



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>**Повышение качества электрической энергии
в подземных электрических сетях
высокопроизводительных угольных шахт****Л. А. Плащанский¹ , С. Н. Решетняк²  , М. Ю. Решетняк² **¹ Национальный исследовательский технологический университет
«Московский институт стали и сплавов» (НИТУ МИСИС), г. Москва, Российская Федерация² Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН),
г. Москва, Российская Федерация reshetniak@inbox.ru**Аннотация**

Одним из основных факторов эффективного функционирования системы электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт является бесперебойное питание электроэнергией подземных потребителей всего технологического цикла при достаточном количестве электроэнергии с обязательным соблюдением показателей ее качества. Анализ электропотребления высокопроизводительной угольной шахты показал, что порядка 57 % потребителей электрической энергии расположены в подземных выработках. Потребители можно разделить на участки основного технологического процесса добычи угля: добычные участки (13 %); участки конвейерного транспорта (13 %); подготовительные участки (8 %), и участки вспомогательных процессов добычи угля: водоотлив (23 %). Увеличение доли регулируемых электроприводов в общем балансе мощностей выемочных участков приводит к появлению факторов, не характерных ранее для подземных электрических сетей. К таким факторам относятся изменение гармонического состава сети, появление высших гармоник тока и напряжения, оказывающих влияние на питающую сеть, нагрев электрооборудования, потери мощности и электроэнергии. Поэтому вопросы повышения качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт являются актуальными. В результате проведенных исследований разработана методика проведения экспериментальных исследований показателей качества электрической энергии (представленная в виде алгоритма) применительно к специфическим условиям высокопроизводительных угольных шахт, в том числе опасных по внезапным выбросам газа и пыли. Данная методика была апробирована на ряде угольных шахт компании АО «СУЭК-Кузбасс». Также представлены результаты проведенных экспериментальных исследований по определению фактического уровня суммарного коэффициента гармонических составляющих в подземных электрических сетях выемочных участков угольных шахт. Важное значение имеет обоснование параметров фильтра высших гармоник, представленный алгоритм расчета которого основывается на разработанной методике. Исследования показали, что применение прямого и обратного преобразований Clarke для расчета параметров фильтра высших гармоник применимы для всех уровней напряжений. Имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты позволяет исследовать условия демпфирования высших гармоник с помощью устройства повышения качества электрической энергии. Использование предложенных технических решений по повышению качества электрической энергии на основе имитационного моделирования позволило сделать заключение об успешном демпфировании высших гармоник, в частности, снижении суммарного значения напряжения гармонических составляющих (THD (U)) с 9,07 до 1,77 %.

Ключевые слова

угольная шахта, система электроснабжения, качество электрической энергии, гармонические составляющие, энергоэффективность, подземные электрические сети; имитационная модель, активный фильтр высших гармоник

Для цитирования

Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Y. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):66–77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>



POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research article

Improvement of the electric energy quality in underground electric networks in highly productive coal mines

L. A. Plashchansky¹ , S. N. Reshetnyak²  , M. Y. Reshetnyak² ¹ National Research Technological University “Moscow Institute of Steel and Alloys” (NUST MISiS), Moscow, Russian Federation² Institute for the Problems of Integrated Subsoil Development, Russian Academy of Sciences (IPKON RAS), Moscow, Russian Federation reshetniak@inbox.ru

Abstract

One of the main factors for the effective functioning of the power supply system in highly productive coal mines is the uninterrupted power supply of underground consumers for the entire process cycle at sufficient amount of electric energy at a high level of quality and performance. The analysis of electric energy consumption in highly productive coal mine has shown that about 57 % of electric energy consumers are located in underground workings. Consumers can be divided into the following areas of basic technological process of coal production: production areas (13 %); conveyor transport areas (13 %); preparation areas (8 %), and areas of auxiliary processes of coal production: mine drainage (23 %). The increase in the share of controlled-velocity electric drives in the total power balance of fully-mechanized longwalls leads to factors previously atypical of underground power networks. Such factors include changes to the harmonic composition of the network, arising higher current and voltage harmonics, affecting the supplying network and causing heating of electrical equipment, power and electric energy losses. Therefore, the most pressing issues are to improve electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. The study has developed a technique for experimental investigations of quality indicators of electric energy (presented in the form of algorithm) in respect to specific conditions of highly productive coal mines. These include dangerous facilities in terms of sudden gas/dust outbursts. This technique was tested at a number of coal mines of JSC SUEK-Kuzbass. The study also presents the results of experimental investigations to determine the actual level of total harmonic distortion (factor) in underground electric networks of fully-mechanized longwalls of coal mines. Of greater importance is justification of higher harmonic filter parameters. To this end a calculation algorithm based on the developed technique has been proposed. Research has shown that application of forward and inverse Clarke transformations for calculating the harmonic filter parameters is applicable for all voltage levels. The simulation model of power supply system of a coal mine fully-mechanized longwall allows conditions of higher harmonics damping to be studied by means of a device for improvement of electric energy quality. Applying the proposed technical solutions to improve the quality of electric energy based on the simulation modeling allowed the successful damping of higher harmonics to be achieved. For example, the total harmonic components voltage (THD (U)) was reduced from 9.07 to 1.77 %.

Keywords

coal mine, power supply system, electric energy quality, harmonic components, energy efficiency, underground electric networks; simulation model, resistivity bridge harmonic filter

For citation

Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Y. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022;7(1):66–77. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-1-66-77>

Введение

Стабильная эксплуатация высокопроизводительных угольных шахт нового технико-экономического уровня является основой угледобывающей отрасли России [1–3]. Это обусловлено рядом технологических и геополитических вызовов, с которыми в настоящее время сталкивается Российская Федерация.

Одним из основных факторов эффективного функционирования системы электроснабжения высокопроизводительных угольных шахт является бесперебойное питание электроэнергией подземных потребителей всего технологического цикла при достаточном количестве электроэнергии с обязательным соблюдением показателей ее качества.

Технологический процесс современных угольных шахт использует энергоемкие мощные выемочные, проходческие и транспортные комплексы, цифровые телеметрические системы управления, защиты и блокировки, а также вспомогательные устройства. Высокая энергоемкость современных высокопроизводительных комплексов обеспечивается различными системами электроприводов, включая регулируемые на базе полупроводниковых устройств, особенно тиристорных преобразователей [4–6].

Использование данных устройств вызывает отклонение показателей качества электроэнергии от регламентируемых и способствует недопустимому нагреву электродвигателей, силовых трансформаторов.



ров, кабелей и другого электрооборудования [7–9]. Особо это опасно для подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт со специфическими условиями эксплуатации и интегрированным технологическим процессом, от которого зависит производительность всего предприятия. Поэтому контроль качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт является весьма актуальным.

Основные положения

Анализ электропотребления высокопроизводительной угольной шахты показал, что порядка 57 % потребителей электрической энергии расположены в подземных выработках. Следует отметить, что эти потребители в свою очередь делятся на участки основного технологического процесса добычи угля: добычные участки (13 %); участки конвейерного транспорта (13 %); подготовительные участки (8 %), и участки вспомогательных процессов добычи угля: водоотлив (23 %) и др. Выемочные участки (комплексно-механизированные забои) являются одним из наиболее энергоемких потребителей и являются начальным звеном всего технологического процесса выемки угля, поэтому именно ему уделяется особое внимание.

В ранее проведенных исследованиях [10, 11] были представлены результаты анализа гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций высокопроизводительной угольной шахты АО «СУЭК-Кузбасс» «Полысаевская». В частности, были определены суммарные значения коэффициента гармонических составляющих напряжения по соответствующим подстанциям ПС-12 48 %, ПС-910 37,7 %, ПС-948 41,75 %. В ходе проведения дальнейших исследований данные результаты были уточнены и скорректированы. Результирующие значения коэффициента гармонических составляющих напряжения составляют соответственно: по ПС-12 13,48 %; ПС-910 10,77 %; ПС-948 11,8 %.

В состав комплексно-механизированного забоя угольной шахты входит следующее оборудование: выемочный комбайн; механизированная крепь; забойный конвейер; перегружатель; дробилка. Анализ комплексов позволил определить долю регулируемых мощностей технологического электрооборудования высокопроизводительного выемочного участка угольной шахты.

Для исследуемой сети доля регулируемой мощности с помощью преобразовательных устройств у выемочного комбайна Eickhoff SL-300 составляет порядка 15 %, а доля регулируемой мощности в скребковом конвейере FFC-9 составляет порядка 33 %, что обусловлено наличием устройства плавного пуска, которое хотя и работает непродолжительное время, однако за смену, особенно ремонтную, число пусков значительно. Доля регулируемой мощности у перегружателя FSL-9 составляет 100 %, ее электродвигатель получает от преобразователя частоты. Дробилка FBL-10G непосредственно подключена к питающей сети [4, 5].

Следует отметить, что порядка 35 % систем электроприводов подключено к питающей сети через

преобразовательные устройства, являющиеся источником высших гармоник [5, 11]. Увеличение доли регулируемых электроприводов в общем балансе мощностей выемочных участков приводит к появлению факторов, не характерных ранее для подземных электрических сетей. К таким факторам относятся изменение гармонического состава сети, появление высших гармоник тока и напряжения, оказывающих влияние на питающую сеть, нагрев электрооборудования, потери мощности и электроэнергии.

Объектом исследования были высокопроизводительные выемочные участки шахт АО «СУЭК-Кузбасс», в сетях которых проведены экспериментальные исследования, по методике, представленной в виде алгоритма (рис. 1). В качестве анализатора гармонического состава в подземных электрических сетях угольных шахт использовался регистратор параметров Algodue Elettronica UPM 3080. Анализатор, помимо измерения основных параметров электрической энергии, позволяет провести измерения отдельного и полного коэффициента гармонических искажений (THD) по напряжению и току до 40-й гармоники.

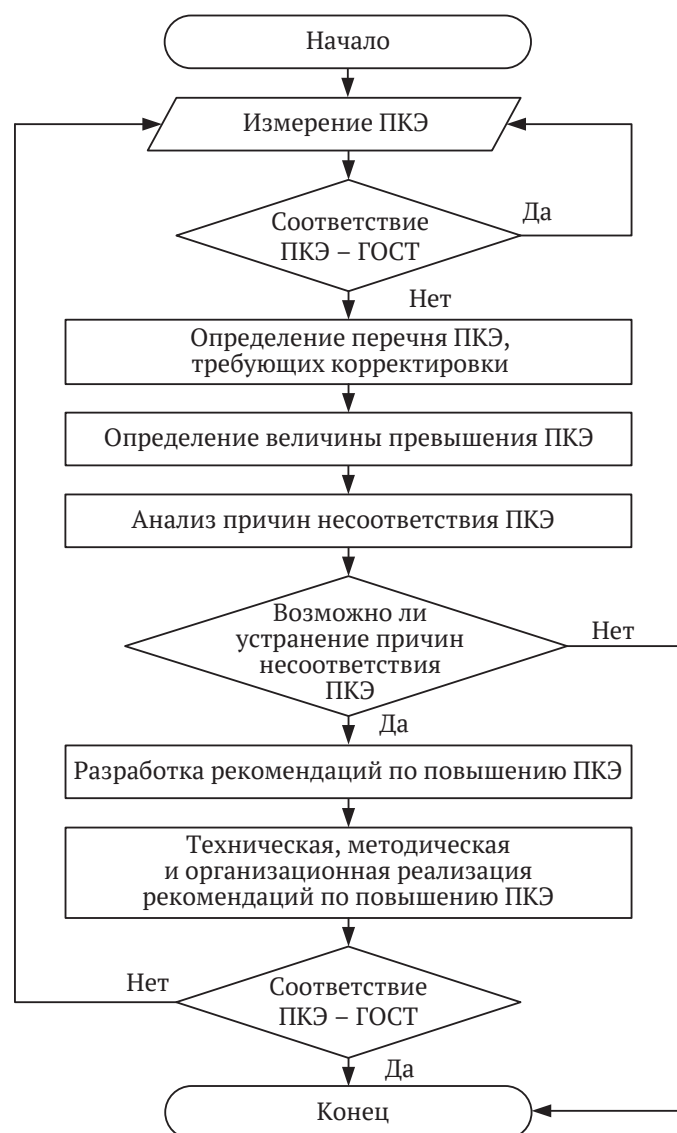


Рис. 1. Алгоритм экспериментальных исследований



Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований (рис. 2) позволил сделать заключение о значительном превышении нормируемых величин по коэффициенту n -х гармонических составляющих напряжения $U_{ав}$, среди которых особенно выделяются 5-я и 7-я гармоники.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (СКГЧН) (Total Harmonic Distortion Voltage ($THD(U)$)) был определен как:

$$THD(U) = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{U_n^2}{U_1^2}} 100\%, \quad (1)$$

где U_n – уровень напряжения n -й гармонической составляющей; n – номер гармоники; U_1 – уровень напряжения первой гармоники.

ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная» вводит ограничения для параметра ($THD(U)$), который не должен превышать значения 5 % (уровень напряжения 6 кВ).

Исследование позволило определить фактический суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в электрической сети выемочного участка, который составил 10,72 %, что превышает нормируемое значение (не более 5 % ГОСТ 32144–2013) в 2,14 раза.

Повышение параметров качества электрической энергии в подземных сетях высокопроизводительных угольных шахт возможно с помощью установки фильтров высших гармоник [12–14]. С целью выбора оптимального фильтра высших гармоник был разработан

алгоритм (рис. 3). Выбор фильтра высших гармоник согласно представленному алгоритму осуществляется путем определения коэффициента мощности. Если коэффициент мощности требует корректировки в сторону увеличения, то предлагается к установке активный фильтр высших гармоник, если корректировки не требуется, то возможно установить ряд пассивных узкополосных фильтров или пассивный широкополосный фильтр высших гармоник [15–17]. Проведенное экспериментальное исследование показало низкий коэффициент мощности на выемочном участке $\cos \varphi = 0,77$, поэтому в качестве фильтра принят активный фильтр высших гармоник. Анализ существующих активных фильтров высших гармоник показал, что наиболее распространённой схемой активного фильтра высших гармоник является схема при параллельном присоединении к сети с емкостным накопителем, это обусловлено простотой реализации фильтра [18, 19].

Общий принцип действия активного фильтра высших гармоник состоит в активной генерации компенсирующего тока (I_{AHF}) в противофазе с током гармонических искажений нагрузки (I_{load}), взаимной компенсации этих токов и получении в результате тока синусоидальной формы (I_{grid}).

Теоретической базой для построения активных фильтров высших гармоник является теория мгновенной мощности ($p-q$ Теория), представленная в работах [19, 20], согласно которой происходит определение мгновенной мощности во временной области путем трансформирования напряжения и токов из трехфазной системы (координаты a, b, c) в систему координат $\alpha, \beta, 0$, которое называется преобразованием Кларк.

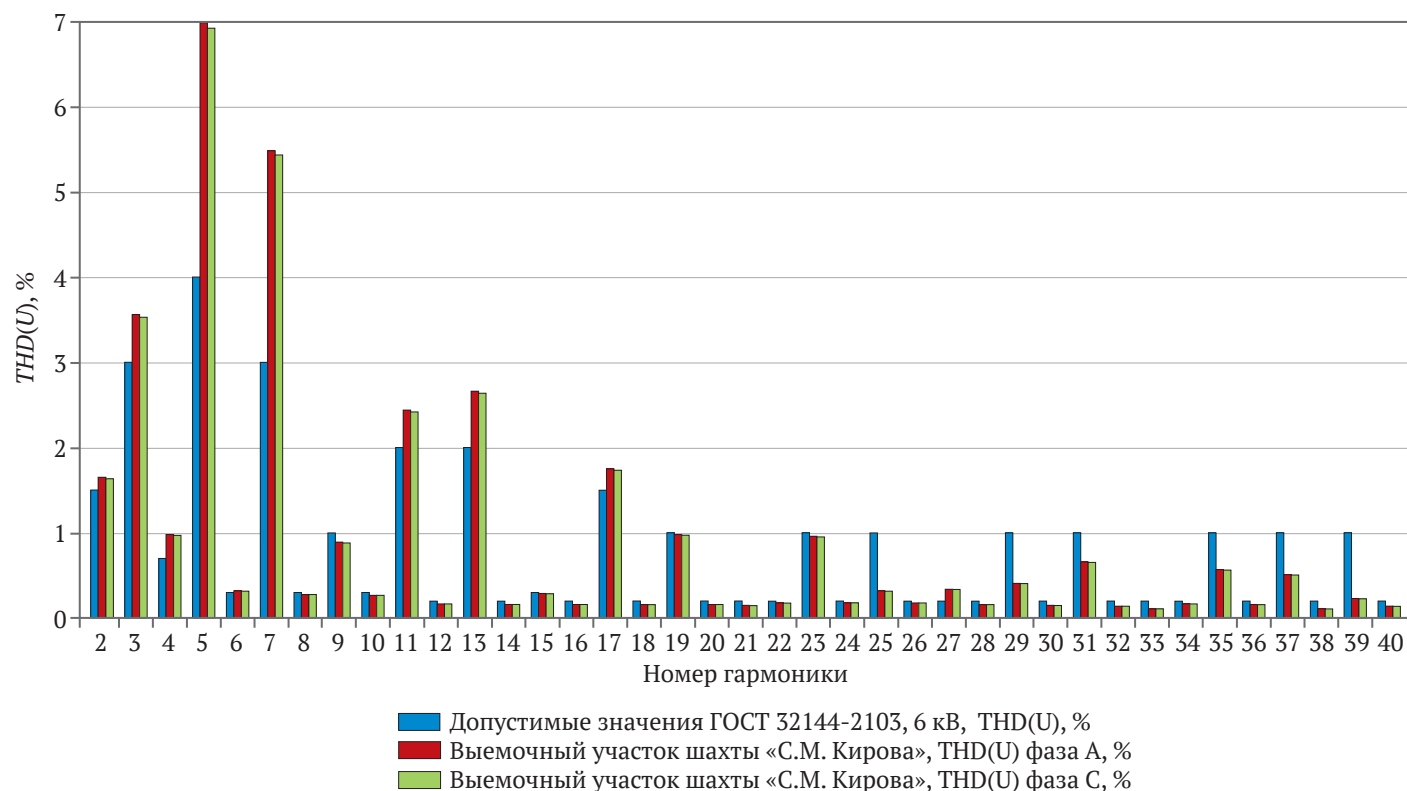


Рис. 2. Гармонический состав на вводной ячейке выемочного участка шахты «им С.М. Кирова» (АО «СУЭК–Кузбасс»)



Следует отметить, что для подземных электрических сетей угольных шахт, где отсутствует нулевой проводник (режим изолированной нейтрали), матрицы преобразований Кларк будут следующими:

– прямое преобразование Кларк для напряжений в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где u_α – проекция вектора напряжения на ось α ; u_β – проекция вектора напряжения на ось β ; u_a – напряжение фазы А; u_b – напряжение фазы В; u_c – напряжение фазы С;

– обратное преобразование Кларк для напряжений в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}; \quad (3)$$

– прямое преобразование Кларк для тока в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где i_α – проекция вектора тока на ось α ; i_β – проекция вектора тока на ось β ; i_a – ток фазы А; i_b – ток фазы В; i_c – ток фазы С;

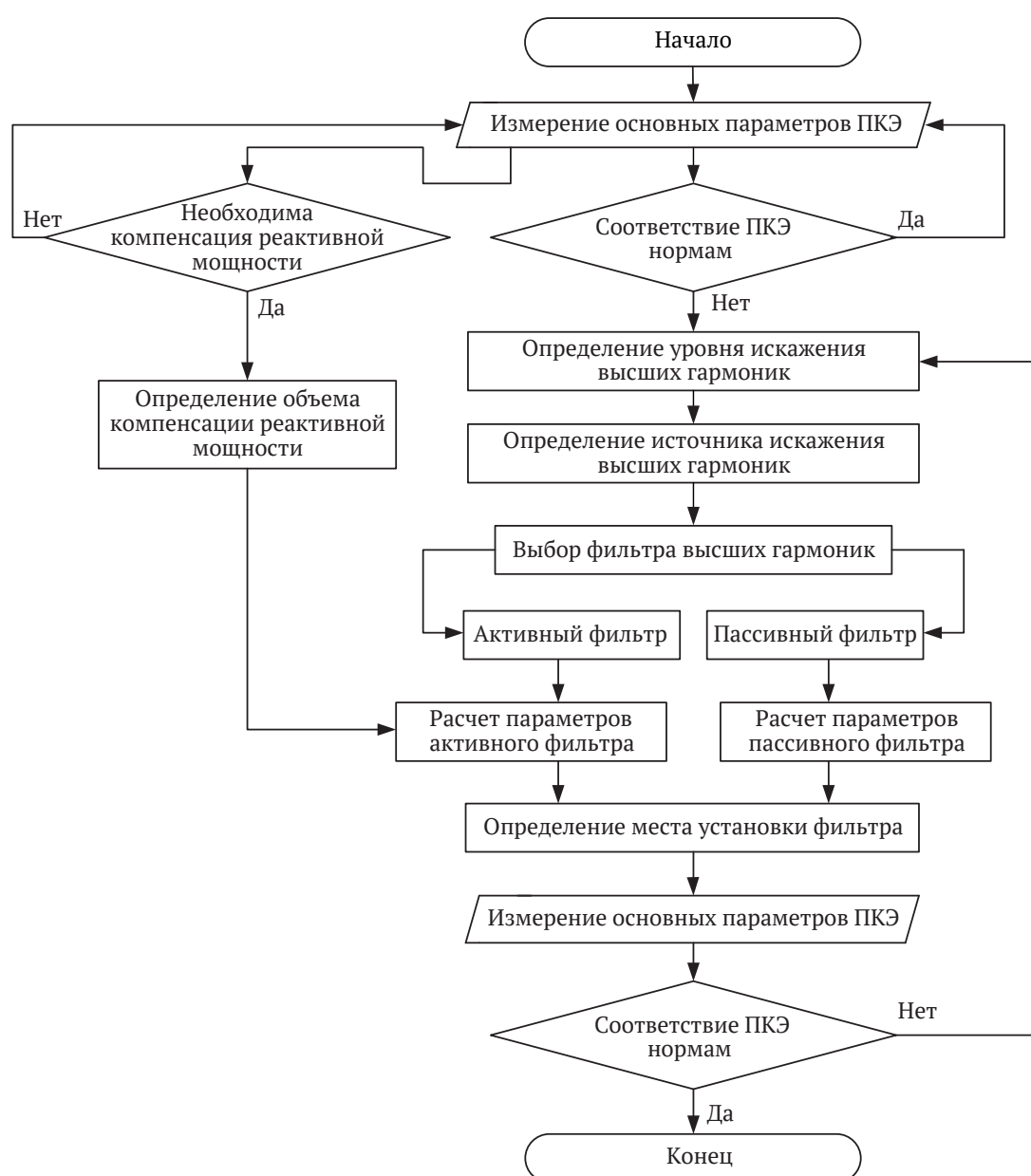


Рис. 3. Алгоритм выбора фильтров высших гармоник для высокопроизводительных угольных шахт



– обратное преобразование Кларка для тока в подземных сетях угольных шахт:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Мгновенная полная мощность в комплексном виде:

$$\begin{aligned} s &= \bar{u}l^* = (u_\alpha + ju_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) = \\ &= (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) + j(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta); \\ p &= u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p}; \\ q &= u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = \bar{q} - \tilde{q}, \end{aligned} \quad (6)$$

где p – мгновенная вещественная (активная) мощность; q – мгновенная мнимая (реактивная) мощность; $\bar{p}$ – среднее значение активной мощности; $\tilde{p}$ – пульсирующая активная мощность (среднее значение равно 0); $\bar{q}$ – среднее значение реактивной мощности; $\tilde{q}$ – пульсирующая (колебательная) часть реактивной мощности.

Уровни токов в матричной форме в координатах α и β определяются как

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\alpha & -u_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Уровни токов в координатах α и β определяются как

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \frac{u_\alpha}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \bar{p} + \frac{u_\alpha}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \tilde{p} + \frac{u_\alpha}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \bar{q} + \frac{u_\alpha}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \tilde{q}; \\ i_\beta &= \frac{u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \bar{p} + \frac{u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \tilde{p} - \frac{u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \bar{q} - \frac{u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \tilde{q}. \end{aligned} \quad (8)$$

Величину ёмкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник согласно [16] возможно определить как

$$C = 2 \frac{\int_0^{T/12} (T_u + P_A) dt}{\Delta U_{dc} (\Delta U_{dc} + 2U_{dc})}, \quad (9)$$

где C – ёмкость накопительного конденсатора, мкФ; T – период сетевого напряжения; T_u – мощность искажений на конденсаторе (выпрямленное напряжение), ВА; P_A – мощность потерь на IGBT, ВА; ΔU_{dc} – величина изменения выпрямленного напряжения, В; U_{dc} – величина выпрямленного напряжения, В.

Для определения ёмкости накопительного конденсатора активного фильтра высших гармоник принимаем следующие допущения:

$$T_u = \sqrt{3}U \sum_{n=2}^{40} I_n;$$

$$T_u = \sqrt{3}I \sum_{n=2}^{40} U_n; \quad (10)$$

$$P_A = P_{cond} + P_{sw} = i_c u_{ce} + \frac{1}{2} U_{CE_{max}} I_{C_{max}};$$

$$\Delta U_{dc} = 0,05U_{dc},$$

где U – действующее напряжение первой гармоники, В; I_n – уровень тока n -й гармонической составляющей, А; I – действующее значение тока первой гармоники, А; U_n – уровень напряжения n -й гармонической составляющей, В; P_{cond} – мощность статических потерь на IGBT, ВА; P_{sw} – мощность динамических потерь на IGBT, ВА; i_c – мгновенное значение тока коллектора IGBT, А; u_{ce} – мгновенное значение напряжения эмиттер-коллектор IGBT, В; $U_{CE_{max}}$ – максимальное значение напряжения эмиттер-коллектор IGBT, В; $I_{C_{max}}$ – максимальное значение тока коллектора IGBT, А. При этом результирующая формула по расчету накопительной ёмкости активного фильтра высших гармоник для уровней напряжения распределительных сетей высокопроизводительных угольных шахт имеет следующий вид:

$$C = 2 \frac{\int_0^{T/12} \left(\frac{S}{\sqrt{3}U_1} \sum_{n=2}^{40} U_n + \left(i_c u_{ce} + \frac{1}{2} U_{CE_{max}} I_{C_{max}} \right) \right) dt}{\Delta U_{dc} (\Delta U_{dc} + 2U_{dc})}. \quad (11)$$

Результаты расчета накопительной ёмкости активного фильтра высших гармоник для различных уровней напряжения подземных распределительных сетей шахт представлены на рис. 4.

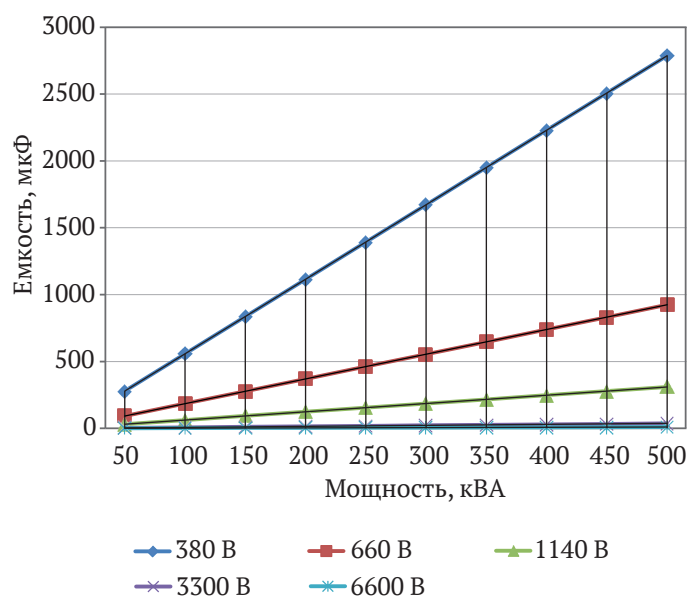


Рис. 4. Параметры накопительной ёмкости активного фильтра

Расчет индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник осуществляется следующим образом:

$$\Delta U = 2\pi fLI \text{ или } L = \frac{\Delta U}{2\pi fI}, \quad (12)$$

где ΔU – потери напряжения на дросселе, В; f – частота питающей сети, Гц; I – ток, А; L – индуктивность, Гн.

Величину индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник рассчитываем исходя из полной мощности электрической цепи $S = \sqrt{3}UI$ и (12):

$$L = \frac{\sqrt{3}U\Delta U}{2\pi fS}. \quad (13)$$

Результаты расчета индуктивности входного дросселя активного фильтра высших гармоник для уровней напряжения подземных распределительных сетей шахт представлены на рис. 5.

Практическая реализация результатов исследований

На основе проведенных исследований было разработано устройство автоматизированного мониторинга показателей качества электрической энергии.

Устройство устанавливается в энергопоезд выемочного участка шахты. При протекании тока через устройство анализатором фиксируются основные параметры качества электрической энергии (коэффициент мощности, гармонический состав и т.д.).

Проведённое исследование возможностей демпфирования высших гармоник в подземных сетях угольных шахт с помощью предложенного устройства позволило построить имитационную модель системы электроснабжения, представленную на рис. 6, с целью определения возможности снижения влияния высших гармоник на питающую сеть. В состав модели входит трехфазный универсальный измеритель, который позволяет оценить формы сигнала на источнике напря-

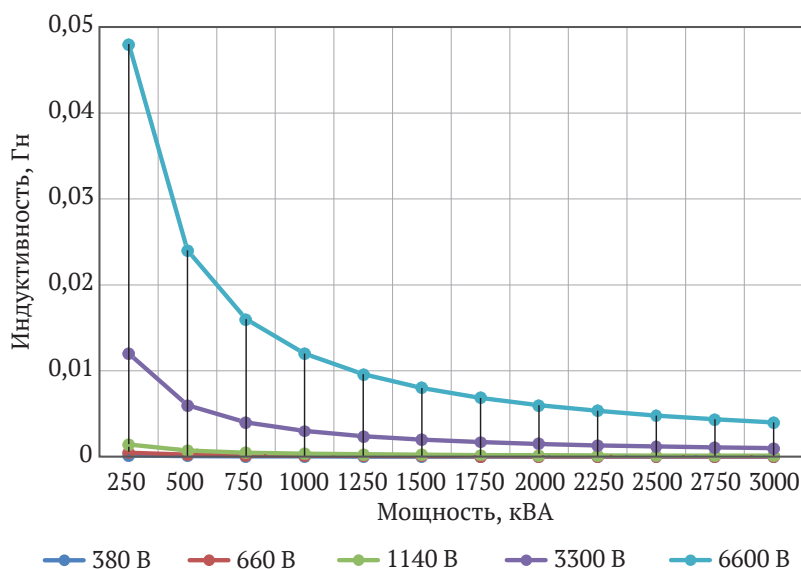


Рис. 5. Параметры входного дросселя активного фильтра

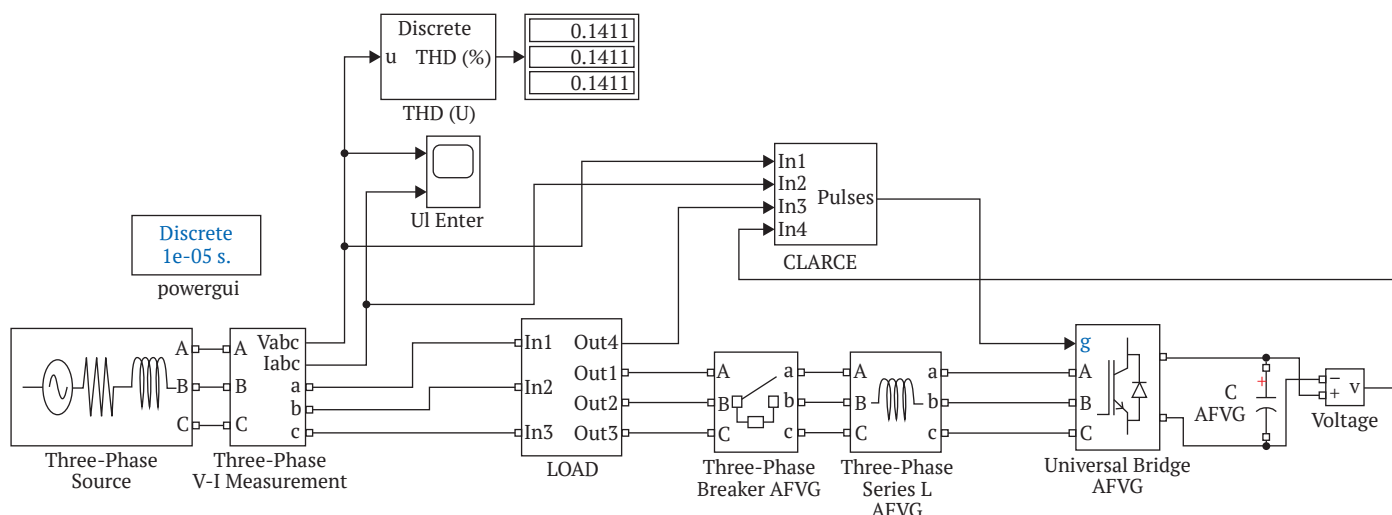


Рис. 6. Имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты с основным технологическим оборудованием и активным фильтром высших гармоник

жения при отсутствии системы компенсации высших гармонических составляющих и при включении ее. В качестве выходного устройства трехфазного универсального измерителя используется осциллограф.

В модели также предусмотрен активный фильтр высших гармоник, подключённый к системе электропитания выемочного участка. В состав активного фильтра высших гармоник входит вводной реактор, трехфазный активный выпрямитель, выполненный по трехфазной мостовой схеме на базе высоковольтных IGBT, емкостного накопителя активного фильтра

С и системы управления активным фильтром высших гармоник. В состав имитационной модели входят несколько подсистем: LOAD (нагрузка (рис. 7)); система управления активным фильтром высших гармоник CLARKE (рис. 8).

В подсистеме имитационной модели LOAD представлены три понизительные подстанции (ТЕК 1324, ТЕК 1534, ТЕК 1324) энергопоезда выемочного участка, а также ряд подсистем, которые имитируют нагрузку электрических сетей выемочного участка Eickoff SL-300, FBL-10G Glinik, FSL-9 Glinik, FFC-9 Glinik.

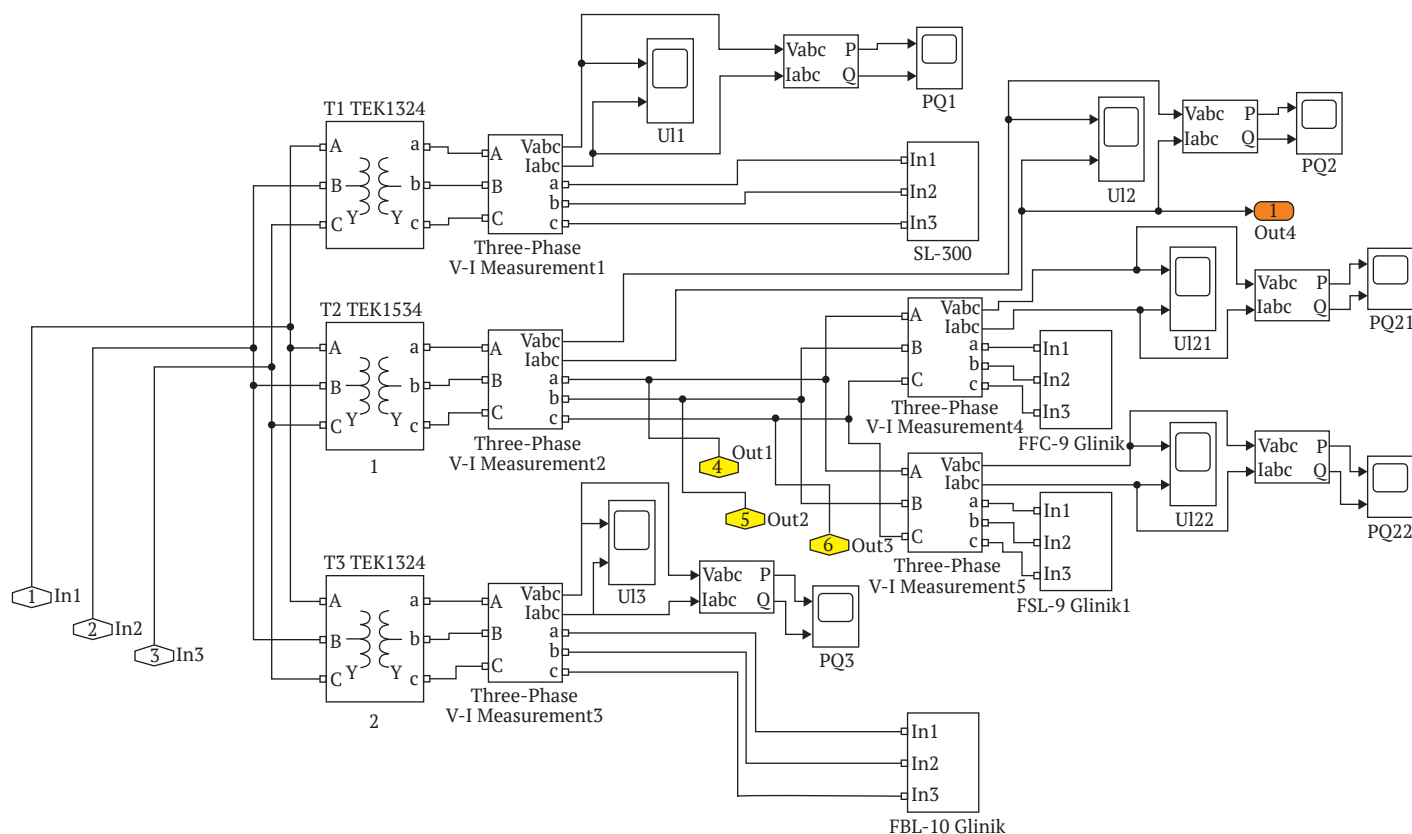


Рис. 7. Подсистема имитационной модели LOAD (нагрузка)

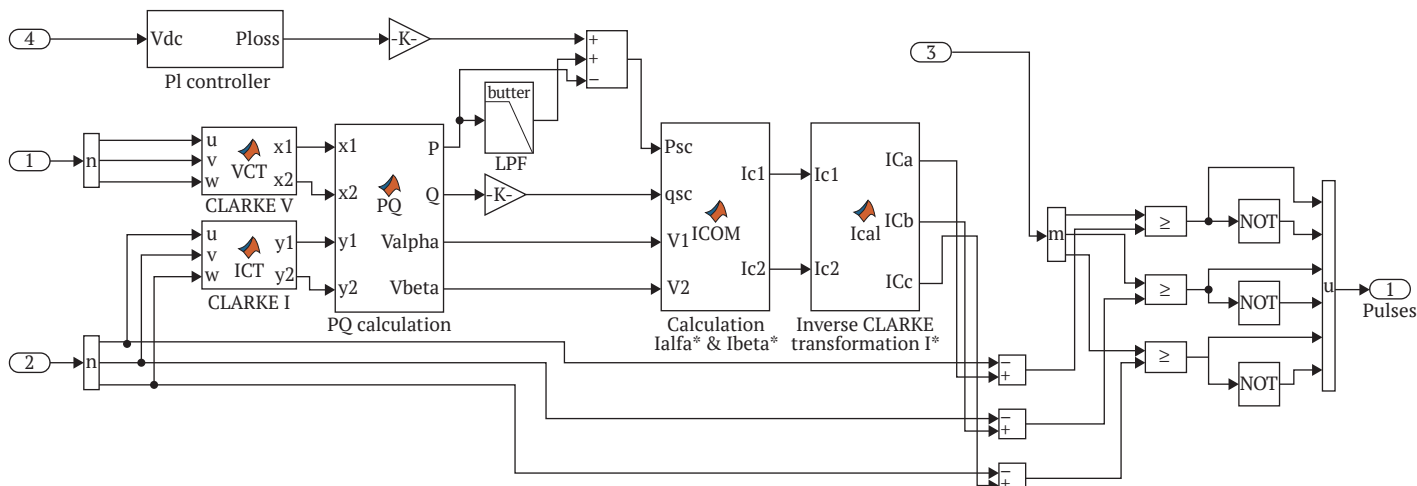


Рис. 8. Подсистема имитационной модели CLARKE (система управления активным фильтром высших гармоник)

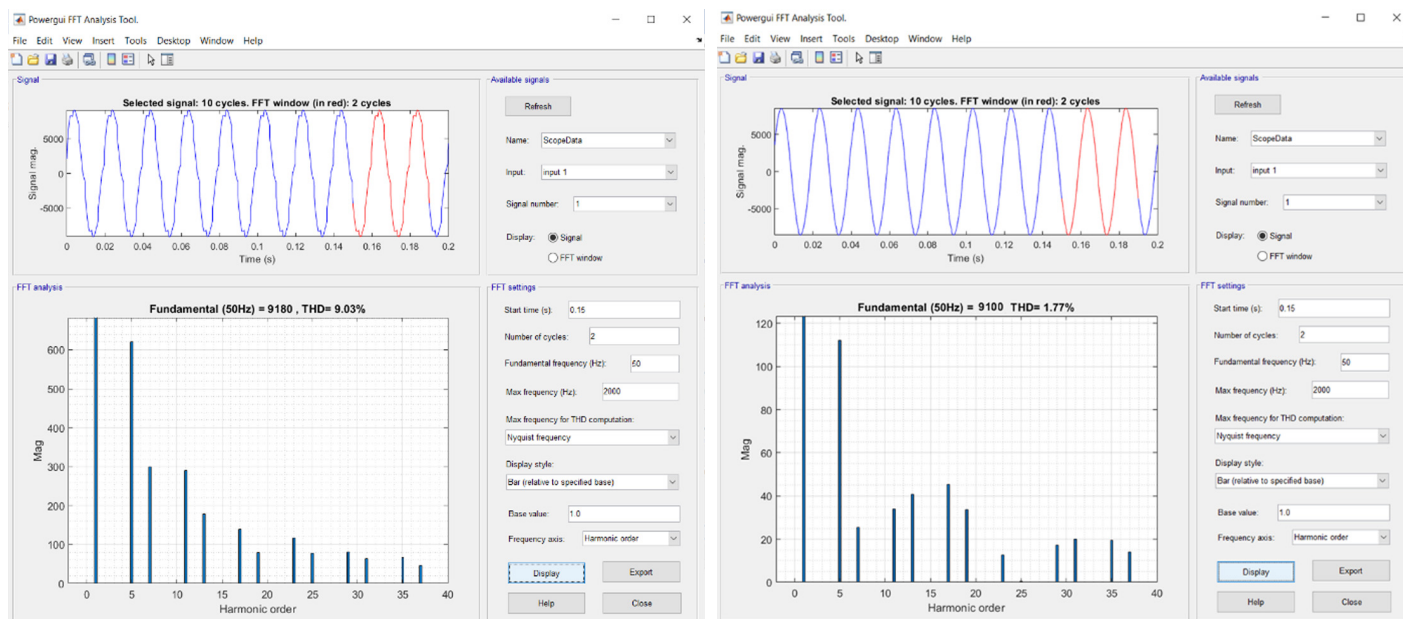


Рис. 9. Результаты имитационного моделирования системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты с основным технологическим оборудованием и активным фильтром высших гармоник

Результаты имитационного моделирования системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты с основным технологическим оборудованием и активным фильтром высших гармоник (рис. 9) показал значительное снижение суммарного значения напряжения гармонических составляющих (THD (U)), что подтверждает эффективность использования активного фильтра высших гармоник в подземных электрических сетях угольных шахт.

Заклучение

Представленные результаты исследований на основании разработанной методики в специфических условиях высокопроизводительных выемочных участков угольных шахт позволили определить показатели качества электрической энергии. В частности, по определению суммарного значения напряжения гармонических составляющих (THD (U)) и коэффициента мощности $\cos \varphi$. Также было обосновано применение устройств повышения качества электрической энергии в условиях подземных электрических сетей высокопроизводительных угольных шахт, выбор кото-

рых осуществляется по предложенной методике. Настройка параметров устройства повышения качества электрической энергии в подземных электрических сетях осуществляется в соответствии с предложенной методикой, благодаря которой были получены аналитические зависимости, позволяющие определить параметры активного фильтра для конкретных условий подземных электрических сетей в зависимости от гармонического состава, уровней напряжения и мощности потребителей выемочных участков.

Предложенная имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты, позволяет исследовать условия демпфирования высших гармоник с помощью устройства повышения качества электрической энергии. Использование предложенного технического решения по повышению качества электрической энергии согласно имитационному моделированию позволило сделать заключение о возможности демпфирования высших гармоник, в частности, их снижения суммарного значения напряжения гармонических составляющих (THD (U)) с 9,07 до 1,77 %.

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.: Изд-во ООО «Московский издательский дом»; 2009. 396 с.
2. Сидоренко А.А., Дмитриев П.Н., Ярошенко В.В. Комплексное обоснование технологической структуры угольной шахты. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(8):5–22. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_5
3. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Meshkov A.A., Sidorenko S.A. Reproduction of the longwall panels: modern requirements for the technology and organization of the development operations at coal mines. *Eurasian mining*. 2020;(2):15–30. <https://doi.org/10.17580/em.2020.02.05>



4. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Повышение уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты. *Горный журнал*. 2019;(4):85–89. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.04.19>
5. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Анализ электромеханических систем выемочных комбайнов угольных шахт высокой производительности. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2019;(3):17–21. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2019-3-17-21>
6. Копылов К.Н., Кубрин С.С., Решетняк С.Н. Актуальность повышения уровня энергоэффективности и безопасности выемочного участка угольной шахты. *Уголь*. 2018;(10):66–71. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-66-67>
7. Пивняк Г.Г., Заика В.Т., Самойленко В.В. Научные и методические основы эффективного использования электроэнергии на угольных шахтах Украины. *Горный журнал*. 2010;(7):92–96.
8. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М. Повышение энергоэффективности механизированного очистного забоя угольной шахты. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(9):122–134. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_9_0_122
9. Косарева-Володько О.В. Анализ существующих подходов и систем диагностирования масляных трансформаторов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(2):129–135. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-129-135>
10. Решетняк М.Ю. Исследование гармонического состава в электрических сетях поверхностного комплекса высокопроизводительных угольных шахт. *Электротехнические и информационные системы и комплексы* 2019;(4):61–67. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-61-67>
11. Плащанский Л.А., Решетняк М.Ю. Анализ гармонического состава в электрических сетях пониженных подстанций угольных шахт. *Горный журнал*. 2020;(5):63–67. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.05.11>
12. Шевырёв Ю.В., Шевырева Н.Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем. *Горный журнал*. 2019;(1):66–69. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>
13. До Т.Л. Исследование, оценка и предложения по решению проблемы качества электроэнергии для системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):121–127. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-121-127>
14. Limongi L.R., da Silva Filho L.R., Genu L.G.B., Bradaschia F., Cavalcanti M.C. Transformerless hybrid power filter based on a six-switch two-leg inverter for improved harmonic compensation performance. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(1):40–51. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2327571>
15. Bebikhov Y.V., Egorov A.N., Semenov A.S. How higher harmonics affect the electrical facilities in mining power systems. In: *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111965>
16. Cheng M., Yanbin L. Research on application of active power filter in harmonic wave suppression of coal mine. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*. 2014;28(11):107–110.
17. Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Boikov A.I. The active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter. In: *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2017. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2017.8124786>
18. Semenov A.S., Kuznetsov N.M. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine. *Measurement Techniques*. 2014;57(4):417–420. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0470-8>
19. 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 преобразователями. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева; 2018. 180 с.
20. Герман-Галкин С.Г. *Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink*. СПб.: Издательство Лань; 2013. 448 с.

References

1. Ruban A.D., Artemyev V.B., Zaburdyaev V.S., Zaburdyaev G.S., Rudenko Y.F. *Problems of providing high productivity of stoping faces in methane-abundant mines*. Moscow: Moscow Publishing House LLC Publ.; 2009. 396 p. (In Russ.)
2. Sidorenko A.A., Dmitriyev P.N., Yaroshenko V.V. Integrated justification of technological structure for coal mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(8):5–22. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_8_0_5
3. Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Meshkov A.A., Sidorenko S.A. Reproduction of the longwall panels: modern requirements for the technology and organization of the development operations at coal mines. *Eurasian Mining*. 2020;(2):15–30. <https://doi.org/10.17580/em.2020.02.05>



4. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. Improvement of energy efficiency and safety in coal longwalls. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(4):85–89. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.04.19>
5. Plashyansky L., Reshetnyak M. High-performance coal mining shearer loader electromechanical systems. *Energy Safety and Energy Economy*. 2019;(3):17–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2019-3-17-21>
6. Kopylov K.N., Kubrin S.S., Reshetnyak S.N. The importance of improving energy efficiency and safety of coal mine extraction area. *Ugol'*. 2018;(10):66–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-10-66-67>
7. Pivnyak G.G., Zaika V.T., Samoilenko V.V. Scientific and methodical grounds of efficient usage of electric power at coal mines in the Ukraine. *Gornyi Zhurnal*. 2010;(7):92–96. (In Russ.)
8. Babokin G.I., Shprekher D.M. Enhancement of energy efficiency in fully mechanized longwall mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(9):122–134. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_9_0_122
9. Kosareva-Volod'ko O.V. Review of the current approaches and systems of oil transformer diagnostics. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(2):129–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-02-0-129-135>
10. Reshetnyak M. Yu. Study of harmonic composition in the electrical networks of the surface complex of high-performance coal mines. *Electrical and Information Systems and Complexes*. 2019;(4):61–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2019-15-4-61-67>
11. Plashchanskiy L.A., Reshetnyak M. Yu. Analysis of harmonic composition in electrical networks of step-down substations in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(5):63–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.05.11>
12. Shevyrev Yu.V., Shevyreva N.Yu. Improvement of voltage waveform in power supply systems with dynamic rectifier in mineral mining and processing industry. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(1):66–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.01.14>
13. Do T.L. Research, assessment and proposals on resolving power quality problem for the power supply system of Lam Dong alumina refinery, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):121–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-121-127>
14. Limongi L.R., da Silva Filho L.R., Genu L.G.B., Bradaschia F., Cavalcanti M.C. Transformerless hybrid power filter based on a six-switch two-leg inverter for improved harmonic compensation performance. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(1):40–51. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2327571>
15. Bebikhov Y.V., Egorov A.N., Semenov A.S. How higher harmonics affect the electrical facilities in mining power systems. In: *2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2020. Pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9111965>
16. Cheng M., Yanbin L. Research on application of active power filter in harmonic wave suppression of coal mine. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*. 2014;28(11):107–110.
17. Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Boikov A.I. The active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter. In: *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2017. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2017.8124786>
18. Semenov A.S., Kuznetsov N.M. An analysis of the results of monitoring the quality of electric power in an underground mine. *Measurement Techniques*. 2014;57(4):417–420. <https://doi.org/10.1007/s11018-014-0470-8>
19. Shevyrev Yu.V., Shevyrev N.Yu., Plekhov A.S., Titov D.Yu. *Computer models application for selecting power quality regulators for electric drives with semiconductor converters*. Nizhniy Novgorod: R.E. Alekseyev Nizhniy Novgorod State Technical University; 2018. 180 p. (In Russ.)
20. German-Galkin S.G. *Virtual semiconductor systems laboratories in Matlab-Simulink environment*. St. Petersburg: Lan' Publishing House; 2013. 448 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Леонид Александрович Плащанский – кандидат технических наук, профессор кафедры «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (НИТУ МИСиС), г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [57193312566](https://orcid.org/0000-0002-5719-3312); e-mail pla3768@yandex.ru

Сергей Николаевич Решетняк – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории 2.3 «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений», Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6982-5583](https://orcid.org/0000-0002-6982-5583), Scopus ID [57117619500](https://orcid.org/0000-0001-7611-9500); e-mail reshetniak@inbox.ru



Мария Юрьевна Решетняк – научный сотрудник лаборатории 2.3 «Геотехнологических рисков при освоении газоносных угольных и рудных месторождений», Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук (ИПКОН РАН), г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [57210212672](#); e-mail maria_reshetnyak@mail.ru

Information about the authors

Leonid A. Plashchanskiy – Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of the Mining Industry, National University of Science and Technology “MISiS” (NUST “MISiS”), Moscow, Russian Federation; Scopus ID [57193312566](#); e-mail pla3768@yandex.ru

Sergey N. Reshetnyak – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory 2.3 “Geotechnological Risks in the Development of Gas-Bearing Coal and Ore Deposits”, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6982-5583](#), Scopus ID [57117619500](#); e-mail reshetniak@inbox.ru

Maria Yu. Reshetnyak – Researcher of Laboratory 2.3 “Geotechnological risks in the development of gas-bearing coal and ore deposits”, Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Scopus ID [57210212672](#); e-mail maria_reshetnyak@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2021

Поступила после рецензирования 02.01.2022

Принята к публикации 01.02.2022

Received 25.05.2021

Revised 02.01.2022

Accepted 01.02.2022