

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МОЩНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ НА ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. Сериков<sup>1</sup>, Ю.А. Сычев<sup>1</sup>, М.В. Попов<sup>1</sup>, А.М. Бондареко<sup>2</sup>, Хайдар Самет<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,  
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Serikov.va@bk.ru

<sup>2</sup> АО «Невский завод», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Ширазский университет, Шираз, Иран

**Аннотация:** Обеспечение нормативных показателей качества электроэнергии является важной задачей для предприятий горной и металлургической промышленности, где энергоемкие нелинейные нагрузки работают совместно с чувствительным оборудованием. Существующие исследования часто ограничиваются измерениями только в точке присоединения мощной высоковольтной нелинейной нагрузки или в точке общего присоединения, что не позволяет в полной мере проанализировать характер распространения гармонических искажений от точки подключения мощного высоковольтного нелинейного потребителя далее во внутривоздушную систему электроснабжения предприятий горной и металлургической промышленности. Проведен анализ показателей качества электроэнергии в трех характерных точках системы внутривоздушной электроснабжения промышленного предприятия, где наиболее мощным нелинейным потребителем является электродуговая печь постоянного тока. Измерения проведены с помощью многофункционального анализатора показателей качества электроэнергии «VINOM3». В результате экспериментальных исследований были определены величины гармонических искажений тока и напряжения в точках измерения в зависимости от режима работы электродуговой печи. Показано негативное влияние токоограничивающего реактора, применяемого во внутривоздушной сети промышленного предприятия, на показатели качества электроэнергии в точке подключения мощного высоковольтного нелинейного потребителя. Проведен анализ причин возникновения высокого уровня четных гармоник тока на начальном этапе плавки по 6-пульсной и 12-пульсной схемам выпрямления электротехнического комплекса электродуговой печи постоянного тока. Выявлено непосредственное прохождение через понижающий трансформатор высших канонических гармоник от мощного высоковольтного нелинейного потребителя к чувствительным низковольтным нагрузкам. Показано, что во время всего периода плавки электродуговой печью имели место провалы фазных напряжений в точках измерения продолжительностью до 0,2 с и глубиной до 30%. Для условий промышленных систем электроснабжения предприятий горной и металлургической промышленности, содержащих одну или несколько мощных

нелинейных нагрузок и ряд чувствительных к гармоническим искажениям и провалам напряжения потребителей, предложен алгоритм, отражающий последовательность выбора характерных точек, где целесообразна установка измерительных приборов мониторинга показателей качества электроэнергии. Разработанный алгоритм позволяет в полной мере оценить характер возникновения и протекания несинусоидальных режимов в системах электроснабжения любой отрасли промышленности, в том числе горных и металлургических предприятий.

**Ключевые слова:** несинусоидальное напряжение, нелинейная нагрузка, электродуговая печь, высшие гармоники, экспериментальные исследования, измерения, показатели качества электроэнергии, система электроснабжения, промышленное предприятие.

**Для цитирования:** Сериков В. А., Сычев Ю. А., Попов М. В., Бондаренко А. М., Хайдар Самет Оценка влияния режимов работы мощного высоковольтного нелинейного потребителя на тиристорных преобразователях на показатели качества электроэнергии в системе электроснабжения промышленного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 6. – С. 159–180. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_6\_0\_159.

---

## **Influence of operating modes of heavy-duty high-voltage nonlinear power consumer using thyristor converters on power quality in mine supply system**

**V.A. Serikov<sup>1</sup>, Yu.A. Sychev<sup>1</sup>, M.V. Popov<sup>1</sup>, A.M. Bondarenko<sup>2</sup>, Haidar Samet<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Serikov.va@bk.ru

<sup>2</sup> Nevsky Zavod JSC, Saint-Petersburg, Russia

<sup>3</sup> School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

---

**Abstract:** Maintenance of standard power quality is an important task in the mining and metallurgical industry where energy-intensive nonlinear loads exist side by side with sensitive equipment. The present-day research is often limited to measurements carried out only at the connection point of an intense high-voltage nonlinear load, or at the overall connection points, which impedes a full analysis of harmonic distortion patterns from the connection point of a heavy-duty high-voltage nonlinear power consumer to the in-site supply system of a facility of the mining and metallurgical industry. The article analyzes power quality indicators at three characteristic points of an in-site power supply system of a production plant, where the heaviest-duty nonlinear power consumer is a DC arc furnace. The measurements are carried out using multifunctional power quality meter Binom3. As a result of the experimental research, the values of the harmonic distortions of current and voltage were determined at the measurement points depending on an operating mode of the arc furnace. It is shown how the current limiting coil used in the in-site power supply system adversely affects the power quality at the connection point of the heavy-duty high-voltage nonlinear power consumer. The scope of the analysis embraced the causes of high-level even harmonics at the initial stage of melting operation by the circuit diagrams of the 6-pulse and 12-pulse rectifiers in the electric facility of the DC arc furnace. It is revealed that higher characteristic harmonics pass from the heavy-duty high-voltage nonlinear power consumer, directly through a reducing transformer, to sensitive low-voltage loads. It is shown that during the whole melting operation of the arc furnace, phase voltage falls take place at the measurement points with a duration to 0.2 s and depth to 30%. For the industrial power supply system in the mining and metallurgical sector, containing one or a few heavy-duty nonlinear loads and some power consumers sensitive to harmonic distortions and voltage falls, an algorithm is proposed, that shows the sequence of selection of representative points for the advisable installation of measurement tools for monitoring power quality.

The algorithm enables the full-extent estimation of initiation and behavior of nonsinusoidal modes in power supply systems in any industry, including the mining and metallurgical sector.

**Key words:** nonsinusoidal voltage, nonlinear load, arc furnace, higher harmonics, experimental research, measurements, power quality indicators, power supply system, industrial plant.

**For citation:** Serikov V. A., Sychev Yu. A., Popov M. V., Bondarenko A. M., Haidar Samet Influence of operating modes of heavy-duty high-voltage nonlinear power consumer using thyristor converters on power quality in mine supply system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(6):160-180. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2026\_6\_0\_160.

---

## Введение

Обеспечение нормативных показателей качества электроэнергии (ПКЭ) является достаточно важной задачей для современных предприятий горной и металлургической промышленности, где энергоемкие нелинейные нагрузки работают совместно с чувствительным к гармоническим искажениям и провалам напряжения оборудованием [1–3]. По данным исследований отечественных и зарубежных ученых, доля нелинейных потребителей в системе электроснабжения промышленных предприятий увеличилась до 40% от общей суммарной мощности потребителей сети [4–6]. Нелинейная нагрузка является источником высших гармоник, которые, протекая по элементам системы электроснабжения, вызывают искажение формы питающего напряжения, увеличивают потери активной мощности в проводниках, снижают срок службы чувствительного к изменению величины и формы кривой напряжения электрооборудования [7–9].

Основной и наиболее мощной высоковольтной нелинейной нагрузкой, которая применяется в горной промышленности, являются потребители, работающие на основе диодных или тиристорных преобразователей. На примере металлургических производств или цехов металлургии горнопромышленных предприятий, таким потребителем является электродуговая печь постоянного тока (ЭДППТ) — характерный источник гармонических искажений тока. В то

время как работа электродуговой печи (ЭДП) переменного тока характеризуется стохастической несимметрией напряжения и фликером [10–12], работа электродуговых печей постоянного тока на базе тиристорных мостовых выпрямителей сопровождается меньшим расходом электродов и более стабильным горением дуги. Тем не менее, как показывают исследования [13–15], высокая динамика процессов, происходящих в дуге быстро изменяющегося во времени сопротивления, требует сложного моделирования для корректной оценки фликера, а выявление гармонических и интергармонических составляющих в токах печи в реальном времени представляет собой нетривиальную задачу, требующую современных вычислительных методов [16–18]. Однако наличие мощных высоковольтных нелинейных потребителей, работающих на основе тиристорных выпрямителей, в том числе электродуговых печей постоянного тока, влечет за собой генерацию спектра канонических гармоник тока [19–21]. Актуальные отечественные стандарты, включая ГОСТ 32144-2013 и ГОСТ Р72176-2025, налагают определенные ограничения на уровень высших гармоник тока и напряжения в электрических сетях [22–24].

Во многих научных трудах широко представлены исследования режимов работы мощных высоковольтных потребителей на примере металлургических производств (мощностью более 50 МВт),

подключенных к сетям высокого напряжения (110–220 кВ), однако недостаточно внимания уделено исследованию режимов работы мощных высоковольтных потребителей на примере электродуговых печей средней мощности, подключенных к распределительным сетям среднего напряжения (6–35 кВ) [25–27].

Как показано в [28–30], в таких сетях ограниченной мощности питающего трансформатора главной понизительной подстанции (ГПП) уровень гармонического искажения напряжения проявляется значительно сильнее, чем в сетях высокого напряжения, вследствие более высокого импеданса сети на стороне среднего напряжения [31–33]. В исследованиях [34–36] также подчеркивается необходимость анализа влияния ЭДППТ не только на уровне среднего напряжения, но и на стороне низкого напряжения (0,4 кВ), где расположено наиболее чувствительное оборудование, электрически связанное с точкой подключения ЭДППТ [37–39].

### **Научная проблема и цель исследования**

Существующие исследования часто ограничиваются измерениями только в точке присоединения мощной высоковольтной нелинейной нагрузки или в точке общего присоединения, что не позволяет в полной мере проанализировать характер распространения гармонических искажений от точки подключения мощного высоковольтного нелинейного потребителя далее во внутриплощадочную систему электроснабжения предприятий горной и металлургической промышленности. Лишь немногие работы анализируют характер распространения гармонических искажений от точки питания мощного высоковольтного нелинейного потребителя во внутриплощадочную систему электроснабжения.

В частности, в [3, 4, 12] показано сложное взаимодействие гармоник с компенсирующими устройствами внутри промышленных сетей горной отрасли, а в [1, 2] экспериментально подтверждено, что понижающие трансформаторы не способны изолировать чувствительное к искажениям и провалам напряжения низковольтное оборудование от высших гармоник тока и напряжения со стороны высокого напряжения.

Провалы, колебания и гармонические искажения напряжения могут приводить к серьезным сбоям в работе автоматизированных систем управления технологическими процессами. В частности, провалы, колебания и гармонические искажения напряжения, создаваемые ЭДППТ, приводят к отказам систем управления технологическим процессом плавки металла [1, 2].

В современных мощных высоковольтных установках ЭДП постоянного тока преобразование энергии, как правило, реализуется на базе тиристорных 6-пульсных или 12-пульсных выпрямителей, питаемых через специализированные многообмоточные печные трансформаторы [5]. Топология 12-пульсного выпрямителя, обеспечиваемая фазовым сдвигом вторичных обмоток на 30°, позволяет эффективно подавлять характерные высшие гармоники тока — 5, 7, 17, 19-го и т.д. порядков [31–33], что теоретически должно приводить к значительному снижению суммарного коэффициента гармонических искажений тока и напряжения по сравнению с 6-пульсной схемой [12–14].

Тем не менее, многочисленные экспериментальные исследования и моделирования показывают, что реальные промышленные условия могут существенно отличаться от принимаемых теоретических допущений [5].

Такие факторы, как несимметрия питающего напряжения, регулирование

углов коммутации тиристоров, асимметрия системы управления силовыми ключами, стохастический характер дуги и заданный импеданс сети, приводят к возникновению нехарактерных гармоник, включая низкочастотные (субгармоники частотой до 50 Гц), четные гармоники, а также интергармонические составляющие [5, 11, 12].

Также остается недостаточно исследованным вопрос о том, как токоограничивающие реакторы, обычно устанавливаемые для ограничения токов короткого замыкания, влияют на уровень искажения напряжения в точке общего присоединения или в точке подключения мощных высоковольтных установок ЭДППТ. Подобные реакторы увеличивают импеданс системы, как на основной частоте, так и на частотах высших гармоник, что усиливает искажения напряжения в точке подключения мощного нелинейного потребителя [13, 29, 34].

Для более детального анализа степени влияния токоограничивающего реактора, а также пульсности выпрямителей ЭДППТ, на различных этапах плавки, на характер вариации показателей качества электроэнергии в промышленной системе электроснабжения, авторами проводились комплексные измерения в характерных точках электрической сети. В частности, проводился анализ ПКЭ в трех точках внутриплощадочной системы электроснабжения промышленного предприятия, в которой основной мощной нелинейной нагрузкой является ЭДППТ мощностью 2,2 МВт, работающая как по 6-пульсной, так и по 12-пульсной схемам выпрямления.

Экспериментальные исследования были направлены на решение следующих задач:

- установка корреляции гармонического спектра, генерируемого ЭДППТ, с топологией ее схемы выпрямления: 6-пульсной (этап расплавления) и 12-

пульсной (этап плавки и рафинирования);

- подтверждение негативного влияния токоограничивающего реактора, применяемого во внутриплощадочной сети промышленного предприятия, на показатели качества электроэнергии в точке подключения мощного высоковольтного нелинейного потребителя;

- подтверждение непосредственного прохождения через понижающий трансформатор 6 кВ / 0,4 кВ со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_n$  высших канонических гармоник от мощного высоковольтного нелинейного потребителя к чувствительным к гармоническим искажениям и провалам напряжения низковольтным нагрузкам;

- проведение анализа причин возникновения существенно высокого уровня четных гармоник на начальной стадии плавки;

- оценка уровня электромагнитной совместимости чувствительных низковольтных потребителей при наличии высоковольтного мощного источника высших гармоник, работающего на базе тиристорных преобразователей;

- разработка алгоритма экспериментального исследования на основе полученных результатов измерений для анализа методов и средств оценки показателей качества электроэнергии для систем электроснабжения горной промышленности и металлургии, имеющих в своем составе мощные высоковольтные нелинейные потребители, работающие на основе тиристорных преобразователей.

### **Характеристика и схема системы электроснабжения промышленного предприятия**

Исследования проводились во внутриплощадочной системе электроснабжения промышленного предприятия, имеющей цех металлургии с мощным высоковольтным нелинейным потреби-

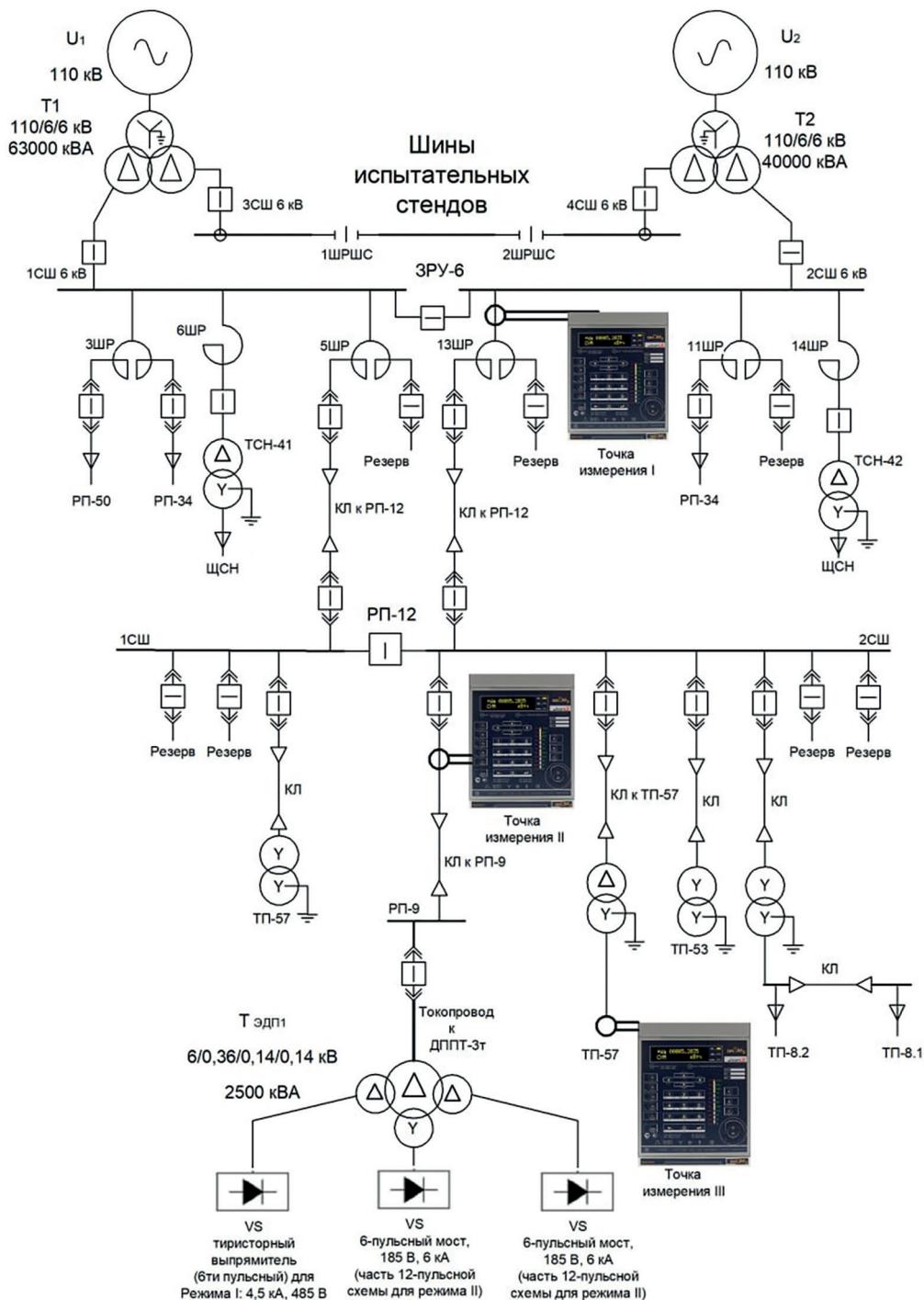


Рис. 1. Фрагмент принципиальной схемы системы электроснабжения промышленного предприятия с точками подключения приборов «BINOM3»

Fig. 1. Fragment of the schematic diagram of an industrial enterprise with connection points for BINOM3 devices

телем на тиристорных выпрямителях — ЭДППТ для выплавки стали и чугуна для производства собственной промышленной продукции.

На рис. 1 приведен фрагмент принципиальной схемы системы электропитания предприятия на стороне среднего напряжения, с указанием точек подключения многофункциональных анализаторов качества электроэнергии «VINOM3», описание которых будет представлено далее.

Электропитание осуществляется от двух независимых внешних источников напряжением 110 кВ.

В нормальном режиме работы системы питание всего производственного комплекса обеспечивается только через один силовой трансформатор ГПП типа ТРДН-63000/110кВ/6кВ номинальной мощностью 63 МВА. Трансформатор оснащен расщепленной вторичной обмоткой, питающей две независимые системы шин 6 кВ. Вторая секция шин (ЗРУ-6 кВ) является основной распределительной магистралью для технологических потребителей.

Распределительная сеть 6 кВ выполнена по магистрально-радиальной топологии с известными параметрами.

Питание исследуемого узла нагрузки 6 кВ (распределительного пункта РП-12) осуществляется от II секции шин ЗРУ-6 кВ через токоограничивающий сдвоенный бетонный реактор типа РБАСМ-10-2×1000-8%. В нормальном режиме задействована только одна ветвь реактора. Значение сопротивления реактора оказывает влияние на амплитудно-частотную характеристику сети и на уровень гармонических искажений напряжения в точке подключения мощного нелинейного потребителя, что будет показано далее.

Ко II секции шин РП-12 подключена электродуговая печь постоянного тока «ДППТУ-3,0» номинальной мощностью

2,2 МВт, являющаяся основным мощным высоковольтным источником нелинейных искажений, как в рассматриваемом узле, так и на предприятии в целом. Следует отметить, что средняя потребляемая мощность предприятия в часы максимума нагрузки не превышает 8 МВт.

Электропитание электродуговой печи осуществляется через многообмоточный печной трансформатор ТМП-2500/6 номинальной мощностью 2500 кВА. Трансформатор имеет сложную конфигурацию обмоток: первичную обмотку 6 кВ, одну вторичную обмотку 0,37 кВ и две части расщепленной вторичной обмотки 0,144 кВ.

Технологический цикл плавки ЭДППТ разделен на два режима, характеризующихся различной топологией тиристорных выпрямителей и, как следствие, различным спектральным составом потребляемого тока.

Режим I (период нагрева и расплава) длительностью около 30–40 мин. Питание осуществляется через вторичную обмотку трансформатора напряжением 0,37 кВ, соединенную по схеме «треугольник». Выпрямление тока выполняет 6-пульсный тиристорный мост. Выходные номинальные параметры звена постоянного тока:  $U_d = 485$  В,  $I_d = 4,5$  кА. Данная топология генерирует канонический спектр гармоник порядка  $n = 6k \pm 1$ , обладающих максимальной амплитудой.

Режим II (окисление и рафинирование) длительностью от 1,5 до 4,5 ч в зависимости от технологических факторов и химических свойств металла шихты. Питание осуществляется через две части расщепленной вторичной обмотки напряжением 0,144 кВ, работающих отдельно, одна из которых соединена в «звезду», а другая в «треугольник», что обеспечивает фазовый сдвиг 30 эл. градусов между ними. К этим об-

моткам подключены два параллельных тиристорных моста, которые образуют 12-пульсную схему выпрямления. Выходные номинальные параметры звена постоянного тока:  $U_d = 185 \text{ В}$ ,  $I_d = 12,0 \text{ кА}$ . Теоретически данная топология обеспечивает компенсацию гармоник тока порядка 5, 7, 17, 19 и т.д. во входной цепи печного трансформатора, смещая спектр гармоник в область  $n = 12k \pm 1$ .

Для снижения пульсаций выпрямленного тока в звене постоянного тока установлен сглаживающий реактор типа СРОВ-6300 с индуктивностью  $L_d = 0,22 \text{ мГн}$ .

К той же II секции шин РП-12 подключены трансформаторные понижающие подстанции ТП-57 и ТП-8.2, обеспечивающие через трансформаторы 6 кВ/0,4 кВ мощностью 1600 кВА питание низковольтной цеховой нагрузки, включая чувствительное оборудование: станки с ЧПУ, частотно-регулируемые приводы кранов, системы автоматики.

Ранее фиксировались сбои в работе вспомогательного оборудования электродуговой печи (системы АСУ ТП, насосные станции охлаждения), запитанного от подстанции ТП-53, что потребовало перевода ТП-53 на изолированную I секцию шин РП-12. Данный факт косвенно подтверждает существенный уровень электромагнитных помех в узле РП-12 и недостаточную эффективность существующих технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости.

### **Методика проведения экспериментальных измерений**

Регистрация параметров режимов работы электродуговой установки и оценка показателей качества электроэнергии (ПКЭ) производилась с использованием сертифицированного многофункционального измерительного анализатора показателей качества электроэнергии

«BINOM3» производства ЗАО «ТИМ-Р», (г. Санкт-Петербург, Россия). Приборы устанавливались стационарно на ячейках вводных выключателей. Анализатор имеет возможность снятия показаний в режиме реального времени через Web-интерфейс с помощью подключения к нему ноутбука по Ethernet-кабелю, как показано на рис. 2.

Первый прибор установлен на вводном фидере от II секции ЗРУ 6 кВ до II секции РП-12, что позволяет контролировать как эмиссию гармоник тока и напряжения со стороны нелинейного потребителя в распределительную сеть всего предприятия, так и наличие гармонических искажений в сети предприятия во время простоя ЭДППТ (см. рис. 1, точка измерения I).

Второй прибор установлен стационарно в ячейке ввода на распределительном пункте РП-12 (см. рис. 1, точка измерения II), что обеспечивает прямой контроль параметров непосредственно в узле подключения мощной нелинейной нагрузки.

Третий прибор установлен на вводном выключателе 0,4 кВ понижающей подстанции ТП-57 (см. рис. 1, точка измерения III) для контроля влияния гармонических искажений со стороны высоковольтного нелинейного потребителя на чувствительное низковольтное оборудование, которое отделено от точки подключения высоковольтной нелинейной нагрузки понижающий трансформатором.

Выбор данного типа прибора обусловлен его многофункциональностью, удобным интерфейсом, гибкостью подключения на любой класс напряжения, а также надлежащими метрологическими характеристиками, среди которых следует выделить следующие [3, 4, 14]:

- класс точности А по ГОСТ IEC 61000-4-30-2017, что обеспечивает высокую точность полученных данных и



Рис. 2. Внешний вид многофункционального анализатора ПКЭ «BINOM3» и его Web-интерфейса  
 Fig. 2. Appearance of the «BINOM3» multifunctional electricity quality indicators analyzer and its Web interface

их сопоставимость с результатами других исследований [1, 2, 5];

- высокая частота дискретизации в 32 кГц. Согласно критерию Найквиста и рекомендациям IEEE 1159, такая частота необходима для корректной фиксации искажений синусоиды тока и напряжения, вызванных работой тиристорных преобразователей, включая гармоники высоких порядков (до 50-й) и интергармоники, характерные для дуговых процессов.

- реализован полный алгоритм расчета кратковременной ( $P_{st}$ ) и длительной ( $P_{lt}$ ) дозы фликера по ГОСТ IEC 61000-4-15-2012.

Измерения проводились как на стороне 6 кВ, так и на стороне 0,4 кВ в непрерывном режиме. Для анализа динамики переходных процессов на всем протяжении плавки использовался интервал усреднения 200 мс. Для оценки соответствия показателей качества нормам ГОСТ 32144-2013 данные анализировались на интервалах усреднения в 10 мин, для длительной дозы фликера — 2 ч.

В ходе эксперимента фиксировались следующие параметры:

- действующие значения фазных и междуфазных напряжений и токов;

- активная ( $P$ ), реактивная ( $Q$ ) и полная ( $S$ ) мощность по фазам и суммарно;
- спектральный состав тока и напряжения до 50-й гармоники ( $THDU_{(n)}$ ,  $THDI_{(n)}$  в %) с использованием алгоритма БПФ и группировки гармоник согласно ГОСТ 30804.4.7 (IEC 61000-4-7) [32];
- суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения и тока ( $THD_U$ ,  $THD_I$  в %);
- кратковременные провалы напряжения;
- кратковременная и длительная доза фликера ( $P_{st}$  и  $P_{lt}$ ).

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Анализ профилей нагрузки за рабочую неделю с 1 по 5 сентября 2025 г. позволил зафиксировать резкое ухудшение показателей качества электроэнергии в точке измерения II (РП-12) в периоды активной плавки. Все результаты экспериментальных исследований приведены за 5 сентября 2025 г., когда была наиболее продолжительная плавка.

На рис. 3 представлен график изменения активной ( $P$ ) и реактивной ( $Q$ ) мощности ЭДППТ в течение одного полного цикла плавки.

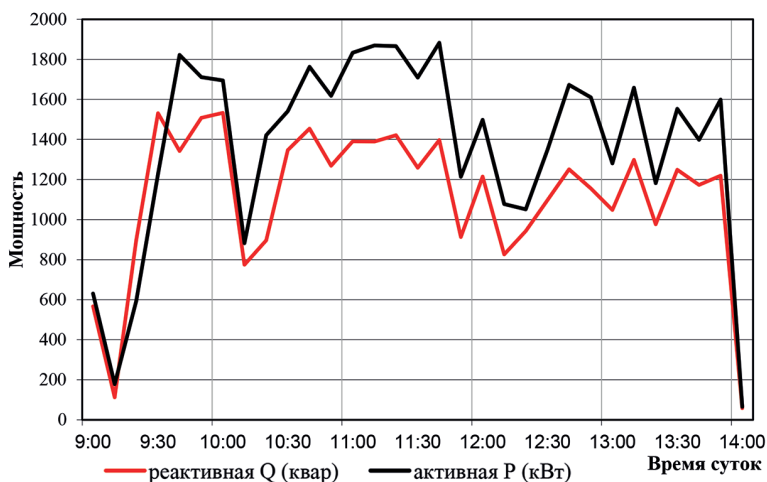


Рис. 3. Графики изменения потребления активной  $P(t)$ , кВт, и реактивной  $Q(t)$ , кВар, мощности ЭДППТ за время цикла плавки

Fig. 3. Graphs of changes in consumption of active  $P(t)$ , kW and reactive  $Q(t)$ , kvar of electric arc furnace power during the melting cycle

Анализ графика позволяет непосредственно выделить два характерных технологических режима, соответствующих различным схемам питания ЭДППТ:

- Режим I (09:00 – 09:50) — начальная стадия расплава, которая характеризуется высокой динамикой изменения мощности, обусловленной подготовкой и завалкой шихты в ванну, нестабильностью горения дуги на холодной шихте и частыми короткими замыканиями между электродами на холодную футеровку. Активная мощность колеблется в диапазоне 0,6 – 1,8 МВт. Коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) в этом режиме минимален (0,35 – 0,60), что свидетельствует о значительном потреблении реактивной мощности тиристорным преобразователем при глубоком регулировании угла отпираания  $\alpha$ ;

- Режим II (10:00 – 13:50) — основной этап плавки (окисление и рафинирование), график нагрузки становится более стабильным, средняя активная мощность возрастает до 1,6 – 1,9 МВт. Наблюдаются кратковременные снижения мощности (в 10:10 и в 12:10), свя-

занные с технологическими операциями (подвалка шихты, скачивание шлака).

Необходимо отметить, что на всем протяжении плавки потребление реактивной мощности сопоставимо с активной ( $Q \approx P$ ), а в моменты пуска даже превышает ее (в 09:30  $P = 1,22$  МВт,  $Q = 1,53$  Мвар). Это создает значительную нагрузку на питающую сеть и увеличивает уровень отклонения напряжения в ней.

Спектральный состав тока, потребляемого установкой, претерпевает значительные изменения при переключении режимов работы выпрямителя. В «Режиме I» (6-пульсная схема), как показано в табл. 1 (моменты времени 09:20 и 09:30), в спектре преобладают канонические гармоники тока:  $\text{THDI}_5 = 21,4\%$  и  $\text{THDI}_7 = 12,6\%$ , что полностью соответствует теории работы 6-пульсного выпрямителя. Однако за время всего режима работы зафиксировано существенное увеличение четных гармоник тока, в частности, их максимальные значения имели место в «Режиме I»:  $\text{THDI}_2 = 16,4\%$ ,  $\text{THDI}_4 = 12,9\%$  (в момент вре-

мени 09:20). Также зафиксирован рост третьей гармоники тока, которая в некоторые моменты была сопоставима или превышала по величине канонические гармоники, как показано в табл. 1.

Наличие значительного уровня четных гармоник и третьей гармоники тока, нехарактерных для идеального выпрямителя, объясняется сочетанием двух факторов: стохастической асимметрией вольт-амперной характеристики дуги в период расплава и динамической несимметрией углов управления тиристоров в плечах выпрямителя при работе на индуктивную нагрузку с недостаточной индуктивностью сглаживающего реактора ( $L_d = 0,22$  мГн) [5]. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока  $\text{THD}_I\%$  в этот период достигает 32,5%.

В Режиме II (12-пульсная схема) (см. табл. 1, момент 10:40) наблюдается ожидаемое снижение амплитуд 5-й и 7-й гармоник тока до 3–5%, что подтверждает эффективность параллельной ра-

боты двух выпрямительных мостов со сдвигом фаз  $30^\circ$ . Основной вклад в спектр гармоник тока вносят  $\text{THDI}_{11} \approx 5\%$  и  $\text{THDI}_{13} \approx 4\%$  гармоники, что снижает  $\text{THD}_I$  до 10–12%.

Несмотря на эффективное подавление гармоник тока в Режиме II, анализ качества напряжения в точке общего присоединения (РП-12) выявляет следующую закономерность: при переходе в 12-пульсный режим (с 9:40) ток 5-й и 7-й гармоник снижается в 2–4 раза (с 21% до 4–11%). Однако суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения не демонстрирует пропорционального снижения и остается на уровне 4,6–5,4%, что близко к предельно допустимым нормативным значениям, как показано на рис. 2 (время с 10.00 до 13.50).

Подобное поведение режимов работы сети объясняется влиянием токоограничивающего реактора РБАСМ-10-2×1000-8, установленного в цепи питания РП-12 от вводного выключателя ЗРУ 6 кВ.

Таблица 1

**Уровни высших гармоник 6-пульсного выпрямления (до 9.50 включительно) и 12-пульсного выпрямления (с 10.00 включительно) ЭДППТ**  
**Higher harmonic levels of 6-pulse rectification (up to 9.50 on) and 12-pulse rectification (from 10.00 on) electric arc furnace**

Гармоники тока, $n$	$\text{THDI}_2\%$	$\text{THDI}_3\%$	$\text{THDI}_4\%$	$\text{THDI}_5\%$	$\text{THDI}_7\%$	$\text{THDI}_{11}\%$	$\text{THDI}_{13}\%$	$\text{THD}_I\%$
9:00	11,4	8,3	8,8	16,1	9,4	4,6	3,3	22,4
9:10	0,5	0,3	0,4	6,2	3,6	2,1	1,6	7,9
9:20	<b>16,4</b>	<b>1,6</b>	<b>12,9</b>	<b>20,2</b>	<b>13,1</b>	<b>6,8</b>	<b>4,9</b>	<b>32,5</b>
9:30	<b>9,4</b>	<b>5,3</b>	<b>7,2</b>	<b>21,4</b>	<b>12,6</b>	<b>7,7</b>	<b>5,8</b>	<b>30,2</b>
9:40	4,3	4,4	2,9	3,3	1,3	4,8	3,6	10,4
9:50	5,6	5,5	3,5	3,8	1,4	5,3	3,9	12,3
10:00	5,6	5,6	3,6	3,9	1,3	5,5	3,9	12,5
10:10	3,8	3,9	2,5	3,0	1,1	4,2	3,0	9,0
10:20	<b>10,6</b>	<b>5,8</b>	<b>7,8</b>	<b>11,2</b>	<b>7,1</b>	<b>4,6</b>	<b>3,3</b>	<b>20,2</b>
10:30	<b>9,7</b>	<b>7,6</b>	<b>7,0</b>	<b>9,1</b>	<b>4,7</b>	<b>5,3</b>	<b>3,9</b>	<b>17,6</b>
10:40	4,9	5,1	3,3	3,8	1,3	5,6	4,1	11,9

Сопротивление реактора на промышленной частоте  $X_{L(f=50\text{Гц})} = 0,46 \text{ Ом}$ , что превышает суммарное сопротивление системы, вводного кабеля и питающего трансформатора ГПП 63 МВА практически в 4 раза (приведенное к стороне 6 кВ). Это приводит к значительному гармоническому падению напряжения на реакторе даже при относительно небольших значениях гармоник тока, генерируемых ЭДППТ. Фактически реактор электрически изолирует точку подключения нелинейной нагрузки от источника питания предприятия (от шины ЗРУ 6 кВ), преимущественно замыкая высшие гармоники тока в точке РП-12 и тем самым увеличивая высшие гармоники напряжения на шинах РП-12 по принципу делителя напряжения. В частности, в результате исследования было установлено, что величины характерных гармоник напряжения до 25-го порядка включительно превышали нормативные значения, как видно из рис. 3, при относительно низком вкладе 17, 19, 23 и 25-й гармоник тока в  $\text{THD}_I\%$ .

Таким образом, подтверждается гипотеза о том, что применение 12-пульсной схемы само по себе не гарантирует нормализацию качества напряжения, если топология сети (наличие токоограничивающих реакторов) способствует усилению гармоник, генерируемых нелинейным потребителем.

При работе ЭДППТ в Режиме I (6-пульсная схема тиристорного выпрямителя) в момент максимума нагрузки (в 09:30) суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения ( $\text{THD}_U\%$ ) достигает максимального значения – 15,1% (при усреднении значений в 1 мин анализатор регистрировал значение  $\text{THD}_U = 17,6\%$ ), как показано на рис. 4.

Для сравнения, во время простоя печи (4 сентября 2025 г.) уровень  $\text{THD}_U < 2,2\%$  в период максимума графика суточной нагрузки, что подтверждает решающий вклад ЭДППТ в уровень гармонических искажений тока и напряжения в сети предприятия и свидетельствует об относительно низком уровне гармониче-

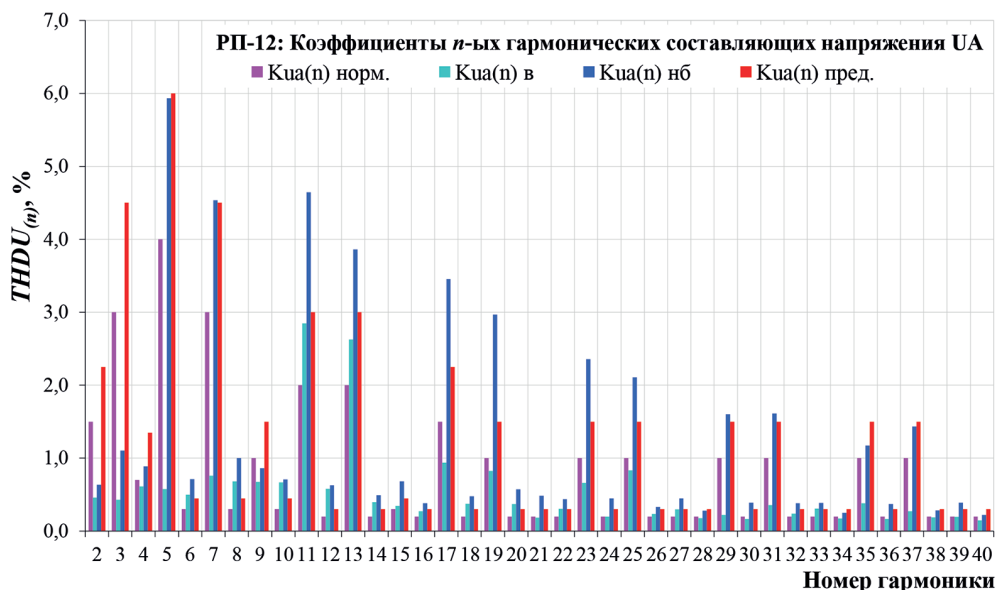


Рис. 4. Коэффициенты  $n$  гармонических составляющих напряжения в точке измерения на РП-12

Fig. 4. Coefficients of  $n$  harmonic components of voltage at the measurement point on DP-12

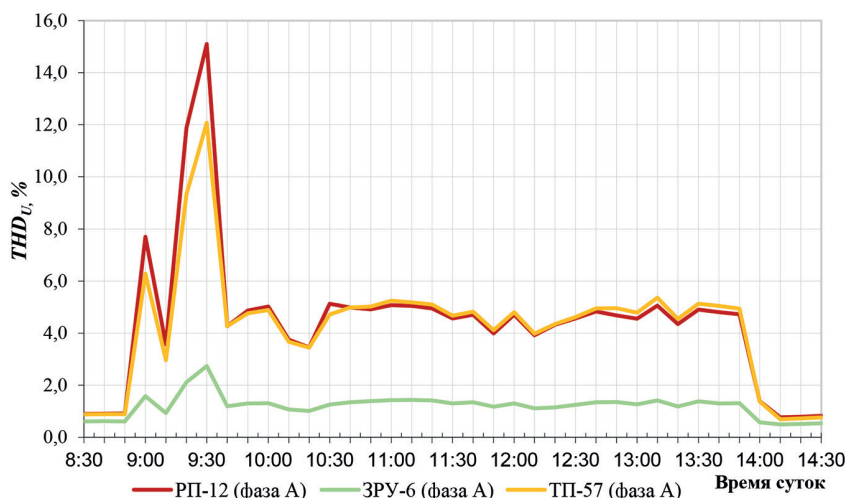


Рис. 5. Графики изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения в трех точках измерения

Fig. 5. Graphs of changes in the total coefficients of harmonic voltage components at three measurement points

ских искажений от других потребителей РП-12 и ЗРУ 6 кВ.

На рис. 5 представлены графики изменения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения ( $THD_u, \%$ ) в зависимости от режима работы ЭДППТ в трех точках измерения.

График суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения на ТП-57 показывает, что гармонические искажения на стороне 0,4 кВ являются достаточно высокими и практически сопоставимыми с величинами  $THD_u, \%$  на шинах РП-12. Так,  $THD_u, \%$  на ТП-57 достигал 10,6–12,1% при работе ЭДППТ через 6-пульсный выпрямитель и 3,5–5,4% при работе ЭДППТ через 12-пульсный выпрямитель. Это подтверждает теоретический вывод о непосредственном прохождении через понижающий трансформатор 6 кВ/0,4 кВ по схеме  $\Delta/Y_n$  канонических высших гармоник от мощного высоковольтного нелинейного потребителя к чувствительным низковольтным нагрузкам.

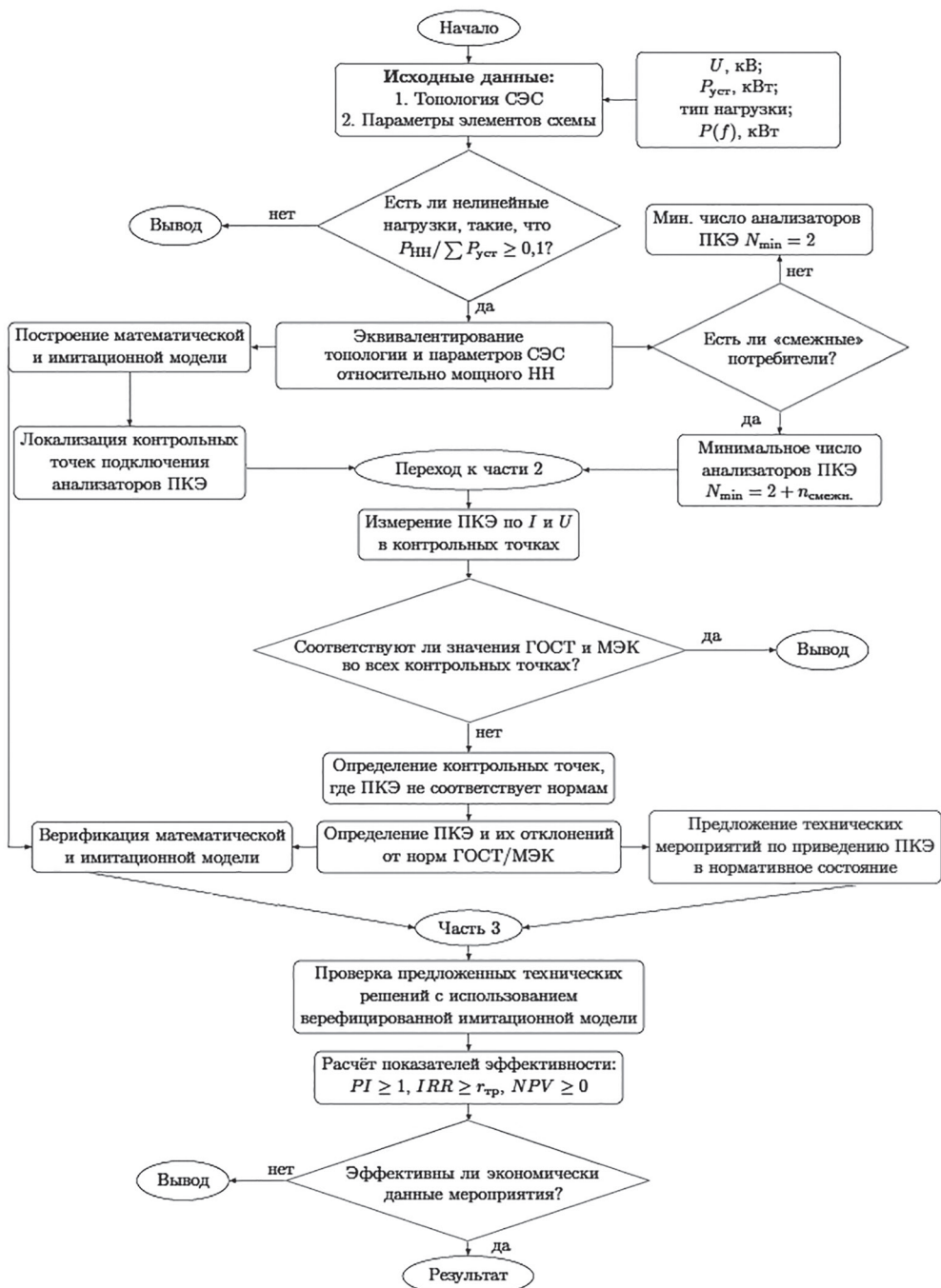
На ЗРУ-6 кВ все суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения находились в нормируемых

пределах, что объясняется фильтрующим эффектом сдвоенного токоограничивающего реактора РБАСМ-10-2×1000-8%, который обеспечивает ослабление гармонических искажений напряжения между ЗРУ 6 кВ и РП-12.

Во всем периоде плавки имели место колебания фазных напряжений в момент пуска печи, в момент переходных процессов при зажигании и стабилизации горения электрической дуги, при регулировке положения сводового электрода печи в течение времени работы ЭДППТ.

5 сентября 2025 г. в период работы ЭДППТ в трех точках измерения было зарегистрировано суммарно 76 провалов напряжения длительностью менее 0,2 с преимущественно с глубиной до 15–30%, как видно по табл. 2. При этом 4 сентября 2025 г., в момент простоя ЭДППТ, не было зафиксировано ни одного провала напряжения (табл. 2).

Длительность и частота провалов напряжения непосредственно указывает на их происхождение вследствие переходных процессов ЭДППТ, связанных с изменением параметров электрической



$P_{нн}$  – мощность нелинейной нагрузки,  $P_{уст}$  – суммарная мощность всех потребителей предприятия,  
 $PI, IRR, NPV$  – показатели эффективности проверки технических решений по обеспечению  
 показателей качества электроэнергии

Рис. 6. Алгоритм методики экспериментального исследования

Fig. 6. Algorithm of the experimental research methodology

Таблица 2

**Количество кратковременных провалов напряжения  
в точках измерения на РП-12 и ТП-57**

**Number of short-term voltage drops at the measurement points on DP-12 and TS-57**

Дата	Режим ЭДППТ	РП-12 (90>U≥85%)	РП-12 (85>U≥70%)	ТП-57 (90>U≥85%)	ТП-57 (85>U≥70%)
04.09	выкл.	0	0	0	0
05.09	вкл.	45	9	21	1

дуги и бросков тока намагничивания печных трансформаторов.

Сравнение режимов работы РП-12 и ТП-57 за 5 сентября 2025 г. показывает, что провалы напряжения распространяются на уровень 0,4 кВ через понижающий трансформатор, хотя и с некоторым ослаблением по количеству (54 провала на РП-12 против 22 провалов на ТП-57) и по глубине (45 провалов глубиной 10–15% и 9 провалов глубиной 15–30% на РП-12 против 21 провала глубиной 10–15% и 1 провала глубиной 15–30% на ТП-57).

Известно, что частые кратковременные провалы напряжения приводят к завышению нормируемых показателей кратковременной и длительной дозы фликера. По результатам исследования были зафиксированы существенные превышения кратковременных ( $P_{st}$ ) и длительных ( $P_{lt}$ ) доз фликера в период работы ЭДП на РП-12:  $P_{st} = 6,5$  и  $P_{lt} = 3,8$ . В то же время 4 сентября 2025 г., в период простоя ЭДППТ, кратковременные и длительные дозы фликера на РП-12 были в норме:  $P_{st} = 1,2$  и  $P_{lt} = 0,3$ .

По результатам проведенных измерений предложен алгоритм методики экспериментальных исследований, приведенный на рис. 6.

Предложенный алгоритм (см. рис. 6) применим для условий промышленных систем электроснабжения предприятий горной и металлургической промышленности, содержащих одну или несколько мощных нелинейных нагрузок, работающих на основе тиристорных мостовых

выпрямителей, и ряд чувствительных к гармоническим искажениям и провалам напряжения потребителей. Этот алгоритм отражает последовательность выбора характерных точек, где целесообразна установка измерительных приборов мониторинга показателей качества электроэнергии.

Разработанный алгоритм позволяет в полной мере оценить характер возникновения и протекания несинусоидальных режимов в промышленных системах электроснабжения, а также произвести обоснованный выбор технического средства или решения для повышения качества электроэнергии. Также предложенный алгоритм отражает методику экспериментального исследования для анализа методов и средств оценки показателей качества электроэнергии и применим для систем электроснабжения любой отрасли промышленности, в том числе горной и металлургической.

### Заключение

Авторами проведены экспериментальные исследования в системе электроснабжения промышленного предприятия, имеющей в своем составе мощный высоковольтный нелинейный потребитель на тиристорных выпрямителях — электродуговую печь постоянного тока.

Согласно проведенным исследованиям сделаны следующие основные выводы.

1. Выявлен гармонический спектр тока и напряжения, создаваемый ЭДППТ, в зависимости от топологии схемы вы-

прямителя: 6-пульсная (этап расплавления) и 12-пульсная (этап плавки и рафинирования).

2. Показано негативное влияние токоограничивающего реактора, применяемого во внутривольтовой системе электроснабжения, на показатели качества электроэнергии в точке подключения мощного высоковольтного нелинейного потребителя, а именно: реактор увеличивает суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и амплитуд гармоник напряжения на шинах РП-12 и ТП-57.

3. Проведен анализ причин возникновения высокого уровня четных и третьей гармоник тока на начальном этапе плавки по 6-пульсной и 12-пульсной схемам выпрямления, что объясняется стохастической асимметрией вольт-амперной характеристики дуги в период расплава и динамической несимметрией углов управления тиристоров в плечах выпрямителя при работе ЭДППТ.

4. Дана оценка уровня электромагнитной совместимости чувствительных низковольтных потребителей, подключенных к понизительной подстанции ТП-57, питающейся от РП-12, к которому подключена электродуговая печь.

5. Выявлено непосредственное прохождение через понижающие трансформаторы 6 кВ / 0,4 кВ со схемой соединения обмоток  $\Delta/Y_n$  высших канонических гармоник от мощного высоковольтного нелинейного потребителя к чувствительным к гармоническим искажениям и провалам напряжения низковольтным нагрузкам.

6. Показано, что на всем периоде плавки ЭДП имели место провалы фазных напряжений на шинах РП-12 и шинах ТП-57 продолжительностью до 0,2 с с глубиной до 30%, что является причиной превышения нормируемых показателей кратковременных и длительных доз фликера на шинах РП-12.

Направления дальнейших исследований:

- анализ кратковременных и длительных доз фликера во всех контролируемых точках подключения измерительных приборов, а также оценка возможных резонансных режимов, из-за которых могут усиливаться гармоники тока, генерируемых ЭДППТ, увеличивая суммарное гармоническое искажение напряжения в контролируемых точках измерения;

- расширение алгоритма методики экспериментального исследования с целью учета потребности предприятия в измерениях показателей качества электроэнергии с первичным выявлением возможных проблем во внутривольтовой сети предприятия (формирование чек-листа), оценки минимального времени измерений, необходимой для получения полных и достоверных данных, а также для анализа эффективности предложенных организационных и технических мероприятий по обеспечению ПКЭ (проведение измерений уже после внедрения предложенных мероприятий).

Авторский коллектив выражает благодарность:

Генеральному директору компании ЗАО «Системы связи и телемеханики» Богданову Леониду Ивановичу и его сотрудникам за безвозмездное предоставление многофункциональных счетчиков-измерителей показателей качества электроэнергии (ПКЭ) «BINOM 3» для проведения экспериментальных измерений [URL: <https://portal-energy.ru/binom3>];

Костину Владимиру Николаевичу, к.т.н., доценту, ведущему специалисту компании «Городской центр экспертиз – Энергетика» (ГЦЭ-Энерго), за помощь в подготовке теоретических и экспериментальных исследований по теме научного исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пляцанский Л. А., Решетняк С. Н., Решетняк М. Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. – 2022. – № 7(1). – С. 66 – 77. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.
2. Пляцанский Л. А., Решетняк М. Ю. Анализ гармонического состава в электрических сетях понизительных подстанций угольных шахт // Горный журнал. – 2020. – № 5. – С. 63 – 67. DOI: 10.17580/gzh.2020.05.11.
3. Zhilin E. V., Prasol D. A., Savvin N. Y. Optimization of the structure of filter-compensating devices in networks with powerful non-linear power consumers based on fuzzy logic // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2022, vol. 12, no. 6, pp. 5730 – 5737. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737.
4. Averbukh M. A., Zhilin E. V. Optimization of coefficients specified with non-sinusoidal and non-symmetry feeding voltage in electrical supply systems in individual residential sector // Journal of Physics: Conference Series. 2018, vol. 1066, no. 1, article 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012019.
5. Babaei Z., Samet H., Serikov V. A. New power balance equations for modelling electric arc furnace iet // Generation Transmission and Distribution. 2025, vol. 19, no. 1, article e70116. DOI: 10.1049/gtd2.70116.
6. Ключев Р. В. Разработки методики расчета качаний в электрической системе // Устойчивое развитие горных территорий. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 1205 – 1213. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213.
7. Ключев Р. В. Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината // Горная промышленность. – 2024. – № 5S. – С. 105 – 109. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109.
8. Ustinov A. D., Abou Rashid A. Using artificial neural network methods to increase the sensitivity of distance protection // International Journal of Engineering. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2192 – 2199. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.06.
9. Petrochenkov A. B., Mishurinskikh S. V. Development of a method for optimizing power consumption of an electric driven centrifugal pump / Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2021, vol. 2021, pp. 1520 – 1524. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396730.
10. Жуковский Ю. Л., Сусликов П. К. Идентификация и классификация электрической нагрузки горных предприятий на основе методов декомпозиции сигналов // Записки Горного института. – 2025. – Т. 275. – С. 5 – 17.
11. Кубрин С. С., Загоршменный И. М., Решетняк С. Н., Максименко Ю. М. Повышение эффективности функционирования горных машин угольных шахт // Уголь. – 2024. – № 4. – С. 83 – 87. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-4-83-87.
12. Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation // Energies. 2022, vol. 15, no. 7, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.
13. Yanchenko S., Kulikov A., Tsyruk S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices // Electric Power Systems Research. 2018, vol. 163, pp. 28 – 37.
14. Anisimov K. A., Sokol D. G., Zubov V. P. Geomechanical issues in the development of the Udachnaya diamondiferous pipe // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals. CRC Press. 2020, pp. 111 – 117. DOI: 10.1201/9781003164395-16.
15. Sychev Y. A., Aladin M. E., Abramovich B. N. The method of power factor calculation under non-sinusoidal conditions / Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Eiconrus. 2020, pp. 904 – 908. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039427.
16. Zhukovskiy Y., Suslikov P., Rasputin D. NILM-based feedback for demand response: A reproducible binary state-detection algorithm using active power // Electricity. 2026, vol. 7, article 23. DOI: 10.3390/electricity7010023.
17. 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/PMI.2021.3.10.
18. Morenov M., Buslaev G. V., Leusheva L., Lavrik A., Alikhanov A., Rafat P. Assessing Possibility of carbon dioxide injection into formations of oil and gas fields for geothermal energy produc-

tion: A case study // *International Journal of Engineering. Transactions B Applications*. 2025, vol. 38, no. 11, pp. 2486–2492. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.01.

19. Корогодин А. С., Иванов С. Л. Оценка технического состояния опорных подшипников скольжения барабанной мельницы при эксплуатации в составе арктического комплекса горного оборудования // *Горная промышленность*. – 2024. – № 6. – С. 144–151. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.

20. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloiev H., Suslov K., Beloiev I. Review of operating conditions, diagnostic methods, and technical condition assessment to improve reliability and develop a maintenance strategy for electrical equipment // *Energies*. 2025, vol. 18, no. 21, article 5832. DOI: 10.3390/en18215832.

21. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloiev H., Suslov K., Beloiev I. Methodology for developing a maintenance action program for power units of captive power plants based on an integrated priority indicator // *Energies*. 2026, vol. 19, no. 6, article 1584. DOI: 10.3390/en19061584.

22. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Chernyi S. G., Zhilenkov A. A., Degtyarev A., Mamunts D., Kustov A. Parametric correction in the control system of the electric propulsion of autonomous underwater vehicles affected by random inputs // *Discover Applied Sciences*. 2024, vol. 6, no. 10, article 510.

23. Avdeev B., Vyngra A., Chernyi S. Improving the electricity quality by means of a single-phase solid-state transformer // *Designs*. 2020, vol. 4, no. 3, article 35. DOI: 10.3390/designs4030035.

24. Muratbakeev E., Kozhubaev Y., Novak D., Kuzmenko E., Yiming Y. Research of control systems and predictive diagnostics of electric motors // *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 5, article 751. DOI: 10.3390/sym17050751.

25. Muratbakeev E., Kozhubaev Y., Novak D., Ershov R., Wei Z. Monitoring and diagnostics of mining electromechanical equipment based on machine learning // *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 9, article 1548. DOI: 10.3390/sym17091548.

26. Gendler S. G., Fazylov I. R. Methods of regulation air temperature in the Russian oil mains // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources–2019*. 2020, vol. 1, pp. 16–21. DOI: 10.1201/9781003014577-3.

27. Dzhemilev E., Shammazov I., Khvesko A., Mazur M. Development of a method for assessing bending stresses in the walls of above-ground main pipelines based on airborne laser scanning data // *Applied Sciences*. 2026, no. 16, article 1330. DOI: 10.3390/app16031330.

28. Устинов Д. А., Айсар А. Р. Анализ влияния объектов распределенной генерации на системы защиты и режим напряжения: обзор // *Безопасность труда в промышленности*. – 2023. – № 2. – С. 15–20. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20.

29. Yanchenko S. A., Costa F. B., Strunz K. Simulation tool for accurate and fast assessment of harmonic propagation in modern residential grids // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021, vol. 36, no. 4, pp. 2118–2128. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3020754.

30. 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, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009.

31. Kopteva A. V., Starshaya V. V., Malarev V. I., Koptev V. Y. Improving the efficiency of petroleum transport systems by operative monitoring of oil flows and detection of illegal incuts // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources–2019*. 2020, vol. 1, pp. 406–415. DOI: 10.1201/9781003014577-51.

32. Melnikova O., Nazarychev A., Iliev I., Beloiev I., Suslov K. Diagnostic statistical characteristics of dielectric strength of power transformer oil insulation // *Energy*. 2025, vol. 340, article 139169. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139169.

33. Kostin V. N., Minakova T. Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS subsystem // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 3, article 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032017.


34. Ляхомский А. В., Перфильева Е. Н., Кутепов А. Г. Анализ деятельности организаций угольной отрасли по обеспечению повышения энергоэффективности // *Уголь*. – 2021. – № 4 (1141). – С. 32–36.

35. Коржев А. А., Маларев В. И., Минакова Т. Е. Исследование схем измерительных автогенераторов для контроля влажности жидких нефтепродуктов диэлектрическим методом // *Горный журнал*. – 2025. – № 9. – С. 58–62. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.07.

36. Выболдин Ю. К. Использование технологии PLC для повышения эффективности системы передачи данных в подземных сооружениях // *Горный журнал*. – 2025. – № 9. – С. 62–68. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.08.

37. Vyboldin Y. K., Malinin S. I. Generalizing the analytical calculation of the energy spectrum of a pseudorandom pulse sequence // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). IEEE Xplore. 2022, article 21844773. DOI: 10.1109/WECONF.2022.9803507.

38. Anisimov K. A., Rajabzadeh M. A., Kholmisky A. V. Prospects for chromite ore mining in Russia based on a comparative analysis of mining-geological conditions of deposit development in Russia and Iran // International Journal of Engineering. 2026, vol. 39, no. 1, pp. 192 – 201. DOI: 10.5829/ije.2026.39.01a.15.

39. Veprikov A. A., Glukhov A. A. Problems of operating industrial DC power sources in parallel connection / Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Eiconrus. 2020, pp. 1339 – 1343. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038928. 

## REFERENCES

1. 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, no. 7(1), pp. 66 – 77. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77.

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

3. Zhilin E. V., Prasol D. A., Savvin N. Y. Optimization of the structure of filter-compensating devices in networks with powerful non-linear power consumers based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022, vol. 12, no. 6, pp. 5730 – 5737. DOI: 10.11591/ijece.v12i6.pp5730-5737.

4. Averbukh M. A., Zhilin E. V. Optimization of coefficients specified with non-sinusoidal and non-symmetry feeding voltage in electrical supply systems in individual residential sector. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1066, no. 1, article 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1066/1/012019.

5. Babaei Z., Samet H., Serikov V. A. New power balance equations for modelling electric arc furnace jet. *Generation Transmission and Distribution*. 2025, vol. 19, no. 1, article e70116. DOI: 10.1049/gtd2.70116.

6. Klyuev R. V. System analysis of rocking calculation methods for power supply systems in quarry points. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 1205 – 1213. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1205-1213.

7. Klyuev R. V. Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 5S, pp. 105 – 109. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109.

8. Ustinov A. D., Abou Rashid A. Using artificial neural network methods to increase the sensitivity of distance protection. *International Journal of Engineering*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 2192 – 2199. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.06.

9. Petrochenkov A. B., Mishurinskikh S. V. Development of a method for optimizing power consumption of an electric driven centrifugal pump. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2021, vol. 2021, pp. 1520 – 1524. DOI: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396730.

10. Zhukovskiy Y. L., Suslikov P. K. Identification and classification of electrical loads in mining enterprises based on signal decomposition methods. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 275, pp. 5 – 17. [In Russ].

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

12. Lyakhomskii A., Petrochenkov A., Romodin A., Perfil'eva E., Mishurinskikh S., Kokorev A., Kokorev A., Zuev S. Assessment of the harmonics influence on the power consumption of an electric submersible pump installation. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 7, article 2409. DOI: 10.3390/en15072409.

13. Yanchenko S., Kulikov A., Tsyruk S. Modeling harmonic amplification effects of modern household devices. *Electric Power Systems Research*. 2018, vol. 163, pp. 28 – 37.

14. Anisimov K. A., Sokol D. G., Zubov V. P. Geomechanical issues in the development of the Udachnaya diamondiferous pipe. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. CRC Press. 2020, pp. 111 – 117. DOI: 10.1201/9781003164395-16.
15. Sychev Y. A., Aladin M. E., Abramovich B. N. The method of power factor calculation under non-sinusoidal conditions. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Eiconrus*. 2020, pp. 904 – 908. DOI: 10.1109/EIconrus49466.2020.9039427.
16. Zhukovskiy Y., Suslikov P., Rasputin D. NILM-based feedback for demand response: A reproducible binary state-detection algorithm using active power. *Electricity*. 2026, vol. 7, article 23. DOI: 10.3390/electricity7010023.
17. 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.
18. Morenov M., Buslaev G. V., Leusheva L., Lavrik A., Alikhanov A., Rafat P. Assessing Possibility of carbon dioxide injection into formations of oil and gas fields for geothermal energy production: A case study. *International Journal of Engineering. Transactions B Applications*. 2025, vol. 38, no. 11, pp. 2486 – 2492. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.01.
19. Korogodin A. S., Ivanov S. L. Assessment of the technical condition of drum mill supporting sliding bearings during operation as part of an arctic mining equipment complex. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 6, pp. 144 – 151. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-144-151.
20. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., Beloev I. Review of operating conditions, diagnostic methods, and technical condition assessment to improve reliability and develop a maintenance strategy for electrical equipment. *Energies*. 2025, vol. 18, no. 21, article 5832. DOI: 10.3390/en18215832.
21. Nazarychev A., Iliev I., Manukian D., Beloev H., Suslov K., Beloev I. Methodology for developing a maintenance action program for power units of captive power plants based on an integrated priority indicator. *Energies*. 2026, vol. 19, no. 6, article 1584. DOI: 10.3390/en19061584.
22. Avdeev B. A., Vyngra A. V., Chernyi S. G., Zhilenkov A. A., Degtyarev A., Mamunts D., Kustov A. Parametric correction in the control system of the electric propulsion of autonomous underwater vehicles affected by random inputs. *Discover Applied Sciences*. 2024, vol. 6, no. 10, article 510.
23. Avdeev B., Vyngra A., Chernyi S. Improving the electricity quality by means of a single-phase solid-state transformer. *Designs*. 2020, vol. 4, no. 3, article 35. DOI: 10.3390/designs4030035.
24. Muratbakeev E., Kozhubaev Y., Novak D., Kuzmenko E., Yiming Y. Research of control systems and predictive diagnostics of electric motors. *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 5, article 751. DOI: 10.3390/sym17050751.
25. Muratbakeev E., Kozhubaev Y., Novak D., Ershov R., Wei Z. Monitoring and diagnostics of mining electromechanical equipment based on machine learning. *Symmetry*. 2025, vol. 17, no. 9, article 1548. DOI: 10.3390/sym17091548.
26. Gendler S. G., Fazylov I. R. Methods of regulation air temperature in the Russian oil mains. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources–2019*. 2020, vol. 1, pp. 16 – 21. DOI: 10.1201/9781003014577-3.
27. Dzhemilev E., Shammazov I., Khvesko A., Mazur M. Development of a method for assessing bending stresses in the walls of above-ground main pipelines based on airborne laser scanning data. *Applied Sciences*. 2026, no. 16, article 1330. DOI: 10.3390/app16031330.
28. Ustinov D. A., Aysar A. R. Analysis of the impact of the distributed generation facilities on protection systems and voltage mode: Review. *Occupational Safety in Industry*. 2023, no. 2, pp. 15 – 20. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-2-15-20.
29. Yanchenko S. A., Costa F. B., Strunz K. Simulation tool for accurate and fast assessment of harmonic propagation in modern residential grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021, vol. 36, no. 4, pp. 2118 – 2128. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3020754.
30. Baburin S. V., Turyшева 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, no. 1, article 012009. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012009.
31. Kopteva A. V., Starshaya V. V., Malarev V. I., Koptev V. Y. Improving the efficiency of petroleum transport systems by operative monitoring of oil flows and detection of illegal incuts. *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources–2019*. 2020, vol. 1, pp. 406 – 415. DOI: 10.1201/9781003014577-51.

32. Melnikova O., Nazarychev A., Iliev I., Beloev I., Suslov K. Diagnostic statistical characteristics of dielectric strength of power transformer oil insulation. *Energy*. 2025, vol. 340, article 139169. DOI: 10.1016/j.energy.2025.139169.

33. Kostin V. N., Minakova T. Protective and control relays as coal-mine power-supply ACS sub-system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 87, no. 3, article 032017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032017.

34. Lyakhomskii A. V., Perfil'eva E. N., Kutepov A. G. Analysis of the coal industry organizations activities on provision improve energy efficiency. *Ugol'*. 2021, no. 4 (1141), pp. 32 – 36. [In Russ].

35. Korzhev A. A., Malarev V., Minakova T. E. Measuring self-oscillator circuits for oil humidity control using dielcometric method. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 9, pp. 58 – 62. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.07.

36. Vyboldin Y. K. The use of PLC technology to improve efficiency of data transmission systems in underground structures. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 9, pp. 62 – 68. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.09.08.

37. Vyboldin Y. K., Malinin S. I. Generalizing the analytical calculation of the energy spectrum of a pseudorandom pulse sequence. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. *IEEE Xplore*. 2022, article 21844773. DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803507.

38. Anisimov K. A., Rajabzadeh M. A., Kholmsky A. V. Prospects for chromite ore mining in Russia based on a comparative analysis of mining-geological conditions of deposit development in Russia and Iran. *International Journal of Engineering*. 2026, vol. 39, no. 1, pp. 192 – 201. DOI: 10.5829/ije.2026.39.01a.15.

39. Veprikov A. A., Glukhov A. A. Problems of operating industrial DC power sources in parallel connection. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Eiconrus*. 2020, pp. 1339 – 1343. DOI: 10.1109/EIconrus49466.2020.9038928.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сериков Владимир Александрович<sup>1</sup> — канд. техн. наук, ассистент кафедры, e-mail: Serikov.va@bk.ru, ORCID ID: 0000-0002-2863-000X,

Сычев Юрий Анатольевич<sup>1</sup> — д-р техн. наук, доцент, e-mail: ya\_sychev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,

Попов Марк Викторович<sup>1</sup> — аспирант, e-mail: popov.mark.viktorovich@yandex.ru,

Бондаренко Александр Михайлович — главный энергетик, АО «Невский завод», e-mail: a.bondarenko@neph.ru,

Самет Хайдар — д-р техн. наук, профессор, Ширазский университет, Шираз, Иран, e-mail: hsamet@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1367-3872,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

**Для контактов:** Сериков В.А., e-mail: Serikov.va@bk.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Serikov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of Chair, e-mail: Serikov.va@bk.ru, ORCID ID: 0000-0002-2863-000X,

Yu.A. Sychev<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: ya\_sychev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0119-505X,

M.V. Popov<sup>1</sup>, Graduate Student, e-mail: popov.mark.viktorovich@yandex.ru,

A.M. Bondarenko, Chief Power Engineer,  
Nevsky Zavod JSC, Saint-Petersburg, Russia,  
Haidar Samet, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University,  
Shiraz, Iran, e-mail: hsamet@gmail.com,  
ORCID ID: 0000-0003-1367-3872,

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

**Corresponding author:** V.A. Serikov, e-mail: Serikov.va@bk.ru.

Получена редакцией 10.02.2026; получена после рецензии 18.03.2026; принята к печати 10.05.2026.

Received by the editors 10.02.2026; received after the review 18.03.2026; accepted for printing 10.05.2026.



**ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ (ТКО)  
И ТРАНСФОРМАЦИЯ ЕЕ В ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ РЕГИОНА**  
(2025, № 12, СБ 31, 16 с.)

*Алкинани Фатима Дакил Саидхууд* – аспирант, НИТУ МИСИС,

*Чмыхалова Светлана Валерьевна* – канд. техн. наук, доцент, НИТУ МИСИС, ORCID ID: 0000-0002-7625-9428.

Сделан оценочный расчет параметров системы обращения с ТКО для г. Эн-Наджаф, Республика Ирак. Система обращения с отходами состоит из подсистем: сбора отходов, транспортировка, обращение с отходами (переработка и утилизация). Разработана методика предварительной оценки количества контейнеров для сбора отходов, рассчитано количество мусоровозов (на примере мусоровоза КО-440-5 на шасси КамАЗ-65115 предназначен для механизированной загрузки, уплотнения, транспортировки и выгрузки твердых бытовых отходов. Масса загруженных отходов 9700 кг по техническим характеристикам), рассчитана оценочная производительность мусоросжигающего завода с производством электроэнергии (аналог мусоросжигающий завод в Московской области и заводы японско-швейцарской компании Hitachi Zosen Inova (HZI)). Внедрение комплексной системы обращения с ТКО, ключевым элементом которой является термическая переработка с генерацией энергии, формирует основу для обеспечения экологически безопасной городской среды. Каждая стадия технологического цикла, от накопления и транспортировки отходов до их сортировки, переработки и последующего уничтожения, направлена на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду и здоровье городского населения.

Ключевые слова: система обращения с твердыми коммунальными отходами, подсистемы, сбор, транспортировка, мусоросжигание, утилизация.

**IMPLEMENTATION OF THE WASTE MANAGEMENT SYSTEM AND ITS TRANSFORMATION  
INTO ENVIRONMENTAL SAFETY OF THE REGION**

*F. D. S. Alkinani*<sup>1</sup>, Graduate Student, *S. V. Chmykhalova*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
ORCID ID: 0000-0002-7625-9428; <sup>1</sup> NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

An estimated calculation of the parameters of the MSW management system for the city of Najaf, Republic of Iraq has been made. The waste management system consists of subsystems (lower-level systems): waste collection, transportation, waste management (recycling and disposal). A method for preliminary estimation of the number of waste collection containers has been developed, and the number of garbage trucks has been calculated (using the example of the КО-440-5 garbage truck on the КамАЗ-65115 chassis designed for mechanized loading, compaction, transportation and unloading of solid household waste. The mass of loaded waste is 9700 kg according to technical characteristics), the estimated productivity of an incinerator with electricity generation (an analog of an incinerator in the Moscow region and plants of the Japanese-Swiss company Hitachi Zosen Inova (HZI)) is calculated. The introduction of an integrated MSW management system, the key element of which is thermal processing with energy generation, forms the basis for ensuring an environmentally safe urban environment. Each stage of the technological cycle, from the accumulation and transportation of waste to its sorting, processing and subsequent destruction, is aimed at minimizing the negative impact on the environment and the health of the urban population.

Key words: municipal solid waste management system, subsystems, collection, transportation, incineration, disposal.