровнем напряжения 35 кВ, рядом со скважинами устанавливаются трансформаторные подстанции для понижения уровня напряжения 6 кВ и дальнейшей его транспортировки подземным потребителям расположенных на флангах шахтного поля.

Для исследования влияния генерации ВГС потребителей с преобразовательной нагрузкой поверхности угольной шахты предложено декомпозировать систему электроснабжения на определенные участки, гальванически не связанные между собой [19].

На рис. 2 представлена декомпозиция системы электроснабжения угольной шахты.

Согласно предложенному решению в системе электроснабжения имеется три уровня:

- первый уровень — система внешнего электроснабжения, включающие коммутационные аппараты и первичные обмотки силовых трансформаторов ГПП;
- второй уровень — вторичные обмотки силовых трансформаторов, кабельные и воздушные линии от вторичных обмоток силовых трансформаторов до первичных обмоток энергопоездов высокопроизводительных участков угольных шахт, первичные обмотки трансформаторных подстанций энергопоездов высокопроизводительных участков угольных шахт, потребители поверхности угольной шахты с преобразовательной нагрузкой, кабельные и воздушные линии от потребителей преобразовательной нагрузки поверхности до шин ГПП, коммутационные аппараты;
- третий уровень — вторичные обмотки трансформаторов участков угольных шахт, кабельные линии в пределах высокопроизводительных участков, питающих преобразовательную нагрузку, потребители участков с преобразовательной нагрузкой, коммутационные аппараты.

Анализ показал, что именно второй уровень декомпозиции системы электроснабжения угольной шахты будет рассмотрен в дальнейших исследованиях, так как уровень напряжения 6 кВ является наиболее распространенным в сетях, как на поверхностном комплексе, так и в подземных условиях.

В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование процессов генерации и распространения высших гармонических составляющих на показатели качества электроэнергии [20].

В качестве метода расчета использовалось численное моделирование распространения высших гармонических

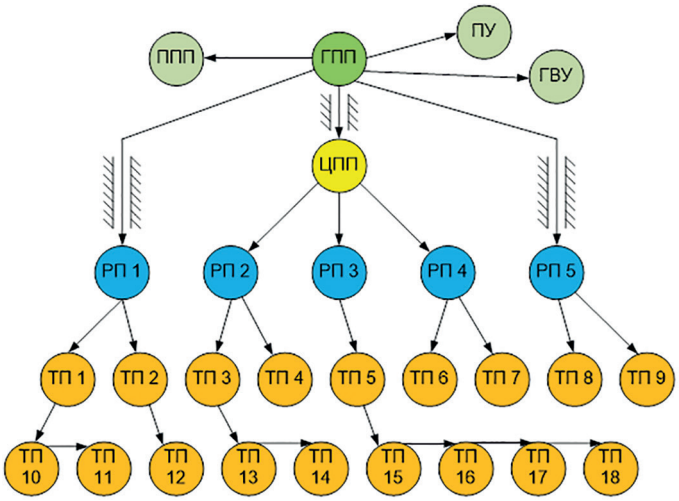

Рис. 1. Структура электроснабжения угольной шахты
Fig. 1. The structure of the coal mine power supply

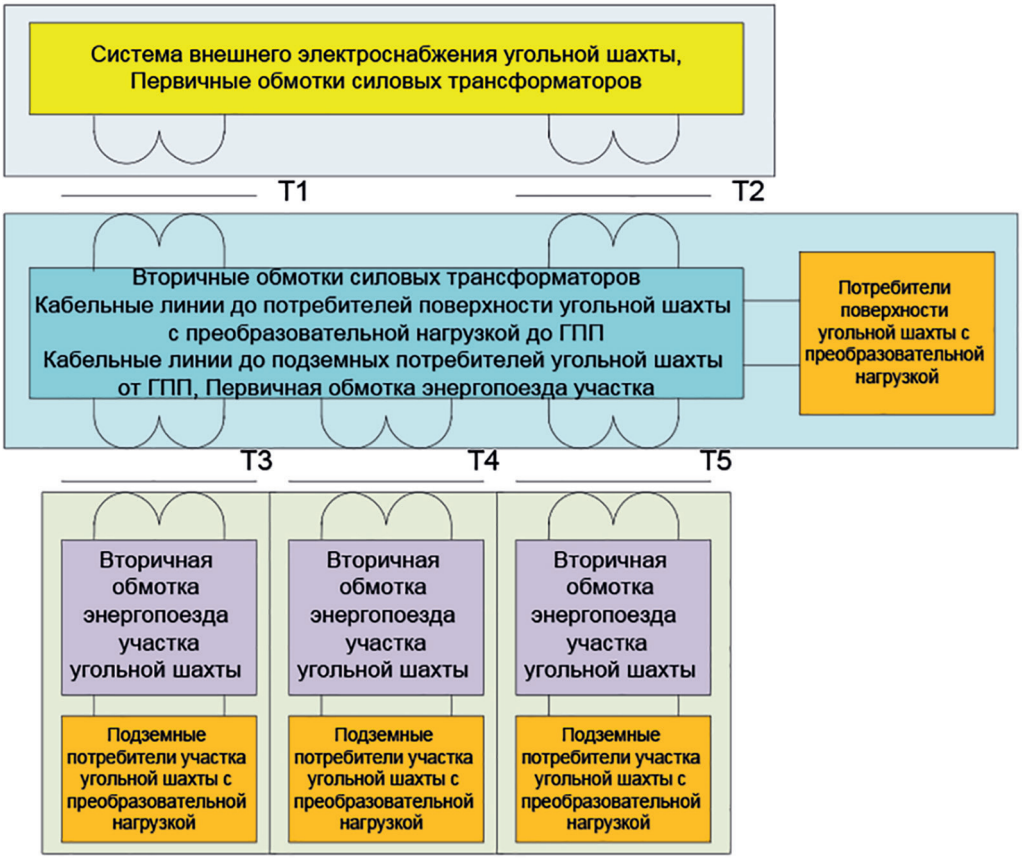

Рис. 2. Декомпозиция системы электроснабжения угольной шахты
Fig. 2. Decomposition of the coal mine power supply system

составляющих в системе электроснабжения угольных шахт.

Имитационное моделирование системы электроснабжения угольной шахты выполнено с использованием программного продукта Matlab, в частности использовались директории Simulink, SimScape. На рис. 3 представлена имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты для оценки влияния высших гармонических составляющих на эффективность функционирования электротехнического комплекса.

Имитационная модель состоит из двух источников напряжения, высоковольтных линий электропередачи с распределенными параметрами по активному и реактивному сопротивлению, измерительных блоков и осциллографов, позволяющих измерить осциллограммы токов и напряжений, а также уровни параметра суммарного коэффициента напряжения (K_U) и тока и (K_I). В модели имеется ряд высоковольтных коммутационных аппаратов, которые имитируют работу высоковольтных выключателей и секционных высоковольтных выключателей. Также присутствует ряд нагрузок: линейная нагрузка, которая имитирует технологическое оборудование без преобразовательных устройств, либо с устройствами незначительной мощности, влиянием которых на питающую сеть незначительно и им можно пренебречь; ряд подсистем, которые имитирует оборудование отдельных технологических единиц. Таких как: главные вентиляционные установки (ГВУ 1, ГВУ 2); шахт-

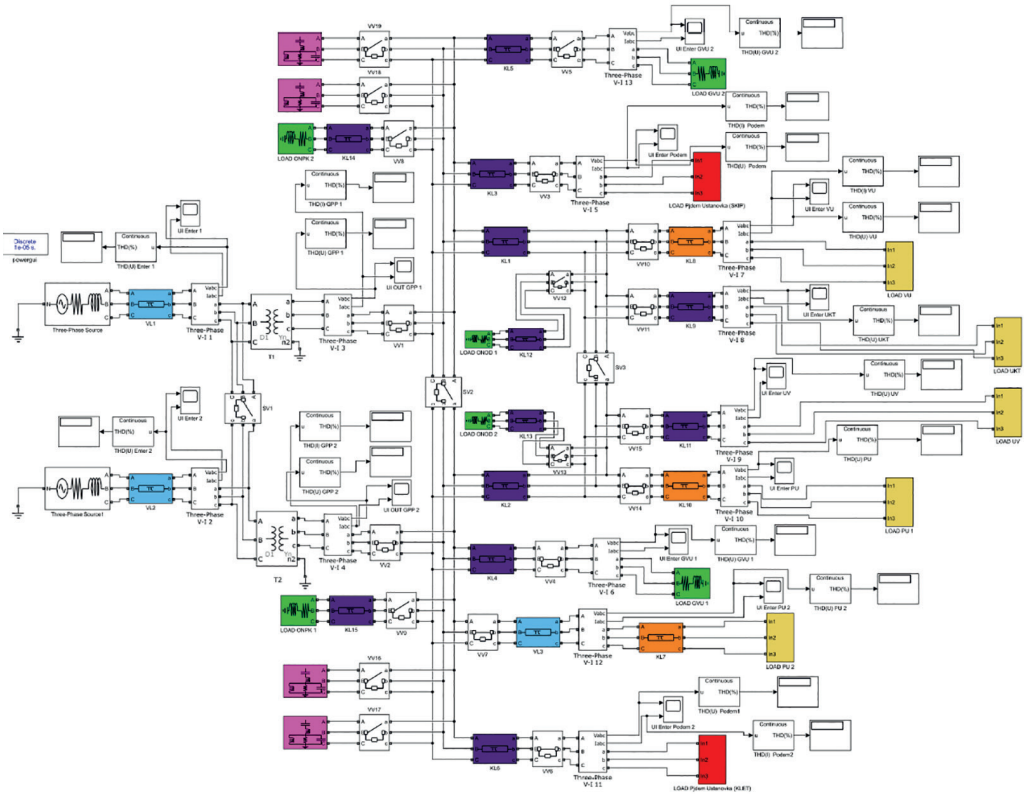

Рис. 3. Имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты
Fig. 3. Simulation model of the coal mine power supply system

Таблица 1

Результаты моделирования ПКЭ в системе электроснабжения угольной шахты при различных значениях отношения мощности линейной и преобразовательной нагрузки (δP)
Simulation results of the PCE in the coal mine power supply system at different values of the linear and converter load power ratio (δP)

Моделирование ПКЭ		
K_u, %	$\lvert\delta U\rvert$, %	δP, о.е.
3,96	0,77	0,1
7,35	4,72	0,2
10,45	6,66	0,3
13,33	8,61	0,4
16,04	10,88	0,5
18,62	12,53	0,6
21,07	13,35	0,7
23,41	13,98	0,8
25,63	14,21	0,9

ные подъемные установки (скиповая и клетьевая); выемочный участок; проходческие участки; участок конвейерного транспорта; участок водоотлива; обособленная нагрузка потребителей поверхности; обособленная нагрузка подземных потребителей околоствольной двора.

Синтезированная имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты позволит оценить влияние показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты. Под показателями качества электроэнергии, оказывающих влияние на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты понимаем — суммарный коэффициент гармонических искажений по напряжению (K_U) и отклонения напряжения (δU).

Результаты исследования

Согласно имитационному моделированию получены значения ПКЭ (отклонение напряжения (δU), суммарный коэффициент гармонических искажений по напряжению (K_u)) в системе электро-

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования ПКЭ в системе электроснабжения угольной шахты
The results of an experimental study of a PCE in a coal mine power supply system

K_u, %	δU, %	K_u, %	δU, %
10,3	–6,2	12,9	–9
10,5	–6,1	12,4	–9
10,2	–6	4,5	–4,1
12,3	–6,3	4,3	–5
13,48	–7,1	13,43	–9,3
13,37	–7,1	12,2	–8,2
9,4	–4	9,3	–7
9,6	–4	12,7	–4,1
10,3	–7,3	11,8	–4,4
10,7	–5,2	13,2	–6,1
11,5	–12,3	11,8	–6,1
11,8	–12,3		

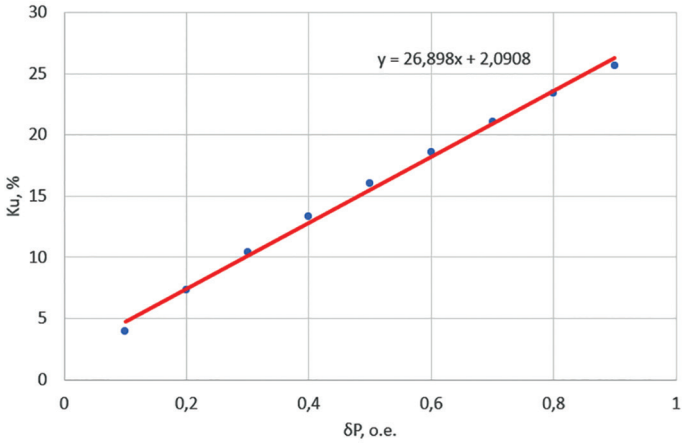

Рис. 4. Закономерность суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_u), от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP)

Fig. 4. The pattern of the total harmonic distortion coefficient in voltage (K_u), from the relative power value of the converter load (δP)

снабжения угольной шахты при различных значениях отношения мощности линейной и преобразовательной нагрузки представленные в табл. 1. В табл. 2 представлены результаты экспериментального исследования ПКЭ на угольных шахтах. Исследования проводились в соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 30804.4.30-2013 (IEC 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии и РД 153-34.0-15.501-00 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В качестве точек замера показателей качества электрической энергии приняты вторичные цепи силовых понизительных трансформаторов напряжением (шины ГГП 6 кВ). В качестве

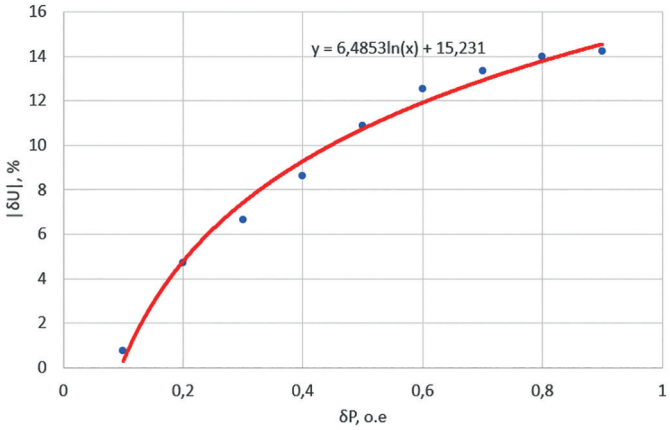

Рис. 5. Закономерность отклонения напряжения (|δU|) по модулю, от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP)

Fig. 5. The pattern of voltage deviation (|δU|) modulo the relative power of the converter load (δP)

измерительных средств использовались анализаторы показателей качества электрической энергии «Ресурс-UF2M», Fluke 435.

В результате получена закономерность суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_u), от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP) (см. рис. 4) и закономерность отклонения напряжения ($|\delta U|$) по модулю, от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP) (см. рис. 5).

В частности, закономерность суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_u), от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP) описывается уравнением регрессии

$$y = 26{,}898 * x + 2{,}09.$$

Закономерность отклонения напряжения ($|\delta U|$) по модулю, от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP) описывается логарифмическим уравнением регрессии

$$y = 6{,}4853\ln(x) + 15{,}231.$$

В результате моделирования определены значения отклонения напряжения (δU), от суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_U) представленной на рис. 6. Там же представлены результаты экспериментальных исследований показателей качества электроэнергии выполненных на ряде понизительных подстанций высокопроизводительных угольных шахт и среднестатистическое отклонение полученных результатов моделирования для оценки доверительных интервалов при измерении взаимосвязи между величинами ПКЭ.

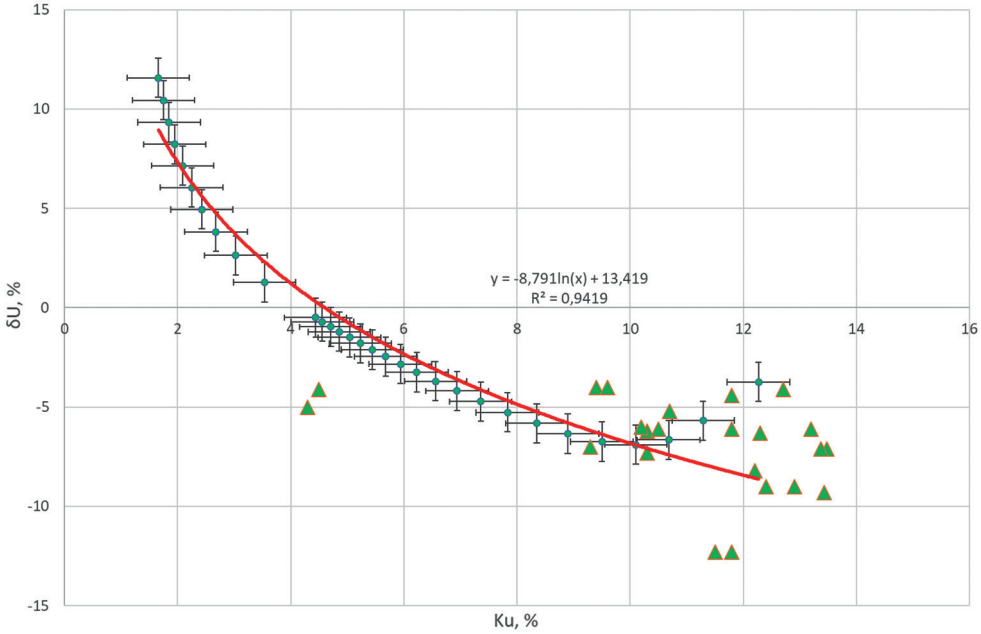

Рис. 6. Закономерность отклонения напряжения (δU), от суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_u) и результаты экспериментальных исследований ПКЭ выполненных на ряде понизительных подстанций высокопроизводительных угольных шахт

Fig. 6. The pattern of voltage deviation (δU) from the total voltage harmonic distortion coefficient (K_u) and the results of experimental studies of PCE performed at a number of step-down substations of high-performance coal mines

Согласно полученным значениям, была определена закономерность отклонения напряжения (δU), от суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_U) представленная в виде уравнения логарифмической регрессии:

$$y = -8{,}791\ln(x) + 13{,}419$$

с коэффициентом корреляции $R = 0{,}97$, коэффициентом детерминации $R^2 = 0{,}942$, средней ошибкой аппроксимации $\bar{A} = 34{,}72\%$.

Проверка результатов средней ошибки аппроксимации по шкале Чадокка определила показатель тесноты связи, как «Заметная» ($20\% < \bar{A} < 40\%$).

Заключение

В результате исследования синтезирована имитационная модель системы электроснабжения угольной шахты с целью исследования генерации высших гармонических составляющих и оценке влияния показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнического комплекса угольной шахты.

Были получены закономерности влияния показателей качества электроэнергии на эффективность функционирования электротехнической системы угольной шахты, что позволит провести оценку их воздействия и разработать мероприятия по их ограничению.

Были получены закономерности:

- отклонения напряжения (δU) от суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_u);
- суммарного коэффициента гармонических искажений по напряжению (K_u) от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP);
- отклонения напряжения ($|\delta U|$) по модулю от относительного значения мощности преобразовательной нагрузки (δP).

Анализ результатов, полученных при экспериментальных исследованиях в условиях угольных шахт, доказал корректность полученных закономерностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рубан А. Д., Артемьев В. Б., Забурдяев В. С., Забурдяев Г. С. Руденко Ю. Ф.* Проблемы обеспечения высокой производительности очистных забоев в метанообильных шахтах. — М.: Издательство ООО «Московский издательский дом», 2009. — 396 с.
2. *Мешков А. А., Казанин О. И., Сидоренко А. А.* Повышение эффективности технологии и организации проходки лавы при интенсивной разработке пологих угольных пластов на шахтах Кузбасса // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 342—350. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.
3. *Kubrin S. S.* Monitoring of coal and rock mass conditions, coal mine air and extraction equipment state / Proceedings of the 8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction. Metallurgical Industry Press. China, 2014, pp. 454—460.
4. *Кубрин С. С., Закоршменный И. М., Решетняк С. Н., Максименко Ю. М.* Повышение эффективности функционирования горных машин угольных шахт // Уголь. — 2024. — № 4. — С. 83—87. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.
5. *Плащанский Л. А., Решетняк М. Ю.* Анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт // Горный журнал. — 2020. — № 5. — С. 63—67. DOI: 10.17580/gzh.2020.05.11.
6. *Подунай С. В., Степанов Л. Г.* Контроль качества электроэнергии содержащих высшие гармоники и пути устранения высших гармоник / Образование, наука и молодежь — 2022. Сборник трудов по материалам Научно-практической конференции студентов и курсантов. — Керчь, 2022. — С. 37—39.
7. *Lyakhomskii A. V., Perfil'eva E. N., Petrochenkov A. B.* Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises // Russian Electrical Engineering. 2015, vol. 86, no. 6, pp. 305—308.

8. *Petrochenkov A. B.* An information of industrial electrotechnical complexes // Russian Electrical Engineering. 2015, vol. 86, no. 6, pp. 692 – 696.

9. *Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S.* Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation // Energies. 2022, vol. 15, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.

10. *Плащанский Л. А., Решетняк М. Ю.* Условия возникновения резонансных явлений в системе подземного электроснабжения выемочных участков угольных шахт // Горный журнал. — 2021. — № 9. — С. 75 – 79. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.12.

11. *Yu B.* Industrial structure, technological innovation, and total-factor energy efficiency in China // Environmental Science and Pollution Research. 2021, vol. 27, no. 8, pp. 8371 – 8385. DOI: 10.1007/s11356-019-07363-5.

12. *Huang H., Liang R., Lu C., Gong D., Yin S.* Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system // Applied Energy. 2021, vol. 290. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116759.

13. *Kumar M., Maity T., Kirar M. K.* Energy-use assessment and energy-saving potential analysis in an underground coal mine: A case study / IEEE Kansas Power and Energy Conference, KPEC. 2021 DOI: 10.1109/KPEC51835.2021.9446232.

14. *Abramovich B. N., Kuznetsov P. A., Sychev Yu. A.* Protective controller against cascade outages with selective harmonic compensation function // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1015, no. 2, article 022001.

15. *Sychev Y. A., Aladin M. E., Aleksandrovich S. V.* Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2022, vol. 13, no. 3, pp. 1625 – 1634.

16. *Sychev Y. A., Aladin M. E., Serikov V. A.* Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply // International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 2022, vol. 13, no. 3, pp. 1625 – 1634, DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634.

17. *Жежеленко И. В.* Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 272 с.

18. *Железко Ю. С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. — М.: ЭНАС, 2009. — 456 с.

19. *Решетняк С. Н., Зотов В. В., Сучко Д. С.* Декомпозиционный анализ системы электроснабжения угольных шахт для оценки генерации высших гармоник технологическим оборудованием поверхностного комплекса // Уголь. — 2025. — № 1. — С. 93 – 99.

20. *Плащанский Л. А., Решетняк С. Н., Решетняк М. Ю.* Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. — 2022. — Т. 7. — № 1. — С. 66 – 77. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77. ГИАБ

REFERENCES

1. Ruban A. D., Artem'ev V. B., Zaburdyaev V. S., Zaburdyaev G. S. Rudenko Yu. F. *Problemy obespecheniya vysokoy proizvoditel'nosti ochistnyh zaboev v metanoobil'nyh shahtah* [Problems of ensuring high productivity of treatment faces in methane mines], Moscow, 2009, 396 p.

2. Meshkov A.A., Kazanin O.I., Sidorenko A.A. Improving the efficiency of the technology and organization of the longwall face move during the intensive flat-lying coal seams mining at the Kuzbass mines. *Journal of Mining Institute.* 2021, vol. 249, pp. 342 – 350. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.3.

3. Kubrin S. S. Monitoring of coal and rock mass conditions, coal mine air and extraction equipment state. *Proceedings of the 8th International Conference on Physical Problems of Rock Destruction.* Metallurgical Industry Press. China, 2014, pp. 454 – 460.

4. Kubrin S. S., Zakorshmenny I. M., Reshetnyak S. N., Maksimenko Yu. M. Improving the efficiency of mining machinery in coal mines. *Ugol'.* 2024, no. 4, pp. 83 – 87. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.

5. Plashchansky L. A., Reshetnyak M. Yu. Analysis of harmonic composition in electric networks of step–down substations of coal mines. *Gornyi Zhurnal.* 2020, no. 5, pp. 63 – 67. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.05.11.

6. Podunai S. V., Stepanov L. G. Quality control of electricity containing higher harmonics and ways to eliminate higher harmonics. *Obrazovanie, nauka i molodezh' — 2022. Sbornik trudov po materialam*

Nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i kursantov [Education, Science and Youth — 2022. Collection of papers based on the materials of the Scientific and practical Conference of students and cadets], Kerch, 2022, pp. 37—39. [In Russ].

7. Lyakhomskii A. V., Perfil'eva E. N., Petrochenkov A. B. Conceptual design and engineering strategies to increase energy efficiency at enterprises. *Russian Electrical Engineering*. 2015, vol. 86, no. 6, pp. 305—308.

8. Petrochenkov A. B. An information of industrial electrotechnical complexes. *Russian Electrical Engineering*. 2015, vol. 86, no. 6, pp. 692—696.

9. Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation. *Energies*. 2022, vol. 15, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.

10. Plaschansky L. A., Reshetnyak M. Yu. Conditions of occurrence of resonant phenomena in the underground power supply system of coal mine excavation sites. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 9, pp. 75—79. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.09.12.

11. Yu B. Industrial structure, technological innovation, and total-factor energy efficiency in China. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021, vol. 27, no. 8, pp. 8371—8385. DOI: 10.1007/s11356-019-07363-5.

12. Huang H., Liang R., Lu C., Gong D., Yin S. Two-stage robust stochastic scheduling for energy recovery in coal mine integrated energy system. *Applied Energy*. 2021, vol. 290. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116759.

13. Kumar M., Maity T., Kirar M. K. Energy-use assessment and energy-saving potential analysis in an underground coal mine: A case study. *IEEE Kansas Power and Energy Conference, KPEC*. 2021 DOI: 10.1109/KPEC51835.2021.9446232.

14. Abramovich B. N., Kuznetsov P. A., Sychev Yu. A. Protective controller against cascade outages with selective harmonic compensation function. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, no. 2, article 022001.

15. Sychev Y. A., Aladin M. E., Aleksandrovich S. V. Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2022, vol. 13, no. 3, pp. 1625—1634.

16. Sychev Y. A., Aladin M. E., Serikov V. A. Developing a hybrid filter structure and a control algorithm for hybrid power supply. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2022, vol. 13, no. 3, pp. 1625—1634, DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i3.pp1625-1634.

17. Zhezhelenko I. V. *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatiy* [Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises], Moscow, Energoatomizdat, 1994, 272 p.

18. Zhelezko Yu. S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii* [Electric power losses. Reactive power. The quality of electricity], Moscow, ENAS, 2009, 456 p.

19. Reshetnyak S. N., Zotov V. V., Suchko D. S. Decomposition analysis of the power supply system of coal mines to evaluate the generation of higher harmonics by technological equipment of the surface complex. *Ugol'*. 2025, no. 1, pp. 93—99. [In Russ].

20. Plaschansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Yu. Improving the quality of electric energy in underground electric networks of high-performance coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022, vol. 7, no. 1, pp. 66—77. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ляхомский Александр Валентинович[1] — д-р техн. наук,
профессор, профессор, e-mail: mggu.eegp@mail.ru,
Решетняк Сергей Николаевич[1] — канд. техн. наук,
доцент, доцент, e-mail: reshetniak@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6982-558,
Кутепова Евгения Николаевна[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: mggu.eegp@mail.ru,
[1] НИТУ МИСИС.
Для контактов: Решетняк С.Н., e-mail: reshetniak@inbox.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Lyakhomsky[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor, e-mail: mggu.eegp@mail.ru,
S.N. Reshetnyak[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Assistant Professor, e-mail: reshetniak@inbox.ru,
ORCID ID: 0000-0002-6982-558,
E.N. Kutepova[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: mggu.eegp@mail.ru,
[1] NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.
Corresponding author: S.N. Reshetnyak, e-mail: reshetniak@inbox.ru.

Получена редакцией 12.03.2025; получена после рецензии 14.04.2025; принята к печати 10.05.2025.
Received by the editors 12.03.2025; received after the review 14.04.2025; accepted for printing 10.05.2025.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДОБЫЧИ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНОГО МАТЕРИАЛА ЭКСКАВАТОРНО-ГИДРАВЛИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

(2025, № 2, СВ 3, 16 с.)

Чопенко Валерий Александрович — специалист, горный инженер проектировщик,
ООО «Экопроекткарьер», e-mail: valchop3@gmail.com,
Дробаденко Валерий Павлович — докт. техн. наук, профессор, профессор, МГРИ им. Серго Орджоникидзе,
Тушов Александр Иванович — канд. техн. наук, доцент, доцент, МГРИ им. Серго Орджоникидзе.

Рассмотрена технология добычи песчано-гравийной смеси (ПГС) экскаваторно-гидравлическим способом (ЭГС). Проанализированы ключевые аспекты ее применения, включая особенности гидротранспортирования, предварительного дробления, использования роторной дробилки на всасе грунтонасоса и организации добычных работ. Проведено сравнение эффективности ЭГС с альтернативными методами добычи, выявлены преимущества и ограничения. Рассмотрены геологические и технологические условия применения метода, а также возможности его адаптации к различным месторождениям. Представлены результаты опытно-промышленного использования технологии на Иршинском ГОКе, а также произведен технологический расчет ее внедрения на одном из месторождений песчано-гравийной смеси в Калужской области. Показано, как внедрение данной технологии снижает себестоимость добычи, сократит численность работников, снизит затраты на транспортировку горной массы и повысит эффективность использования оборудования.

Ключевые слова: песчано-гравийная смесь, экскаваторно-гидравлический способ, гидротранспортирование, предварительное дробление, роторная дробилка, грунтонасос, гидромонитор, добычные работы.

JUSTIFICATION OF THE TECHNOLOGY FOR SAND AND GRAVEL EXTRACTION USING THE EXCAVATOR-HYDRAULIC METHOD

V.A. Chopenko, Specialist, Mining Design Engineer, LLC Ecoproektkar'er, Moscow, Russia, e-mail: valchop3@gmail.com,
V.P. Drobadenko[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor, *A.I. Tushov*[1], Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
[1] Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Moscow, Russia.

The article examines the technology of extracting sand and gravel mixture (SGM) using the excavator-hydraulic method (EHM). Key aspects of its application are analyzed, including the specifics of hydraulic transportation, preliminary crushing, the use of a rotary crusher at the suction of a slurry pump, and the organization of extraction operations. A comparison of the efficiency of EHM with alternative extraction methods is conducted, highlighting its advantages and limitations. The geological and technological conditions for applying the method, as well as its adaptability to various deposits, are discussed. The results of pilot-industrial use of the technology at the Irshinsky Mining and Processing Plant are presented, along with a technological calculation of its implementation at one of the sand and gravel deposits in the Kaluga region. It is demonstrated that the implementation of this technology reduces extraction costs, decreases the number of workers, lowers transportation costs for mined material, and enhances equipment utilization efficiency.

Key words: sand and gravel mixture, excavator-hydraulic method, hydraulic transportation, preliminary crushing, rotary crusher, slurry pump, hydraulic monitor, extraction operations.