

АНАЛИЗ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ И КОНДЕНСАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Ю.А. Сычев¹, В.Н. Костин¹, В.А. Сериков¹, М.Е. Аладын¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: m.aladyin@gmail.com

Аннотация: На основе математического, имитационного и физического моделирования исследованы несинусоидальные режимы типовых систем электроснабжения обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств с нелинейной нагрузкой при суточном изменении мощности нелинейной и линейной нагрузки, с учетом наличия конденсаторной батареи компенсации реактивной мощности линейной нагрузки. Установлены основные закономерности возникновения, растекания и изменения по величине высших гармоник тока в типовых схемах электроснабжения обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств с трансформаторами различной мощности, напряжения и конструкции. По результатам исследований сформулированы требования по повышению точности, допустимым ограничениям и допущениям при моделировании резонансных процессов при несинусоидальных режимах с целью обоснованного выбора технических средств и решений по повышению качества электроэнергии в части снижения уровня высших гармоник тока и напряжения. На основе выявленных закономерностей даны рекомендации по снижению негативного влияния высших гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой, на элементы систем электроснабжения, в частности на конденсаторные батареи, и качество напряжения на линейной нагрузке. По результатам исследований разработан обобщенный алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии.

Ключевые слова: несинусоидальность, конденсаторные установки, активные полупроводниковые преобразователи, реактивная мощность, высшие гармоники, гармонические искажения, качество электроэнергии, нелинейная нагрузка, электромагнитная совместимость.

Для цитирования: Сычев Ю. А., Костин В. Н., Сериков В. А., Аладын М. Е. Анализ несинусоидальных режимов в системах электроснабжения горных предприятий с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 1. – С. 159–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159.

Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining

Yu.A. Sychev¹, V.N. Kostin¹, V.A. Serikov¹, M.E. Aladin¹

¹ Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: m.aladyin@gmail.com

Abstract: The mathematical, simulation and physical modeling is undertaken to analyze the nonsinusoidal modes in power-supply systems of concentration factories and tailings facilities, under nonlinear loading during daily variation in the intensity of the linear and nonlinear loading, with regard to the presence of a capacitor to compensate the reactive power of the linear load. The basic patterns of the initiation, diffusion and change of the higher current harmonics in the standard power-supply systems of concentration factories and tailings storages equipped with transformers of different capacity, voltage and design are found. Based on the research findings, the requirements on precision as well as allowable assumptions and constraints are formulated for modeling of resonance processes in the nonsinusoidal modes toward the justified selection of the solutions and equipment for the higher quality power in terms of reduced higher harmonics of current and voltage. On the ground of the found patterns, the recommendations are given to abate the adverse effect of the higher current harmonics due to the nonlinear load on the power-supply system components, in particular, capacitors, and on the quality of voltage in linear loading. Using the research results, the generalized algorithm is developed for the modeling and analysis of the nonsinusoidal modes toward the validated choice of the solutions or equipment to improve power quality.

Key words: nonharmonicity, capacitors, active semiconductor converters, reactive power, higher harmonics, harmonic distortions, power quality, nonlinear load, electromagnetic compatibility.

For citation: Sychev Yu. A., Kostin V. N., Serikov V. A., Aladin M. E. Nonsinusoidal modes in power-supply systems with nonlinear loads and capacitors in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(1):159-179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_1_0_159.

Введение

Современные системы электроснабжения горных предприятий характеризуются широким распространением нелинейной нагрузки в виде систем частотно-регулируемого электропривода технологических установок. Данный факт является причиной наличия высших гармоник тока и напряжения, негативно влияющих на уровень качества электрической энергии и электромагнитной совместимости электрооборудования.

За счет искажения формы кривых напряжения и тока высшими гармониками появляются дополнительные потери напряжения в сети и дополнительный нагрев ее элементов, токовая перегрузка оборудования, наводки в телекоммуникационных сетях, акустический шум в электромагнитном оборудовании, вибра-

ция в электрических машинах и другие негативные явления [1, 2].

В системах электроснабжения горных предприятий, в частности обогатительных фабрик, большинство линейных и нелинейных нагрузок изменяются по величине в течение суток в достаточно широком диапазоне. Вместе с изменением линейных нагрузок меняется и мощность регулируемых конденсаторных батарей, устанавливаемых для компенсации реактивной мощности линейной нагрузки.

Такие изменения мощности конденсаторной батареи при неизменной индуктивности питающей сети могут привести к резонансным явлениям на частоте какой-либо гармоники, что обусловит недопустимую токовую перегрузку конденсаторов.

Исследованию высших гармоник в системах электроснабжения горных предприятий посвящено достаточно много работ, в большинстве которых анализируются процессы в упрощенной однофазной схеме, в которой исследуемая гармоника представляется источником тока бесконечной мощности [3]. Однако отсутствуют работы, в которых рассматривались бы процессы при суточном изменении нагрузок и, соответственно, мощности конденсаторных батарей в трехфазных моделях систем электроснабжения различной конфигурации, напряжения и мощности.

Известно большое количество технических средств и решений для снижения негативного влияния высших гармоник. Это, в частности, применение конденсаторов на повышенное напряжение, пассивных, активных и гибридных фильтров гармоник, антирезонансных дросселей, силовых трансформаторов со специальным соединением обмоток и другое. Используются также и схемные решения: подключение нелинейных нагрузок как можно ближе к источнику большой мощности, присоединение нелинейных и линейных нагрузок к разным секциям шин, питание нелинейных нагрузок от отдельных трансформаторов, ограничение мощности подключаемой нелинейной нагрузки до 25% от мощности питающего трансформатора.

При этом в процессе анализа сложных несинусоидальных режимов необходимо учитывать одновременную работу конденсаторных установок компенсации реактивной мощности и фильтрокомпенсирующих устройств коррекции качества электроэнергии.

Данные устройства могут быть установлены на разных уровнях напряжения и влиять друг на друга определенным образом в зависимости от их номинальных параметров и характеристик. Также в подобных случаях следует учитывать

вероятность возникновения резонансных явлений [4, 5].

Таким образом, в существующих системах электроснабжения горных предприятий анализ сложных несинусоидальных режимов необходим для корректного выбора структуры и места установки различных фильтрокомпенсирующих устройств при наличии уже подключенных конденсаторных установок и во избежание потенциальных резонансных явлений. Это также поможет повысить эффективность компенсации высших гармоник.

Цель работы — исследование процессов формирования, растекания и изменения по величине высших гармоник тока, генерируемых нелинейной нагрузкой, в системах электроснабжения горных предприятий различной конфигурации на примере обогатительных фабрик, а также напряжения при суточном изменении мощности нагрузок и конденсаторных батарей с разработкой мер по снижению негативного влияния гармоник на оборудование и качество напряжения [6, 7].

Метод исследования

В настоящее время одним из наиболее эффективных инструментов анализа режимов работы систем электроснабжения при несинусоидальных режимах является компьютерное и физическое моделирование. Это дает возможность исследователю быстро и без существенных затрат рассмотреть свойства и поведение систем электроснабжения в возможных на практике ситуациях, тогда как выполнить исследование на реальном объекте в подавляющем большинстве случаев оказывается практически невозможно [7—9]. В качестве инструмента исследования принято компьютерное имитационное моделирование на базе программного комплекса Multisim, а также физическое моделирование на базе лабораторного стенда.

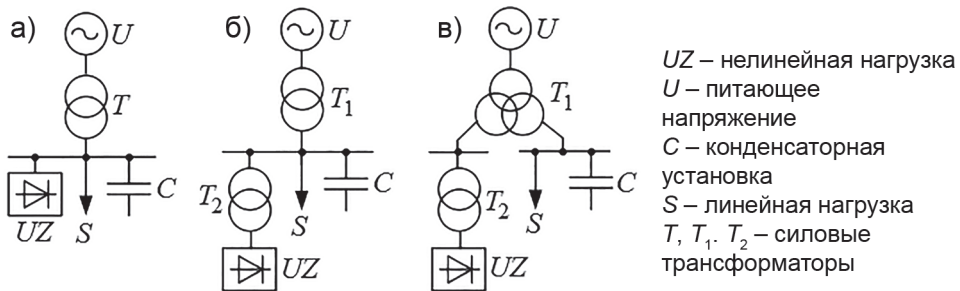


Рис. 1. Исследуемые типовые схемы систем электроснабжения обогатительных фабрик: схема электроснабжения маломощной низковольтной нагрузки (а); схема электроснабжения мощной нагрузки с общей секцией шин на стороне высокого напряжения (б); схема электроснабжения мощной нагрузки с секционированием на стороне высокого напряжения и трехобмоточным питающим трансформатором (в). Составлено авторами

Fig. 1. The studied typical schemes of power supply systems of concentrating plants: scheme of power supply of a low-power low-voltage load (a); scheme of power supply of a powerful load with a common bus section on the high voltage side (b); scheme of power supply of a powerful load with partitioning on the high voltage side and a three-winding supply transformer (v). Compiled by the authors

В процессе исследований рассматривались режимы работы типовых, наиболее распространенных систем электроснабжения обогатительных фабрик и хвостовых хозяйств (рис. 1), в которых присутствовала нелинейная нагрузка — трехфазный мостовой выпрямитель UZ , линейная нагрузка мощностью S , конденсаторная батарея емкостью C , получающие питание через трансформаторы T , T_1 и T_2 от энергосистемы напряжением U . Моделировалось суточное изменение мощности вентильного преобразователя P_d нелинейной нагрузки UZ , линейной нагрузки S и конденсаторной батареи мощностью Q_C .

Питающая энергосистема моделировалась тремя фазными напряжениями U , трансформаторы и линейная нагрузка — активно-индуктивными сопротивлениями L_T , R_T и L_S , R_S соответственно, нелинейная нагрузка — трехфазным мостовым выпрямителем с сопротивлением нагрузки R_D и сглаживающим дросселем L_D , конденсаторная батарея — емкостями C .

Схема, представленная на рис. 1, а, характерна для электроснабжения объектов обогатительных фабрик неболь-

шой мощности. Трансформатор T имеет классы напряжения 10/0,4 кВ, а нагрузки и конденсаторная батарея подключены к одной секции шин.

В схемах рис. 1, б, в нелинейная нагрузка подключена через трансформатор T_2 напряжением 10/0,4 кВ, а линейная нагрузка и конденсаторная батарея расположены на напряжении 10 кВ и получают питание от трансформатора T_1 напряжением 110/10 кВ, что наиболее характерно для крупных обогатительных фабрик с хвостовыми хозяйствами, когда несколько мощных высоковольтных электроприемников (насосы, мельницы) подключаются к распределительному устройству 6(10) кВ, а большое число низковольтной нелинейной нагрузки (частотно-регулируемый электропривод насосов, флотомашин, дробилок, классификаторов, мельниц) сосредоточено по производственным корпусам и питается от комплектных трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ [10 — 12].

Поскольку в рассматриваемых системах электроснабжения выпрямитель, как нелинейный элемент, будет генерировать весь спектр высших гармоник тока, учесть величины сопротивлений

в зависимости от частоты каждой гармоники не представляется возможным. В связи с этим принято основное допущение: все активно-индуктивные элементы (трансформаторы и линейные нагрузки) учитывались последовательным соединением индуктивности и активного сопротивления, рассчитанными для первой гармоники. При моделировании индуктивные сопротивления элементов изменялись в соответствии с частотой гармоник, а активные сопротивления не менялись, т.е. не учитывался эффект вытеснения тока к поверхности проводника при увеличении частоты гармоник [13–15].

При моделировании параметры двухобмоточных трансформаторов определялись следующим образом:

$$R_T = \Delta P_{sc} \frac{U_{sc} U_T^2}{100 S_T^2}, L_T \approx \frac{U_{sc}}{100} \frac{U_T^2}{314 S_T}, \quad (1)$$

где U_T — номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора, В; U_{sc} — напряжение короткого замыкания, %; ΔP_{sc} — потери короткого замыкания, Вт; S_T — номинальная мощность трансформатора, ВА.

При моделировании параметры трехобмоточных трансформаторов определялись следующим образом:

$$L_{TH} \approx \frac{U_{sc}}{100} \frac{U_T^2}{314 S_T} \left(1 - \frac{k}{4}\right), \quad (2)$$

$$L_{TL} \approx \frac{U_{sc}}{100} \frac{U_T^2}{314 S_T} \frac{k}{2}$$

$$R_{TH} = 0,5 \Delta P_{sc} \frac{U_T^2}{S_T^2}, R_{TL} = \Delta P_{sc} \frac{U_T^2}{S_T^2}. \quad (3)$$

В формулах (2) и (3) приняты следующие обозначения: L_{TH} и R_{TH} — соответственно индуктивное и активное сопротивление обмотки высшего напряжения трансформатора; L_{TL} и R_{TL} — соответственно индуктивное и активное сопротивление обмотки низшего напряжения трансформатора; $k = 3,5$ — коэф-

фициент расщепления. Остальные обозначения аналогичны формуле (1).

Параметры линейной нагрузки определялись следующим образом:

$$Z_s = R_s + jL_s = \frac{U_T^2}{k_T S_T} \cos \varphi + \frac{U_T^2}{314 \cdot k_T S_T} \sin \varphi. \quad (4)$$

В формуле (4) приняты следующие обозначения: k_T — коэффициент загрузки трансформатора; $\cos \varphi = 0,7$ — естественный коэффициент мощности линейной нагрузки; S_T — мощность питающего трансформатора, ВА; U_T — напряжение вторичной обмотки питающего трансформатора, В.

Емкость конденсаторной батареи определялась следующим образом:

$$C = \frac{Q_c}{314 \cdot U_T^2}, \quad (5)$$

где Q_c — номинальная реактивная мощность батареи, Вар; U_T — напряжение вторичной обмотки питающего трансформатора, В.

Исследования проводились для типового ряда мощностей трансформаторов с классами напряжения 6–10/0,4 кВ и мощностями в диапазоне от 250 до 2500 кВА, а также с классами напряжения 110/6–10 кВ и мощностями в диапазоне 6300–63 000 кВА.

Для последующего обобщения и анализа результатов моделирования все регулируемые мощности представлялись в относительных единицах. При этом за базисную величину принята номинальная мощность S_T трансформатора T (см. рис. 1, а) или T_1 (см. рис. 1, б, в).

Таким образом, мощность на стороне нелинейной нагрузки в относительных единицах определялась следующим образом:

$$P_d^* = \frac{P_d}{S_T}. \quad (6)$$

Мощность линейной нагрузки в относительных единицах:

$$S^* = \frac{S}{S_T}. \quad (7)$$

Мощность конденсаторной батареи в относительных единицах:

$$Q_c^* = \frac{Q_c}{S_T}. \quad (8)$$

Предварительно было установлено, что параметры линейной нагрузки слабо влияют на процессы, поскольку сопротивление нагрузки на порядок больше сопротивления питающего трансформатора [16, 17]. При пренебрежении влиянием линейной нагрузки, активных сопротивлений трансформаторов и допущении о бесконечной мощности питающей системы U резонанса в исследуемых системах электроснабжения следует ожидать при следующих значениях Q_c^* :

$$Q_c^* \approx \frac{100}{U_{sc} \cdot n^2}. \quad (9)$$

В формуле (9) U_{sc} — напряжение короткого замыкания в % трансформатора T или T_1 согласно рис. 1, а, б, в.

Известно, что трехфазные мостовые управляемые и неуправляемые выпрямители, входящие в состав нелинейной нагрузки, генерируют канонические гармоники с номерами $n = 5, 7, 11, 13$, и т.д. В соответствии с выражениями (9) и (10) в реальном диапазоне изменения мощности $0 < Q_c^* < 0,4$ резонанс для пятой гармоники тока, как наиболее

значительной во всем спектре, не будет иметь места [18–20].

Таким образом, выражения (1)–(9) являются теоретической основой предлагаемого метода анализа несинусоидальных режимов посредством имитационного моделирования с использованием параметров реальных промышленных систем электроснабжения.

Результаты моделирования и их анализ

При моделировании изменялись мощности нелинейной нагрузки P_d^* , линейной нагрузки S^* и, соответственно, мощность конденсаторной батареи Q_c^* с целью поддержания коэффициента мощности линейной нагрузки на уровне 0,92... 0,95. Оценивался уровень качества электроэнергии в системе электроснабжения по суммарному коэффициенту гармонических составляющих напряжения THD_U . Токовая перегрузка конденсаторов оценивалась по коэффициенту перегрузки K_{ovl} .

Также в процессе моделирования изменялись по величине высшие гармоники тока, потребляемые мостовым выпрямителем [21–23].

В соответствии с Российским национальным стандартом качества электроэнергии значение коэффициента THD_U не должно превышать 8% при напряжении до 1 кВ и 5% при напряжении 6–10 кВ. Для конденсаторных установок допуска-

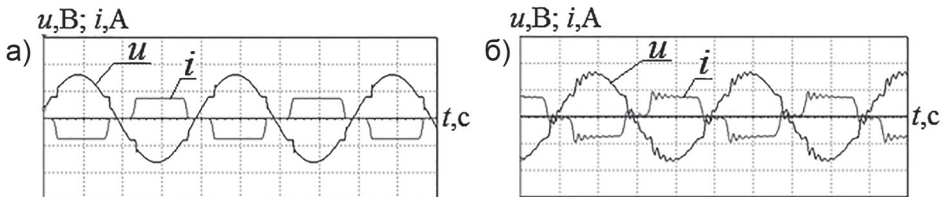


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения на выходе трансформатора T в схеме рис. 1, а при $P_d = 400$ кВт, $P_s = 50$ кВт; без батареи конденсаторов, $Q_c = 50$ квар (а); с батареей конденсаторов, $Q_c = 25$ квар (б). Составлено авторами

Fig. 2. Oscillograms of current and voltage at the output of transformer T in the diagram Fig. 1, a with $P_d = 400$ kW, $P_s = 50$ kW; without a capacitor bank, $Q_c = 50$ kvar (a); with a battery, $Q_c = 25$ kvar (b). Compiled by the authors

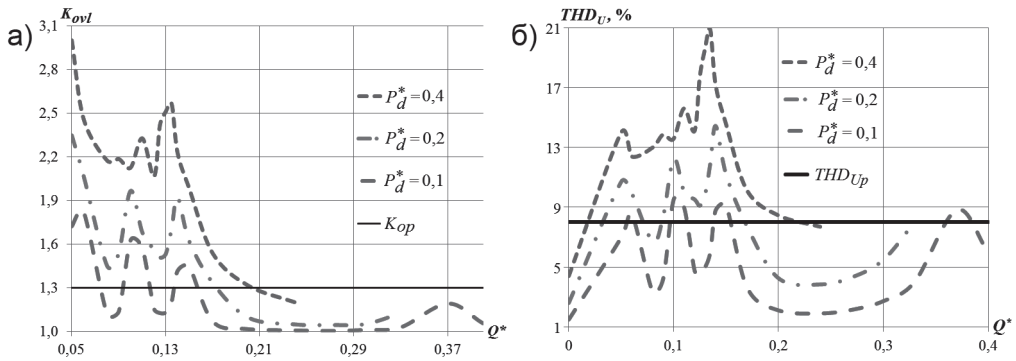


Рис. 3. Зависимости K_{ovl} и THD_U от мощности Q_c^* для схемы рис. 1, а при мощности трансформатора 1000 кВА. Составлено авторами

Fig. 3. K_{ovl} and THD_U dependences on Q_c^* power for the scheme Fig. 1, a with a transformer power of 1000 kVA. Compiled by the authors

ется увеличение тока от наличия высших гармоник не более чем на 30% по отношению к их номинальному току ($K_{ovl} < 1,3$) [22 – 24].

Установлено, что подключение конденсаторов в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой ухудшает качество напряжения за счет появления колебательного перезаряда емкостей батареи в моменты коммутаций вентилей преобразователя. Данный факт отражен на рис. 2 в виде осциллограмм тока и напряжения.

Результаты моделирования с измерением THD_U и K_{ovl} приведены на рис. 3, 4 и 5. Зависимости THD_U и K_{ovl} от Q_c^* построены при условии, что линейная и нелинейная нагрузки в течение суточного изменения не превышали номинальную мощность S_T питающего трансформатора. На рис. 3 приведены результаты моделирования на примере трансформатора мощностью 1000 кВА. Аналогичные закономерности были получены и для других мощностей трансформатора.

Установлено, что во всех схемах имели место резонансные режимы, в которых параметры THD_U и K_{ovl} значительно выходили за пределы допустимых значений. Подтверждена достоверность выражений (9) и (10) для мощности кон-

денсаторной батареи Q_c^* , при которой достигаются резонансные режимы.

Для трансформаторов разной мощности, но одинаковой конструкции и одного класса напряжения результаты моделирования практически не различались. Некоторое количественное отличие результатов было у низковольтной схемы (см. рис. 1, а) с трансформаторами напряжением 10/0,4 кВ, что обусловлено увеличением параметра U_{sc} от 4,5 до 6% с увеличением мощности трансформатора от 250 до 2500 кВА. В этой схеме в соответствии с выражением (9) резонансные явления на частоте каждой гармоники смещались в сторону меньших значений Q_c^* при увеличении мощности трансформатора [25, 26].

Как видно из рис. 3, для низковольтной схемы (см. рис. 1, а) очевидны проблемы в области $0,35 < Q_c^* < 0,2$, где величины коэффициентов THD_U и K_{ovl} намного больше нормируемых значений уже при мощности нелинейной нагрузки $P_d^* > 0,1$.

На рис. 4 приведены результаты моделирования несинусоидального режима для схемы с конденсаторными установками на высоком напряжении (см. рис. 1, б). При этом мощность трансформатора T_1 напряжением 110/10 кВ

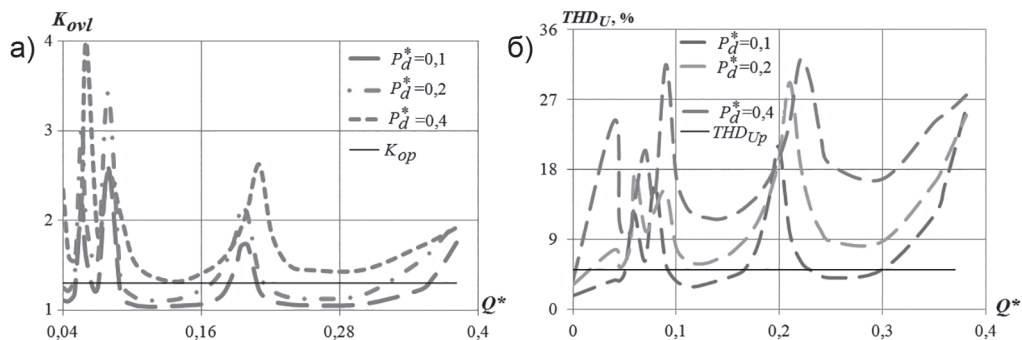


Рис. 4. Зависимости K_{ovl} и THD_U от мощности Q_c^* для схемы на рис. 1, б. Составлено авторами
 Fig. 4. K_{ovl} and THD_U dependences on Q_c^* power for the scheme Fig. 1, b. Compiled by the authors

изменялась в диапазоне от 6300 до 16 000 кВА. Количество и мощность трансформаторов T_2 принимались в соответствии с мощностью P_d . В этом режиме перегрузка конденсаторов в резонансных режимах превышает допустимую ($K_{ovl} > 1,3$) при $P_d^* > 0,2$.

Кроме того, качество напряжения на линейной нагрузке не соответствует нормам во всем диапазоне изменения мощности конденсаторной установки Q_c^* ($THD_U > 5\%$).

На рис. 5 приведены результаты моделирования для схемы с конденсаторами на высоком напряжении при рас-

щеплении обмотки питающего трансформатора T_1 (см. рис. 1, в).

Результаты моделирования данной схемы по сравнению с предыдущей показали следующие ключевые отличия:

- выявлены более узкие области резонансных режимов;
- установлено, что недопустимая токовая перегрузка конденсаторов в резонансных режимах достигается при $P_d^* > 0,5$;
- выявлен неприемлемый по требованиям нормативной документации уровень качества напряжения в резонансных режимах при условии $P_d^* > 0,2$;

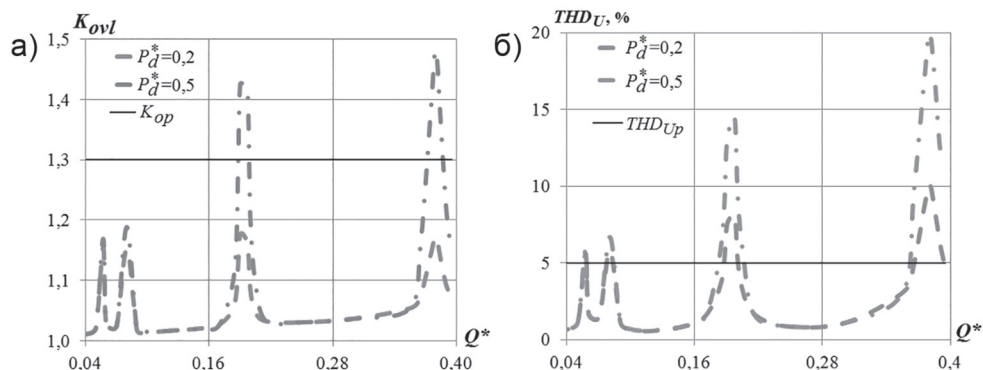


Рис. 5. Зависимости K_{ovl} и THD_U от мощности Q_c^* (см. рис. 1, в); трансформатор T_1 напряжением 110/10 кВ, мощностью 25 000... 63 000 кВА; количество и мощность трансформаторов T_2 принимались в соответствии с мощностью R_d . Составлено авторами

Fig. 5. K_{ovl} and THD_U dependences on Q_c^* power (diagram Fig. 1, b); transformer T_1 with a voltage of 110/10 kV, with a capacity of 25 000...63 000 kVA; the number and power of transformers T_2 were taken in accordance with the power R_d . Compiled by the authors

• в межрезонансных режимах отсутствуют проблемы как с токовой перегрузкой конденсаторов, так и с качеством напряжения, даже при $P_d^* > 0,5$.

Из приведенных результатов моделирования (см. рис. 3, 4 и 5) следует, что в условиях несинусоидальных режимов при суточном регулировании мощности нагрузок и конденсаторной батареи для всех рассмотренных схем необходимо применять меры по защите конденсаторов от токовой перегрузки. Также необходимо предусматривать технические средства и решения по улучшению качества напряжения с учетом выявленных закономерностей вариации параметров несинусоидальных режимов [27 – 29].

Кроме параметров K_{ovl} и THD_U при моделировании несинусоидальных режимов оценивалось изменение величин гармоник выпрямителя при увеличении его мощности P_d^* . Известно, что для трехфазного мостового выпрямителя величина тока n -й гармоники I_n связана с величиной первой гармоники I_1 соотношением $I_n = I_1/n$, справедливым при малых значениях мощности P_d^* . В [30] установлено, что при загрузке трансформатора нелинейной нагрузкой в диапа-

зоне $0 < P_d^* < 1$ относительные амплитуды гармоник $I_n^* = I_n/I_1$ практически линейно уменьшаются, что характеризуется коэффициентом наклона k_n , который для различных гармоник принимает следующие значения:

- для 5-й гармоники при изменении ее относительной амплитуды от 0,17 до 0,2 коэффициент наклона составляет $k_5 = 0,1-0,15$;

- для 7-й гармоники при изменении ее относительной амплитуды от 0,1 до 0,14 коэффициент наклона составляет $k_7 = 0,18-0,28$;

- для 11-й гармоники при изменении ее относительной амплитуды от 0,04 до 0,09 коэффициент наклона составляет $k_{11} = 0,39-0,56$;

- для 13-й гармоники при изменении ее относительной амплитуды от 0,02 до 0,04 коэффициент наклона составляет $k_{13} = 0,58-0,69$.

Установлено, что с увеличением параметра трансформатора U_{sc} (от 4,5 до 10,5%), характеризующего сопротивление трансформатора на частоте n -й гармоники X_{Tn} , тем больше увеличивается коэффициент k_n . Вследствие этого гармоники тока, генерируемые преобразователем,

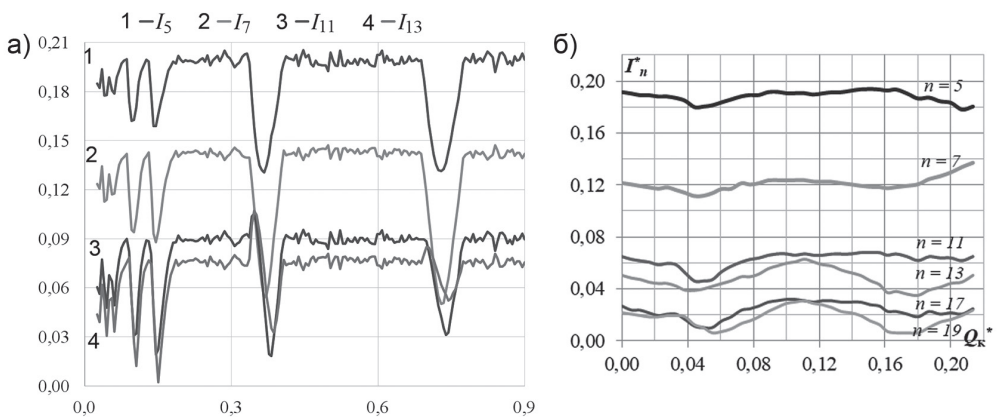


Рис. 6. Зависимости амплитуд гармоник тока выпрямителя от мощности Q_c^* : компьютерная модель (а); физическая модель (б). Составлено авторами

Fig. 6. Dependences of harmonics amplitudes of rectifier current on power Q_c^* : computer model (a); physical model (b). Compiled by the authors

при моделировании несинусоидальных режимов должны быть представлены в виде источников тока с параллельным внутренним сопротивлением. Это сопротивление зависит от мощности нелинейной нагрузки P_d^* и сопротивления питающего трансформатора и должно определяться по формуле

$$R_n = \frac{1 - k_n P_d^*}{k_n P_d^*} X_{Tn}. \quad (10)$$

Этот факт объясняет значительное снижение амплитуд характерных гармоник, как видно из рис. 6, а, в области резонансных режимов, когда сопротивление резонансного контура резко возрастает и большая часть тока гармоники замыкается по внутреннему сопротивлению R_n . В межрезонансных режимах, когда сопротивление резонансного контура невелико, величины высших гармоник близки к значениям $I_n^* = I_n / I_1$.

Для подтверждения полученных результатов в процессе моделирования результатов была создана лабораторная физическая модель системы электроснабжения, соответствующая схеме на рис. 1, а. Эта модель включала трансформатор номинальной мощностью $S_T = 19$ кВА, с первичным напряжением $U_1 = 380$ В, вторичным напряжением $U_2 = 220$ В, с напряжением короткого замыкания $U_{SC} = 10\%$, с потерями короткого замыкания $\Delta P_{SC} = 0,5$ кВт. Нелинейная нагрузка представлена в виде трехфазного мостового выпрямителя с диодами на ток 25 А и напряжение 600 В. В качестве нагрузки выпрямителя применялись проволочные реостаты, обеспечивающие выпрямленный ток $I_d = 20$ А. Сглаживание пульсаций выпрямленного тока обеспечивалось дросселем с индуктивностью $L_d = 100$ мГн. Линейной нагрузкой служили проволочные реостаты и дроссели, рассчитанные на ток до 20 А. Регулируемая конденсаторная батарея имела диапазон от 10 до 320 мкФ.

Зависимости, представленные на рис. 6, б и полученные по результатам исследования на физической модели, также показывают снижение относительной амплитуды гармоник в резонансных режимах. Это снижение имеет меньшую величину, чем на рис. 6, а, вследствие большего активного сопротивления трансформатора лабораторной модели по сравнению с компьютерной имитационной моделью. В лабораторных условиях крайне сложно воспроизвести низкий уровень сопротивления питающих трансформаторов реальных промышленных систем электроснабжения с заданным уровнем напряжения короткого замыкания. Однако даже с высоким уровнем активного сопротивления трансформатора физическая модель демонстрирует те же результаты, что и компьютерный аналог. Это подтверждает адекватность имитационной модели и возможность ее применения для анализа сложных несинусоидальных режимов.

Следовательно, при исследовании сложных несинусоидальных режимов для получения более точных результатов в резонансных режимах для n -й гармоники необходимо учитывать величину R_n . При моделировании это достигается путем введения параллельно источнику n -й гармоники внутреннего сопротивления R_n . Использование упрощенных однофазных моделей, как это делается во многих научных трудах, не позволяет получить требуемую точность при анализе сложных несинусоидальных режимов с целью обоснованного выбора технических средств и решений для повышения качества электроэнергии места их установки в системах электроснабжения.

Результаты имитационного моделирования на примере схемы электроснабжения на рис. 1, а показали, что при подключении параллельного активного фильтра на его выходе нужно уста-

навливать дополнительный пассивный RC фильтр. Это позволяет сохранить эффективность активной фильтрации высших гармоник при наличии конденсаторной установки во избежание возникновения резонансных явлений.

При этом включение классического параллельного активного фильтра при включенной конденсаторной установке увеличивает THD_1 на шинах с 24,74% до 36,08%, а THD_U — с 6,32% до 6,88%, что свидетельствует о наличии резонансных явлений. При оснащении активного фильтра выходным RC фильтром THD снижается до 11,38%, а THD_U — до 2,86%. Таким образом, классический активный фильтр превращается в гибридный и обеспечивает эффективную компенсацию высших гармоник. При этом систему управления активным фильтром, согласно результатам исследований [4, 17], необходимо реализовывать на основе фазовых преобразований и теории мгновенной мощности.

Обсуждение

Для исключения возникновения резонансных явлений при несинусоидальных режимах во избежание разрушения конденсаторных батарей можно рассматривать различные технические средства и решения.

При известном параметре U_{sc} источника питания преобразователя можно выбрать регулируемую конденсаторную батарею с такими ступенями, чтобы избежать значений мощности батареи, полученных по выражению (9). Однако такой подход неудобен вследствие унификации в промышленности стандартного ряда мощностей регулируемых конденсаторных батарей.

При увеличении номинального напряжения конденсатора его реактивная мощность увеличивается пропорционально квадрату напряжения. По рекомендациям для сети 400 В следует применять

конденсаторы на 480 В. Включение такого конденсатора в сеть 400 В позволит увеличить его рабочий ток примерно в 1,4 раза, а допустимый ток перегрузки — практически в 2 раза.

Установка антирезонансных дросселей в цепи конденсаторной батареи позволяет изменить общее сопротивление резонансного контура для высших гармоник с индуктивно-емкостного до индуктивного. Принятые VDEW (Ассоциацией немецких электротехнических компаний) частоты расстройки колебательного контура составляют $p = 14; 7; 5,67\%$. Это означает, что сопротивление дросселя в долях от сопротивления емкости на частоте 50 Гц составляет 14, 7 или 5,67% [30–32]. При $p = 14\%$ осуществляется защита конденсаторов от всех гармоник, начиная с 3-й, при $p = 7\%$ — от всех гармоник, начиная с 5-й, при $p = 5,67\%$ — от всех гармоник, начиная с 7-й.

Недостатком этого метода для регулируемых конденсаторных батарей является необходимость установки антирезонансного дросселя на каждой ступени регулирования, что значительно увеличивает стоимость установки из-за возрастания расхода меди и стали с увеличением количества ступеней регулируемой конденсаторной батареи [33]. Кроме того, антирезонансные дроссели, ориентированные на защиту конденсаторной батареи, не препятствуют распространению гармоник в системах электроснабжения, а работающие совместно с дросселем конденсаторы должны приниматься на более высокое напряжение, которое определяется по формуле

$$U_c = \frac{U}{1 - p / 100}, \quad (11)$$

где U — исходное сетевое напряжение; U_c — повышенное напряжение конденсаторов для работы с антирезонансными дросселями.

Активные фильтры гармоник, являющиеся управляемыми источниками тока или напряжения заданной величины и гармонического состава, позволяют при соответствующей настройке добиться практически полной компенсации высших гармоник по всему спектру. По сравнению с антирезонансными дросселями активные фильтры существенно дороже, но обладают большим набором функций и свойством адаптивности. Результаты исследований показали необходимость избегать совместной работы конденсаторных установок и классических активных фильтров во избежание резонансных явлений. При этом установка дополнительного пассивного фильтра определенного типа с определенными параметрами на выходе параллельного активного фильтра позволяет последнему эффективно подавлять гармоники тока даже при наличии конденсаторных установок с минимизацией резонансных явлений. В этом случае активный фильтр может рассматриваться как частный случай гибридного фильтра. Таким образом, при несинусоидальных режимах внедрение активных фильтров в существующие системы электроснабжения с установленными конденсаторными установками представляется возможным и эффективным. При этом результаты анализа несинусоидальных режимов с учетом выявленных особенностей, закономерностей и методов моделирования

являются основой корректного выбора места подключения активных фильтров и конденсаторных установок при их совместной работе в системах электроснабжения. Это позволяет обоим устройствам работать корректно, полностью выполняя свои функции в системах электроснабжения обогатительных фабрик переменной конфигурации с учетом вариации параметров питающей сети при совместной работе централизованных и автономных источников.

В [30, 33] даются рекомендации для применения того или иного из указанных выше способов подавления гармоник для низковольтной схемы (см. рис. 1, а) в зависимости от соотношения мощности питающего трансформатора и мощности источника гармоник:

- при $P_d^* < 0,15$ целесообразно применять обычные конденсаторы;
- при $0,15 < P_d^* < 0,25$ целесообразно применять конденсаторы с повышенным номинальным напряжением;
- при $0,25 < P_d^* < 0,6$ целесообразно применять конденсаторы с повышенным номинальным напряжением и антирезонансными дросселями;
- при $P_d^* > 0,6$ целесообразно применять активные фильтры.

Результаты, полученные при компьютерном моделировании (см. рис. 3), несколько отличаются от указанных в [30, 34, 35] и показывают, что в низковольтной схеме (см. рис. 1, а) уже при мощ-

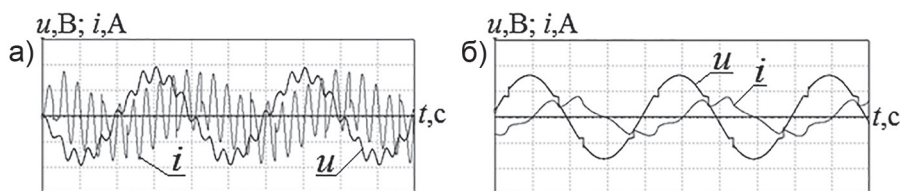


Рис. 7. Ток и напряжение на конденсаторной батарее в схеме на рис. 1, а: $S_T = 1000$ кВА, $P_d = 400$ кВт, $P_s = 300$ кВт, $Q_s = 300$ квар, $Q_c = 150$ квар, (резонанс на 11-й гармонике), $K_{ovl} = 2,1$; $THD_U = 15,6\%$ (а); то же, но с антирезонансными дросселями, $K_{ovl} = 1,08$; $THD_U = 3\%$ (б). Составлено авторами

Fig. 7. Current and voltage on the capacitor bank in the diagram Fig. 1, а: $S_T = 1000$ kVA, $P_d = 400$ kW, $P_s = 300$ kW, $Q_s = 300$ kvar, $Q_c = 150$ kvar, (resonance at the 11th harmonic), $K_{ovl} = 2,1$; $THD_U = 15,6\%$ (а); the same, but with anti-resonance chokes, $K_{ovl} = 1,08$; $THD_U = 3\%$ (б). Compiled by the authors

ности $P_d^* > 0,1$ следует применять меры по подавлению гармоник.

Рекомендации [18] по применению конденсаторов с повышенным на 20% номинальным напряжением согласуются с данными рис. 3, а. Видно, что эти конденсаторы с допустимой двукратной перегрузкой следует устанавливать до мощности $P_d^* < 0,25$. Однако в этом случае при $Q_c^* < 0,15$ и $Q_c^* > 0,35$ не выполняются требования к качеству напряжения (см. рис. 3, б).

При $P_d^* > 0,25$ уже необходимо применять антирезонансные дроссели, эффективность которых иллюстрируется на рис. 7, где приведены осциллограммы тока и напряжения на конденсаторной батарее. В первом случае (рис. 7, а) антирезонансного дросселя нет, во втором (рис. 7, б) установлен антирезонансный дроссель с индуктивностью 0,19 мГн, что соответствует частоте расстройки $p = 5,67\%$.

Видно, что на осциллограмме рис. 7, б как в кривой тока, так и в кривой напряжения высшие гармоники заметно подавлены, а установка антирезонансных дросселей обуславливает тот же коэффициент THD_U , который имел место при отсутствии конденсаторной батареи (см. рис. 2, а).

Установлено, что при отсутствии конденсаторных батарей в низковольтной схеме требования к качеству напряжения выполняются до мощности $P_d^* < 0,7$. Поскольку подключение конденсаторных батарей ухудшает качество напряжения (см. рис. 2), для этой схемы при $P_d^* < 0,7$ достаточно установки в конденсаторных батареях антирезонансных дросселей. При мощности нелинейной нагрузки $P_d^* > 0,7$ уже необходима установка активного фильтра гармоник. Эти результаты практически совпадают с рекомендациями [30, 36, 37].

Аналогичные условия можно изложить и для других схем электроснабже-

ния, приведенных на рис. 1. Рассмотрим схему на рис. 1, б, в которой источник гармоник и линейная нагрузка с конденсаторной батареей находятся на разных ступенях напряжения. Установлено, что при отсутствии конденсаторной батареи в этой схеме требуемое качество напряжения обеспечивается при $P_d^* < 0,3$. Следовательно, при $P_d^* < 0,3$ для защиты конденсаторов от токовой перегрузки следует устанавливать антирезонансные дроссели с частотой расстройки $p = 5,7\%$. Конденсаторные батареи с такими высоковольтными дросселями существуют и серийно изготавливаются. При $P_d^* > 0,3$ для разгрузки сети от высших гармоник следует применять активный фильтр у нелинейной нагрузки и обычные конденсаторные батареи для компенсации реактивной мощности линейной нагрузки.

Рассмотрим схему, где источник гармоник и линейная нагрузка с конденсаторной батареей подключены к разным вторичным обмоткам трансформатора T_1 (см. рис. 1, в). Установлено, что при отсутствии конденсаторной батареи в этой схеме во всем диапазоне изменения мощности $P_d^* < 1$ показатели качества напряжения на линейной нагрузке не превышали нормативных требований ($THD_U < 2\%$). Это объясняется уменьшением величин гармоник тока из-за большого суммарного сопротивления между источником гармоник и линейной нагрузкой (сопротивление трансформатора T_2 и двух обмоток низкого напряжения трансформатора T_1). Чем больше это сопротивление, тем большая часть тока гармоник замыкается через собственное внутреннее сопротивление гармоник тока, определяемое по формуле (10).

Следовательно, в схеме на рис. 1, в для защиты конденсаторов от токовой перегрузки в резонансных режимах достаточно установки антирезонансных дросселей. Причем в широком диапа-

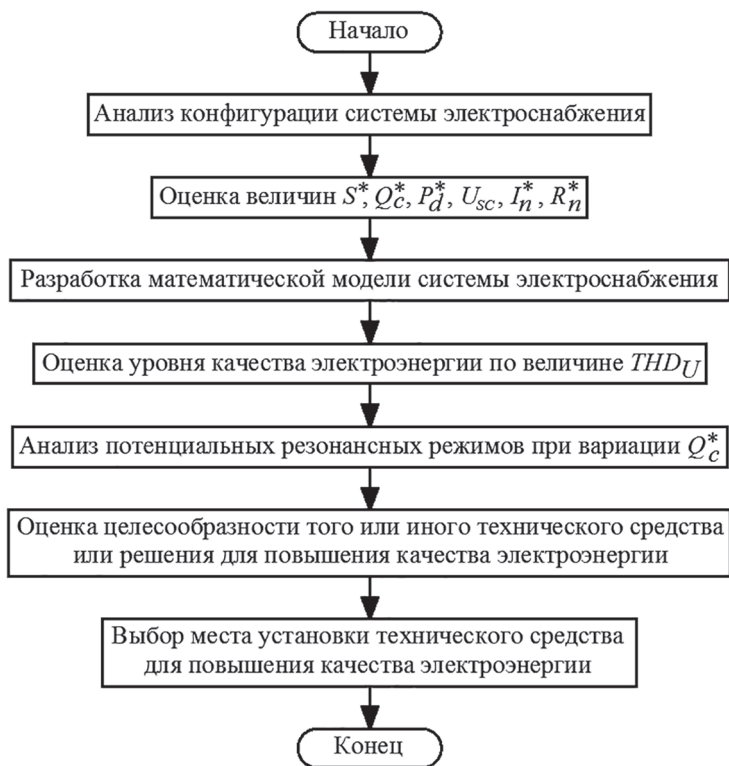


Рис. 8. Обобщенный алгоритм анализа и моделирования несинусоидальных режимов для обоснованного выбора технического средства или решения по повышению качества электроэнергии. Составлено авторами

Fig. 8. Generalized algorithm for analysis and modeling of non-sinusoidal modes for a reasonable choice of technical means or solutions to improve the quality of electricity. Compiled by the authors

зоне регулирования мощности конденсаторной батареи эти дроссели следует установить только на двух ступенях регулирования — при $Q_c^* = 0,2$ и $0,4$ [38]. При более узком диапазоне регулирования мощности конденсаторной батареи $Q_c^* < 0,35$ достаточно установки одного дросселя — при мощности конденсаторной батареи $Q_c^* = 0,2$.

Полученные результаты также показывают, что система электроснабжения с понижающими трансформаторами и конденсаторными установками при определенных условиях является своеобразным пассивным широкополосным фильтром для характерных высших гармоник, генерируемых нелинейной на-

грузкой, что наглядно иллюстрируют выявленные закономерности, представленные на рис. 6, а, б.

На рис. 8 показан обобщенный алгоритм моделирования и анализа несинусоидальных режимов, разработанный по результатам проведенных исследований и предусматривающий обоснованный выбор того или иного технического средства или решения по повышению качества электрической энергии исходя из конфигурации системы электроснабжения с учетом вероятности наличия резонансных явлений.

Таким образом, выявленные закономерности, обоснованные ограничения и допущения при анализе и моделиро-

вании сложных несинусоидальных режимов являются теоретической основой выбора и обоснования структуры и места размещения технических средств и решений по повышению качества электроэнергии и компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения обогатительных фабрик различной конфигурации [39].

Полученные результаты справедливы для исследуемых конфигураций систем электроснабжения обогатительных фабрик при отсутствии искажений напряжения со стороны питающей сети. Учет влияния искажений со стороны питающей сети на формирование несинусоидальных режимов в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой и конденсаторными установками является предметом дальнейших исследований.

Также полученные результаты могут быть распространены на системы электроснабжения угольных шахт с учетом изменения соотношения мощности понижающих трансформаторов и нелинейной нагрузки.

Заключение

1. Выполнено математическое моделирование режимов работы схем электроснабжения обогатительных фабрик различной конфигурации, напряжения и мощности, включающих изменяющиеся в течение суток линейную и нелинейную нагрузки и регулируемую конденсаторную батарею для компенсации реактивной мощности линейной нагрузки. Произведена оценка степени перегрузки конденсаторной батареи от токов высших гармоник, генерируемых вентиляным преобразователем, качество напряжения на шинах линейной нагрузки и изменение величин этих гармоник.

2. Во всех исследуемых схемах при изменении в реальном диапазоне мощностей нелинейной и линейной нагрузок и конденсаторной батареи имели место

резонансные режимы, обуславливающие недопустимую токовую перегрузку конденсаторов и недопустимое качество напряжения на линейной нагрузке.

3. Установлено, что при моделировании систем с нелинейной нагрузкой по упрощенной однофазной модели необходимо учитывать ограниченную мощность гармоник, обусловленную их внутренним сопротивлением, величина которого зависит от мощности нелинейной нагрузки и сопротивления питающего трансформатора. Это существенно повышает точность моделирования в резонансных режимах и сделает ее сопоставимой с результатами, полученными на трехфазной модели. Выявленная закономерность должна учитываться при моделировании и анализе несинусоидальных режимов систем электроснабжения обогатительных фабрик.

4. Установлено, что при выборе средств защиты конденсаторных батарей от токовой перегрузки высшими гармониками и обеспечения требуемого качества напряжения следует учитывать конфигурацию схемы и взаимное расположение источника гармоник и линейной нагрузки с конденсаторной батареей.

5. Выявлены диапазоны соотношения мощностей нелинейной нагрузки и питающего трансформатора, исходя из которых целесообразно применение того или иного технического средства или решения в системах электроснабжения различной конфигурации, включая применение конденсаторных установок, рассчитанных на повышенное напряжение, оснащение конденсаторных установок антирезонансными дросселями, применение активных фильтров.

6. Выявленные закономерности, ограничения и допущения являются теоретической основой моделирования и анализа сложных несинусоидальных режимов для обоснованного выбора тех-

нического средства или решения для повышения качества электроэнергии.

7. Показана неэффективность использования классического параллельного активного фильтра для компенсации

высших гармоник при наличии конденсаторных установок компенсации реактивной мощности и необходимость использования в этом случае гибридных фильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамович Б. Н.* Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности // Записки Горного института. — 2018. — Т. 229. — С. 31–40. DOI: 10.25515/PM1.2018.1.31.

2. *Абрамович Б. Н., Богданов И. А.* Повышение эффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий // Записки Горного института. — 2021. — Т. 249. — С. 408–416. DOI: 10.31897/PM1.2021.3.10.

3. *Антонов Б. М., Баранов Н. Н., Крюков К. В., Розанов Ю. К.* Гибридная система децентрализованного электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии разных видов // Электричество. — 2018. — № 1. — С. 8–13. DOI: 10.1080/14786451.2011.590898.

4. *Герман-Галкин С. Г.* Анализ и расчет параллельного активного фильтра // Электротехника. — 2018. — № 1. — С. 55–61. DOI: 10.3103/S1068371218010042.

5. *Герман-Галкин С. Г., Звежевич З. Ч., Поляков Н. А.* Аналитическое и модельное исследование активного полупроводникового преобразователя в системах электропривода // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2014. — № 3(91). — С. 131–139.

6. *Егоров Д. Э., Довгун В. П.* Оптимизация компенсационных характеристик гибридных силовых фильтров // Технологии электромагнитной совместимости. — 2016. — № 3(58). — С. 18–26.

7. *Ляхомский А. В., Плащанский Л. А., Решетняк С. Н., Решетняк М. Ю.* Разработка высоковольтного устройства автоматизированного мониторинга качества электрической энергии в подземных сетях угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7. — С. 207–213. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-207-213.

8. *Клюев Р. В., Босиков И. И., Гаврина О. А.* Повышение эффективности релейной защиты на горно-обогатительном комбинате // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 300–311. DOI: 10.31897/PM1.2021.2.14.

9. *Ustinov D. A., Khomiakov K. A.* Determination of dynamic characteristics for predicting electrical load curves of mining enterprises // Electricity. 2022, vol. 3, pp. 162–181. DOI: 10.3390/electricity3020010.

10. *Козярук А. Е., Камышьян А. М.* Повышение энергетической эффективности электромеханической трансмиссии карьерного автосамосвала // Записки Горного института. — 2019. — Т. 239. — С. 576–582. DOI: 10.31897/PM1.2019.5.576.

11. *Довгун В. П., Сташков И. А., Николаев И. Ф., Синяговский А. Ф.* Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства для систем тягового электроснабжения переменного тока // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2016. — № 3. — С. 55–60. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-3-55-60.

12. *Ненахов А. И., Гамазин С. И.* Совмещение функций компенсации реактивной мощности, симметрирования и активной фильтрации токов при построении алгоритма управления устройством СТАТКОМ // Электричество. — 2016. — № 8. — С. 46–52.

13. *Розанов Ю. К., Лепанов М. Г., Киселев М. Г.* Многофункциональный регулятор качества электроэнергии на основе силового электронного преобразователя // Электротехника. — 2014. — № 8. — С. 51–59.

14. Малафеев С. И., Микрюков В. И., Малафеева А. А. Высоковольтная карьерная пегонная станция: анализ электробезопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 143–153. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_143.

15. Senchilo N. D., Ustinov D. A. Method for determining the optimal capacity of energy storage systems with a long-term forecast of power consumption // Energies. 2021, vol. 14, article 7098. DOI: 10.3390/en14217098.

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

17. 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.

18. Шевырев Ю. В., Шевырева Н. Ю. Улучшение формы напряжения в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем // Горный журнал. — 2019. — № 1. — С. 66–69. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.

19. Шестаков А. К., Петров П. А., Николаев М. Ю. Автоматическая система обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе алюминиевого завода на основе технического зрения и нейронной сети // Металлург. — 2022. — № 10. — С. 105–112. DOI: 10.52351/00260827_2022_10_105.

20. Baburin S. V., Turysheva A. V., Kovalchuk M. S. Algorithm for the choice of power supply system rational structure of gas pumping stations // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1753, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009.

21. Dayi Li, Tingkang Wang, Wenhao Pan, Xinzhi Ding, Jie Gong A comprehensive review of improving power quality using active power filters // Electric Power Systems Research. 2021, vol. 199, article 107389. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107389.

22. Garipov B. I., Ustinov D. A. Simulation of combined power system with storage device / Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1201/9781003017226-34.

23. Расулев А. Х., Петросова Л. И., Расулева М. О. Обеспечение безопасной работы газотранспортной системы с использованием адаптивного управления // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 3. — С. 55–60. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-3-55-60.

24. Сычев Ю. А., Аладьин М. Е., Зимин Р. Ю. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 7. — С. 164–179.

25. Ершов М. С., Феоктистов Е. А. Влияние режима неустойчивого вращения долота на энергоэффективность электропривода ротора буровой установки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 148–161. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_148.

26. Iakovleva E. V., Belova M. V., Soares A., Rassolkin A. On the issues of spatial modeling of non-standard profiles by the example of electromagnetic emission measurement data // Sustainability. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 1–23. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/574>.

27. Kavithaa G., Balakrishnan P., Yuvaraj S. A. A prognostic energy optimization technique with unified power quality conditioner for energy stabilization in grid system // Computers & Electrical Engineering. 2021, vol. 94, article 107360. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107360.

28. Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V. Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle // Energies. 2021, vol. 14, article 6074. DOI: 10.3390/en14196074.

29. Lavrik A. Y., Zhukovskiy Y. L. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // *Energies*. 2021, no. 14, vol. 16, article 5059. DOI: 10.3390/en14165059.

30. Schneider Electric: «Cahiers Techniques» publications nos. 152, 159, 160, 183. <http://www.schneider-electric.com>.

31. Litran S. P., Salmeron P. Electromagnetic Compatibility Analysis of a Control Strategy for a Hybrid Active Filter // *Electric Power Systems Research*. 2017, vol. 144. pp. 81 – 88. DOI: 10.1016/j.epr.2016.11.014.

32. Ustinov D. A., Baburin S. V. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 7, pp. 5267 – 5270.

33. Dovgun V., Temerbaev S., Chernyshov M., Novikov V., Boyarskaya N., Gracheva E. Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks // *Energies*. 2020, vol. 13, article 4915. DOI: 10.3390/en13184915.

34. Лях Д. Д., Худякова И. Н., Иванов С. Л. Обоснование параметров модуля формирования торфяного сырья и энергомассовых характеристик комплекса оборудования по добыче и переработке торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 6. – С. 93–108. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_93.

35. Abramovich B. N., Ustinov D. A., Abdallah W. J. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2022, vol. 13, no. 2, pp. 1007 – 1025. DOI: 11591/ijpeds.v13.i2.

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

37. Жданкин Е. В., Устинов Д. А. Имитационное моделирование активной накопительной системы // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 52–58. DOI: 10.14529/power180406.

38. Zhukovskiy Y., Koteleva N. Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1050, no. 1, article 012106. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012106.

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

REFERENCES

1. Abramovich B. N. System of uninterrupted power supply of mining enterprises. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 229, pp. 31 – 40. [In Russ]. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.31.

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

3. Antonov B. M., Baranov N. N., Kryukov K. V., Rozanov Yu. K. Hybrid system of decentralized power supply based on renewable energy sources of various types. *Elektrichestvo*. 2018, no. 1, pp. 8 – 13. [In Russ]. DOI: 10.1080/14786451.2011.590898.

4. Herman-Galkin S. G. Analysis and calculation of a parallel active filter. *Elektrotehnika*. 2018, no. 1, pp. 55 – 61. [In Russ]. DOI: 10.3103/S1068371218010042.

5. Herman-Galkin S. G., Vvezhevich Z. Ch., Polyakov N. A. Analytical and model study of an active semiconductor converter in electric drive systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2014, no. 3(91), pp. 131 – 139. [In Russ].

6. Egorov D. E., Dovgun V. P. Optimization of compensation characteristics of hybrid power filters. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2016, no. 3(58), pp. 18 – 26. [In Russ].
7. Lyakhomskiy A. V., Plashchansky L. A., Reshetnyak S. N., Reshetnyak M. Yu. High-voltage unit for automated monitoring of electrical energy quality in underground networks of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 7, pp. 207 – 213. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-207-213.
8. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrina O. A. Improving the efficiency of relay protection at a mining and processing plant. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 300 – 311. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.14.
9. Ustinov D. A., Khomiakov K. A. Determination of dynamic characteristics for predicting electrical load curves of mining enterprises. *Electricity*. 2022, vol. 3, pp. 162 – 181. DOI: 10.3390/electricity3020010.
10. Kozyaruk A. E., Kamyshyan A. M. Improving the energy efficiency of the electromechanical transmission of a quarry dump truck. *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 239, pp. 576 – 582. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2019.5.576.
11. Dovgun V. P., Stashkov I. A., Nikolaev I. F., Sinyagovsky A. F. Multifunctional filter-compensating devices for AC traction power supply systems. *Russian Electromechanics*. 2016, no. 3, pp. 55 – 60. [In Russ]. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-3-55-60.
12. Nenakhov A. I., Gamazin S. I. Combining the functions of reactive power compensation, symmetry and active filtering of currents when constructing an algorithm for controlling a STATCOM device. *Elektrichestvo*. 2016, no. 8, pp. 46 – 52. [In Russ].
13. Rozanov Yu. K., Lapanov M. G., Kiselev M. G. Multifunctional electric power quality controller based on a power electronic converter. *Elektrotehnika*. 2014, no. 8, pp. 51 – 59. [In Russ].
14. Malafeev S. I., Mikryukov V. I., Malafeeva A. A. High-voltage mobile station in open pit mine: Electrosafety analysis. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 143 – 153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_143.
15. Senchilo N. D., Ustinov D. A. Method for determining the optimal capacity of energy storage systems with a long-term forecast of power consumption. *Energies*. 2021, vol. 14, article 7098. DOI: 10.3390/en14217098.
16. Zhukovskiy Yu. L., Vasilev B. Y., Korolev N. A., Malkova Y. M. Analysis of the behavior of asynchronous electric drive with a closed scalar control system when changing the inductance of the magnetizing circuit. *Indonesian Journal of Science and Technology*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 65 – 78.
17. Shevyrev Yu. V. Power quality improvement in operation of semiconductor frequency converter. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 171 – 178. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-171-178.
18. Shevyrev Yu. V., Shevyreva N. Yu. Improvement of the voltage form in the power supply systems of enterprises of the mineral resource complex with an active rectifier. *Gornyi Zhurnal*. 2019, no. 1, pp. 66 – 69. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2019.01.14.
19. Shestakov A. K., Petrov P. A., Nikolaev M. Yu. Automatic system for detecting visible emissions in the electrolysis shop of an aluminum plant based on technical vision and a neural network. *Metallurg*. 2022, no. 10, pp. 105 – 112. [In Russ]. DOI: 10.52351/00260827_2022_10_105.
20. Baburin S. V., Turyshcheva A. V., Kovalchuk M. S. Algorithm for the choice of power supply system rational structure of gas pumping stations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1753, pp. 1 – 7. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009.
21. Dayi Li, Tingkang Wang, Wenhao Pan, Xinzhi Ding, Jie Gong A comprehensive review of improving power quality using active power filters. *Electric Power Systems Research*. 2021, vol. 199, article 107389. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107389.

22. Garipov B. I., Ustinov D. A. Simulation of combined power system with storage device. *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues*. 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1201/9781003017226-34.
23. Babyr K. V., Ustinov D. A., Pelenev D. N. Improving electrical safety of the maintenance personnel in the conditions of incomplete single-phase ground faults. *Occupational Safety in Industry*. 2020, no. 3, pp. 55–60. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-3-55-60.
24. Sychev Y. A., Aladin M. E., Zimin R. Y. Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 164–179. [In Russ].
25. Ershov M. S., Feoktistov E. A. Impact of unstable drilling on energy efficiency of drill rotor drive. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 148–161. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_1_0_148.
26. Iakovleva E. V., Belova M. V., Soares A., Rassolkin A. On the issues of spatial modeling of non-standard profiles by the example of electromagnetic emission measurement data. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 1–23. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/574>.
27. Kavithaa G., Balakrishnan P., Yuvaraj S. A. A prognostic energy optimization technique with unified power quality conditioner for energy stabilization in grid system. *Computers & Electrical Engineering*. 2021, vol. 94, article 107360. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2021.107360.
28. Korolev N., Kozyaruk A., Morenov V. Efficiency increase of energy systems in oil and gas industry by evaluation of electric drive lifecycle. *Energies*. 2021, vol. 14, article 6074. DOI: 10.3390/en14196074.
29. Lavrik A. Y., Zhukovskiy Y. L. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. *Energies*. 2021, no. 14, vol. 16, article 5059. DOI: 10.3390/en14165059.
30. Schneider Electric: «Cahiers Techniques» publications nos. 152, 159, 160, 183. <http://www.schneider-electric.com>.
31. Litran S. P., Salmeron P. Electromagnetic Compatibility Analysis of a Control Strategy for a Hybrid Active Filter. *Electric Power Systems Research*. 2017, vol. 144, pp. 81–88. DOI: 10.1016/j.epr.2016.11.014.
32. Ustinov D. A., Baburin S. V. Influence by technological process onto mineral resources sector enterprise power supplies reliability parameters. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2016, vol. 11, no. 7, pp. 5267–5270.
33. Dovgun V., Temerbaev S., Chernyshov M., Novikov V., Boyarskaya N., Gracheva E. Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks. *Energies*. 2020, vol. 13, article 4915. DOI: 10.3390/en13184915.
34. Lyakh D. D., Khudyakova I. N., Ivanov S. L. Justification of peat block-making module parameters and mass/power characteristics for peat production machinery. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6, pp. 93–108. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_93.
35. Abramovich B. N., Ustinov D. A., Abdallah W. J. Modified proportional integral controller for single ended primary inductance converter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 2022, vol. 13, no. 2, pp. 1007–1025. DOI: 11591/ijpeds.v13.i2.
36. Sychev Yu. A., Zimin R. Y. Improving the quality of electricity in the power supply systems of the mineral resource complex with hybrid filter-compensating devices *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 247, pp. 132–140. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14.
37. Zhdankin E. V., Ustinov D. A. Simulation modeling of an active storage system. *Bulletin of South Ural State University. Series «Power Engineering»*. 2018, vol. 18, no. 4, pp. 52–58. [In Russ]. DOI: 10.14529/power180406.
38. Zhukovskiy Y., Koteleva N. Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1050, no. 1, article 012106. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012106.

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

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Сычев Юрий Анатольевич*¹ – д-р техн. наук,
доцент, e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,
*Костин Владимир Николаевич*¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: kostin_vn@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2124-8438,
*Сериков Владимир Александрович*¹ – аспирант,
e-mail: serikov.va@bk.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2863-000X,
*Аладыин Максим Евгеньевич*¹ – аспирант,
e-mail: m.aladyin@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0706-1266,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Аладыин М.Е., e-mail: m.aladyin@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Yu.A. Sychev*¹, Dr. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: ya_sychev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,
*V.N. Kostin*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, e-mail: kostin_vn@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2124-8438,
*V.A. Serikov*¹, Graduate Student,
e-mail: serikov.va@bk.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2863-000X,
*M.E. Aladin*¹, Graduate Student,
e-mail: m.aladyin@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-0706-1266,

¹ Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: M.E. Aladin, e-mail: m.aladyin@gmail.com.

Получена редакцией 21.09.2022; получена после рецензии 14.12.2022; принята к печати 10.12.2022.

Received by the editors 21.09.2022; received after the review 14.12.2022; accepted for printing 10.12.2022.

