



## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ДСП-30

Бобожанов М.К.<sup>1</sup>, Каримов Р.Ч.<sup>1</sup>, Попкова О.С.<sup>2</sup>, Туйчиев Ф.Н.<sup>1</sup>, Махмутханов С.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,  
г. Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия  
mbobojanov@yahoo.com

**Резюме:** ЦЕЛЬЮ данной работы является изучение влияния работы дуговой печи ёмкостью 30 тонн на показатели качества электроэнергии путём проведения экспериментальных исследований в плавильном цеху предприятия «Li Da Metal Technology», расположенного в городе Ахангаране. Объектом изучения является дуговая печь ДСП-30, которая питается от печного трансформатора мощностью 30 кВА. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению влияния электродуговой печи ДСП-30 на работу электрической сети в плавильном цеху предприятия СП ООО «Li Da Metal Technology» и на подстанции «Саноат», обеспечивающей электроэнергией плавильный цех. Были сняты осциллограммы изменения напряжения и тока до и во время процесса плавки. Полученные осциллограммы анализировались методом быстрого разложения в ряд Фурье (Fast Fourier Transformation). ЗАКЛЮЧЕНИЕ. На основе анализа результатов, полученных путем экспериментальных исследований, можно заключить, что электродуговые печи являются мощными нелинейными потребителями с динамически изменяющейся электрической нагрузкой. При работе печи в режиме плавки показатели качества напряжения и тока резко ухудшаются, а форма кривых резко отличаются от синусоидальной. Эффекты ухудшения показателей качества электроэнергии отчетливо проявляются во вторичной обмотке печного трансформатора, а в шинах промышленной подстанции, питающей станцию электроэнергией эти эффекты проявляются в гораздо более затухающем состоянии и могут быть зарегистрированы специальными анализаторами и осциллографами. При работе дуговой печи в режиме плавления величина напряжения отличается от номинального значения от 300 до 500 Вольт. Если устройство компенсации реактивной мощности SVG не подключено в динамическом режиме, отклонение напряжения может достигать 5000 В. В заключение следует отметить, что электродуговая печь как нелинейный и сильно меняющийся потребитель оказывает существенное влияние на ухудшение качественных показателей электроэнергии. С точки зрения теории показателей качества электрической энергии данная ситуация является ярким примером негативного влияния на качественные показатели источника питания со стороны потребителя.

**Ключевые слова:** дуговая печь; показатели качества электроэнергии; короткая сеть; негативное влияние на сеть; высшие гармоники.

**Для цитирования:** Бобожанов М.К., Каримов Р.Ч., Попкова О.С., Туйчиев Ф.Н., Махмутханов С.К. Анализ результатов экспериментальных исследований дуговой печи ДСП-30 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 126-137. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-126-137.

## ANALYSIS OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF THE ARC FURNACE DSP-30

Bobojanov M.K.<sup>1</sup>, Karimov R.Ch.<sup>1</sup>, Popkova O.S.<sup>2</sup>, Tuychiev F.N.<sup>1</sup>, Makhmutkhanov S.K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia  
mbobojanov@yahoo.com

**Abstract:** *THE PURPOSE* of this work is to study the influence of the operation of an arc furnace with a capacity of 30 tons on the quality of electricity by conducting experimental studies in the melting shop of the «Li Da Metal Technology» enterprise located in the city of Akhangaran. The object of study is the DSP-30 arc furnace, which is powered by a 30 kVA furnace transformer. **RESULTS.** The article presents the results of experimental studies to study the influence of the DSP-30 electric arc furnace on the operation of the electrical network in the smelting shop of the «Li Da Metal Technology» LLC JV enterprise and at the “Sanoat” substation, which supplies the smelting shop with electricity. Oscillograms of voltage and current changes were recorded before and during the melting process. The resulting oscillograms were analyzed using the Fast Fourier Transformation method. **CONCLUSION.** Based on the analysis of the results of the above experimental studies, we can conclude the following: Electric arc furnaces are powerful nonlinear consumers with a dynamically changing electrical load. Therefore, when the furnace is operating in the melting mode, the voltage and current quality indicators sharply deteriorate, and the shape of the curves differs sharply from sinusoidal; The effects of deterioration in power quality indicators are clearly manifested in the secondary winding of a furnace transformer, in the buses of an industrial substation that supplies the station with electricity, then these effects appear in a much more damped state and can be recorded by special analyzers and oscilloscopes; When an electric arc furnace is operating in melting mode, the voltage value differs from the nominal value from 300 to 500 Volts. If the SVG power factor compensation device is not connected in dynamic mode, the voltage deviation can reach 5000 V. In conclusion, it should be noted that the electric arc furnace, as a nonlinear and highly variable consumer, has a significant impact on the deterioration of the quality indicators of electricity. From the point of view of the theory of electric energy quality indicators, this situation is a clear example of the negative impact on the quality indicators of a power source from the consumer.

**Keywords:** *arc furnace; power quality indicators; short network; negative impact on the network; higher harmonics.*

**For citation:** Bobojanov M.K., Karimov R.Ch., Popkova O.S., Tuychiev F.N., Makhmutkhanov S.K. Analysis of the results of experimental studies of the arc furnace DSP-30. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 126-137. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-126-137.

### **Введение (Introduction)**

Анализ современного состояния проблемы.

Как известно, мощные нелинейные потребители электроэнергии оказывают негативное влияние на качество электроэнергии в электрических сетях. Данное явление определяется так называемым вкладом со стороны динамически меняющимся потребителем электроэнергии [1-3].

Мощные дуговые печи для плавки стали являются резкопеременной нагрузкой для сети, которые работают в динамических режимах. Напряжение на выходе короткой сети меняется очень динамично в процессе плавления металлолома в дуговой печи [1, 3-4].

Изучению показателей качества электроэнергии, их роли в повышении эффективности производства и продлении срока службы электрического оборудования, а также необходимости совершенствования международных норм и правил для подключения источников электроэнергии и потребителей к общим точкам подключения посвящены научные работы профессора Дрезденского технического университета Яна Майера [5].

В них всесторонне изучено текущее состояние качества электроэнергии и его значение для системы электроснабжения, раскрыт механизм влияния нелинейных потребителей на качество электроэнергии, а также проведены исследования качества электроэнергии в различные временные интервалы. Кроме того, в настоящее время, в связи с увеличением потребления электрической энергии нелинейными электрическими устройствами в системе электроснабжения, в сети возникают высшие гармоники тока и напряжения с частотой до 150 кГц. По этой причине отдельно рассмотрены частотные диапазоны от 50 Гц до 2 кГц и от 2 кГц до 150 кГц. Результаты исследований основаны на 20-летних изысканиях в низковольтных электрических сетях [6].

Кроме того, в этом направлении широко освещены исследования профессора Марка Халпина (США) из Университета Алабамы, профессора Игора Папича из Люблянского Технического университета (Словения) и других ученых [7].

В направлении разработки методов оценки влияния напряжения несимметрии и несинусоидальности на электрических потребителей проведен ряд научных исследований немецким профессором П.Шегнер, а также российскими учеными Д.С.Федосовым, А.Н.Черненко и Н.А.Новоселовым. Их исследования направлены на глубокое изучение влияния таких параметров, как несимметрии и несинусоидальность напряжение, на качество электроэнергии. Кроме того, разработанные этими учеными методы оценки служат основой для минимизации негативного воздействия потребителей на электрические сети и повышения эффективности системы электроснабжения [8].

Научные исследования профессора Д.С.Федосова направлены на разработку методологии оценки влияния потребителей на показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения. В его работах разработан метод оценки влияния на качество электроэнергии путем анализа различных комбинаций параметров потребителей и систем электроснабжения. Также, с целью повышения эффективности экспериментального определения параметров схем замещения систем электроснабжения были разработаны алгоритмы обработки режимных параметров [8].

Был разработан специальный метод нормализации токов искажений, возникающих из-за нелинейных и несимметричных нагрузок, с учетом их показателей мощности. Результаты данного исследования представляют собой один из важных шагов, направленных на повышение надежности и эффективности систем электроснабжения [9].

Исследования А.Н.Черненко были направлены на создание динамической модели электрической дуги с использованием программы MathLab, а также на разработку метода расчета уровня высших гармоник, генерируемых электродуговыми печами. В ходе исследований были проанализированы методы определения и нормализации несинусоидальности кривой напряжения, а также изучены коэффициент несинусоидальности и значения отдельных гармоник на основе экспериментальных данных [10].

В научных работах Н. А. Новоселова представлены усовершенствованные методы определения и оценки показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения, содержащих маломощные электродуговые сталеплавильные печи (ДСП). Его исследования направлены на разработку более эффективных и точных методов снижения искажений в системах электроснабжения и выявления факторов, влияющих на качество электроэнергии. Эти методы способствуют повышению надежности электроснабжения и минимизации негативного воздействия маломощных сталеплавильных печей на общую электрическую сеть. В рамках исследования были проанализированы существующие методы оценки уровня высших гармоник в системах электроснабжения промышленных предприятий, использующих ДСП. Выявлены недостатки, влияющие на точность расчета коэффициента искажений синусоидальной формы напряжения, а также разработан усовершенствованный метод расчета коэффициента несинусоидальности. Для приведения выявленного коэффициента несинусоидальности к допустимым значениям предложен усовершенствованный метод выбора количества и параметров резонансных силовых фильтров [11].

Исследованию влияния электродуговых печей на сеть электроснабжения и разработке методов его снижения посвятили свои научные работы такие ученые, как В.И.Кочкин, О.П.Нечаев, Б.Д.Жохов, В.П.Рубцов, А.Р.Минеев, Г.Я.Вагин, Л.А.Кучумов, В.М.Салтыков, И.В.Жежеленко, В.Guzyi, N.O.Hingoran. В Узбекистане были проведены исследования по прогнозированию потребления электроэнергии электродуговыми печами [12-14].

Румынские ученые Noria Andrei, Costin Cepisca и Sorin Grigorescu проводили научные исследования по изучению негативного влияния электродуговых сталеплавильных печей на качество электроэнергии. В их работах особое внимание уделено нелинейной природе электродуговых печей, а также использованы различные методы моделирования для изучения высших гармоник, возникающих в процессе работы электродов [15]. Предложены методы определения высших гармонических токов, возникающих в общей точке подключения электродуговых сталеплавильных печей, а также более точные методы исследования коэффициентов несинусоидальности.

Однако в проведенных исследованиях детально не изучены показатели качества электроэнергии, особенно влияние электродуговых сталеплавильных печей на систему электроснабжения. Исходя из вышеизложенного анализа, можно отметить, что, несмотря на достигнутые определенные успехи в данной области, необходимо более глубокое исследование негативного воздействия электродуговых печей на систему электроснабжения. В частности, не до конца изучены вопросы оценки влияния нелинейных потребителей на качество напряжения в общей точке подключения, а также определения

вклада каждого нелинейного потребителя, подключенного к системе электроснабжения, в коэффициент несинусоидальности. Исследования в этом направлении послужат важной научной основой для повышения эффективности и устойчивости систем электроснабжения.

### Постановка задачи исследования

**Актуальность задачи.** В последнее время приходится считаться и с высшими гармониками (ВГ), генерируемыми дуговыми сталеплавильными печами (ДСП), так как растет производство стали в дуговых электропечах и их мощность. В республике функционирует и строятся металлургические комбинаты, где в плавильных цехах используются дуговые сталеплавильные печи различных мощностей и типов. Несинусоидальные режимы оказывают негативное воздействие на силовое оборудование, на систему релейной защиты, автоматики и телекоммуникации. Экономический ущерб, возникающий в результате воздействия высших гармоник, обусловлен ухудшением энергетических показателей и сокращением срока службы электрооборудования, общим снижением надежности функционирования электрических сетей. В отдельных случаях возможно ухудшение качества и снижение количества выпускаемой продукции. Поэтому актуальным является обеспечение электромагнитной совместимости электрооборудования при снижении затрат на обеспечение качества электроэнергии [4, 16].

**Важность задачи.** Изучение влияния дуговых печей на показатели качества электроэнергии и принятие мер по их улучшению будет способствовать уменьшению потерь электроэнергии, удлинению срока службы электрооборудования и повышению надёжности функционирования электрических сетей.

**Цель данной работы.** Целью данной работы является изучение влияния работы дуговой печи ёмкостью 30 тонн на показатели качества электроэнергии путём проведения экспериментальных исследований в плавильном цеху предприятия «Li Da Metal Technology», расположенного в городе Ахангаране. Объектом изучения была дуговая печь ДСП 30, которая питается от печного трансформатора мощностью 30 кВА.

### Материалы и методы (Materials and methods)

Были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния электродуговой печи ДСП-30 на работу электрическую сети в плавильном цеху предприятия СП ООО «Li Da Metal Technology» и на подстанции «Саноат», обеспечивающей электроэнергией плавильный цех. Были сняты осциллограммы изменения напряжения и тока до и во время процесса плавки.

Полученные осциллограммы анализировались методом быстрого разложения в ряд Фурье (Fast Fourier Transformation).

### Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 1 показан монитор контроля производительности системы визуализации печи ДСП-30.

Здесь видно, что электроды, являющиеся основными элементами ДСП, как правило, соединены со вторичной обмоткой печного трансформатора, перемещаются по вертикали с помощью гидравлической системы, и эти перемещения отображаются на мониторе. Печной трансформатор подключается к сети через реактор и элегазовый выключатель. Изменение токов, протекающих по фазам, с течением времени отображается через окно OnlineTrendControl [3, 17-19]. Кроме того, через систему визуализации можно видеть и контролировать изменения многих параметров.

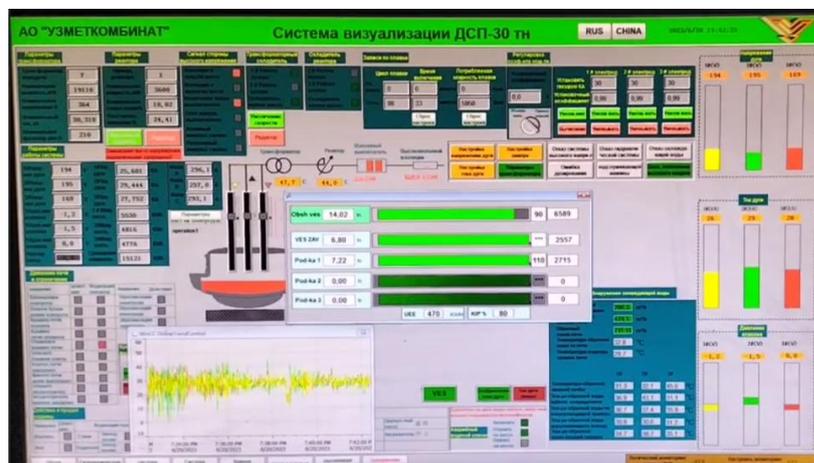


Рис. 1. Система визуализации работы печи ДСП-30 Fig. 1. Visualization system for the operation of the DSP-30 furnace

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 2 показаны графики изменения токов во времени в фазах ДСП через окно OnlineTrendControl. Из этого графика видно, что на этапе плавки, то есть когда печь работает с очень большой нагрузкой, токи принимают большие значения и они резко отличаются друг от друга. Например, в момент времени 19:34 ток второй фазы (зеленый) превышает значение 40 кА, а в 19:40 его значение близок к 36 кА. В эти же моменты значение тока в первой фазе А составляет от 36 кА до 6 кА в 19:34 и около 30 кА в 19:40 [9].

Следующая фаза плавления металла закончилась в 19:43, и это явление объясняется тем, что графики фазных токов резко изменяются до нуля. После небольшой паузы, т.е. после загрузки печи металлоломом для последующей плавки, процесс продолжается снова.

Следует отметить, что значения плавильных токов и времени плавления зависят от расплавляемых состава металлолома (железа, чугуна и др.), степени их уплотнения и рядом параметров [18-20].

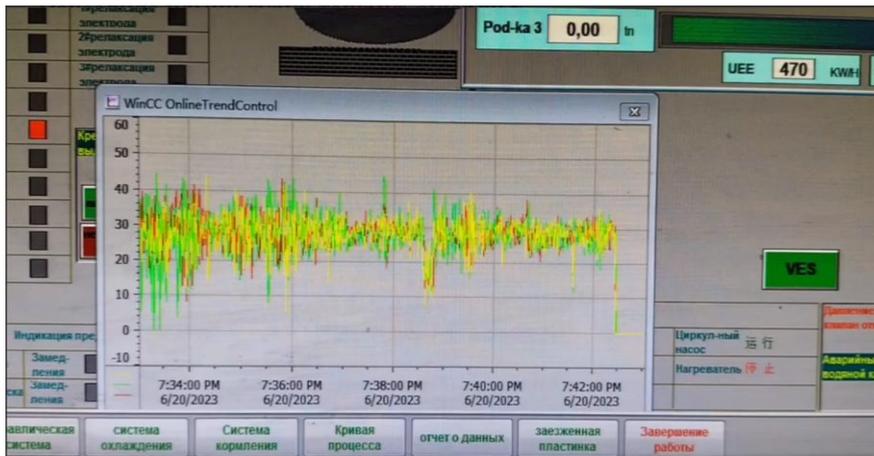


Рис. 2. Изменение фазных токов в фазах ДСП на OnlineTrendControl *Fig. 2. Change of phase currents in phases of arc steel-smelting furnaces on OnlineTrendControl*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

С использованием анализатора AP-6 Circuitor были сняты осциллограммы изменения фазных напряжений на короткой сети печного трансформатора, который питает ДСП 30 установленный в плавильном цеху ООО “Li Da Metal Technology”. В процессе плавки были получены осциллограммы изменения напряжений (рис.3) [1-3].

Амплитуды высших гармоник, содержащихся в этой осциллограмме, были определены путем разложения в ряд Фурье графика изменения напряжения в одной фазе на этой осциллограмме.

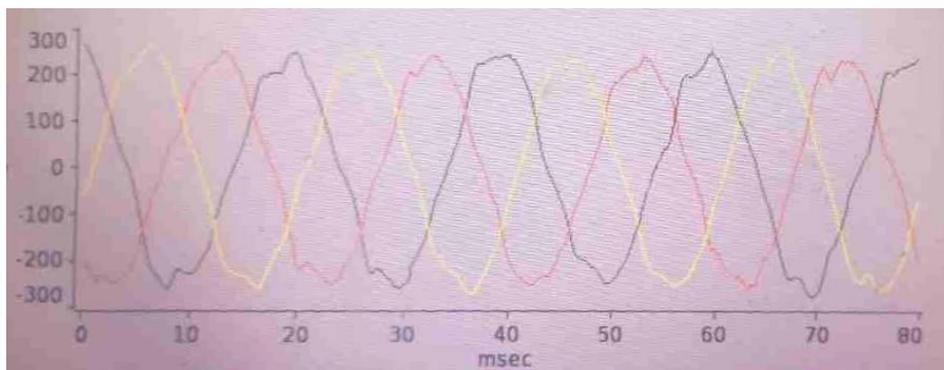


Рис. 3. Осциллограммы изменения напряжения на короткой сети электродуговой печи ДСП-30 *Fig. 3. Oscillograms of voltage changes on a short network of an electric arc furnace DSP-30*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

На рисунке 4. показаны гармонический состав высших гармонических в кривой напряжения одной фазы короткой сети в схеме электроснабжения дуговой печи ДСП-30 и диаграмма высших гармонических. Как видно, кривая напряжения помимо основной гармоники содержит 2, 3, 5, 6 и другие гармоники [19-21].



Рис. 4. Гармонический состав и диаграмма высших гармонических в кривой напряжения на короткой сети печи ДСП-30

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из таблицы можно увидеть, что величина тока соответствующая первой гармонике равна 78,362 ампер, ток второй гармоники равен 8,836 ампер, что составляет 11,276% от основной гармоники. Величина тока третьей гармоники составляет 19,206 ампер, в процентах – 24,509%, ток пятой гармоники – 11,286 Ампер (в процентах 14,4%). Для следующих порядков гармоник соответствует следующее: ток седьмой гармоники - 6,913 ампер (8,822%), восьмой гармоники 9,245 ампер (11,797%), девятой гармоники – 3,618 ампер (4,617%) и 10-ой гармоники 5,584 ампер (7,126%) и т.д.

Одним словом в спектре высших гармонических, соответствующем кривой напряжения на выходе печного трансформатора для ДСП-30 соержатся высшие гармоники, кроме 4-ой гармоники и при работе дуговой печи в режиме плавления высшие гармоники оказывают негативное влияние на питающую сеть [17-20].

**Осциллограммы изменения напряжения и тока в режиме работы ДСП**

На рисунке 5 показаны осциллограммы изменения напряжения на 3-х фазах при работе электродуговой печи в нормальном режиме работы. Данные осциллограммы были сняты на подстанции «Саноат», которое питает предприятие «Li Da Metal Technology» в городе Ахангаране.

Из этого рисунка видно, что почти все значения фазного напряжения составляют 20,475 кВ и сдвинуты по фазе на 120°. В идеальном случае фазное напряжение в сети 35 кВ равно 20,234 кВ.

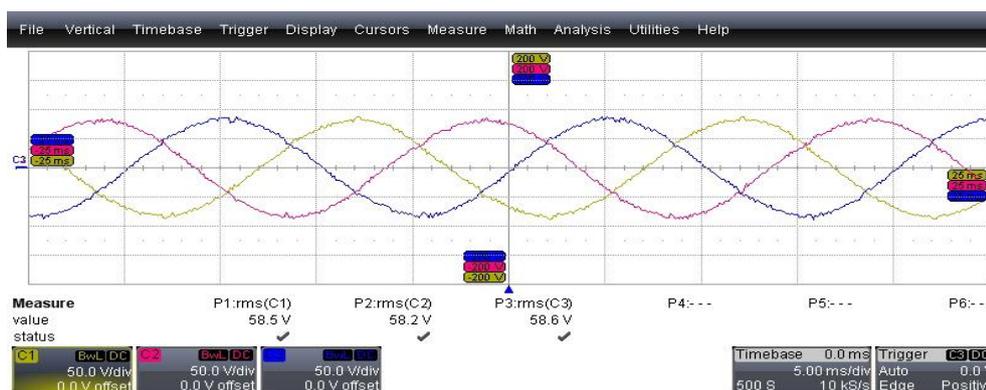


Рис. 5. Осциллограмма трехфазного напряжения в нормальном режиме работы

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 6 представлена осциллограмма изменения напряжения в одной фазе при работе электродуговой печи в нормальном режиме работы. На этой осциллограмме также видно, что на графике изменения напряжения присутствуют небольшие пульсации, и они тесно связаны с наличием в сети нелинейных элементов и резкими изменениями электрических параметров.

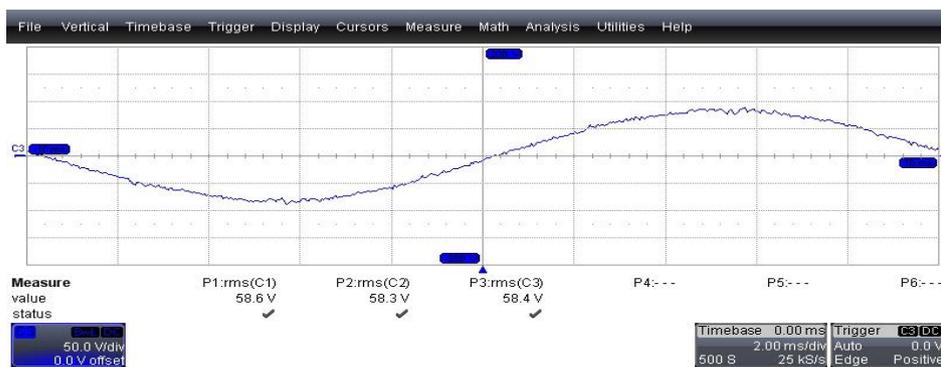


Рис. 6. Осциллограмма однофазного напряжения в режиме холостого хода  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В начале данной статье упоминалось, что присутствующий в системе электроснабжения нелинейный элемент оказывает негативное влияние на остальных потребителей через шины. Вышеописанная ситуация актуальна и для этой системы, что подтверждают полученные осциллограммы изменения напряжения и тока при нахождении ЭДП в режиме плавки [4-7, 10].

Осциллограммы изменения напряжения и тока были получены с помощью осциллографа типа LeCroy WaveRunner при работе ДСП-30 грузоподъемностью 30 тонн в режиме плавки металла.

На рисунке 7 показаны кривые изменения фазного тока в режиме плавки металла.

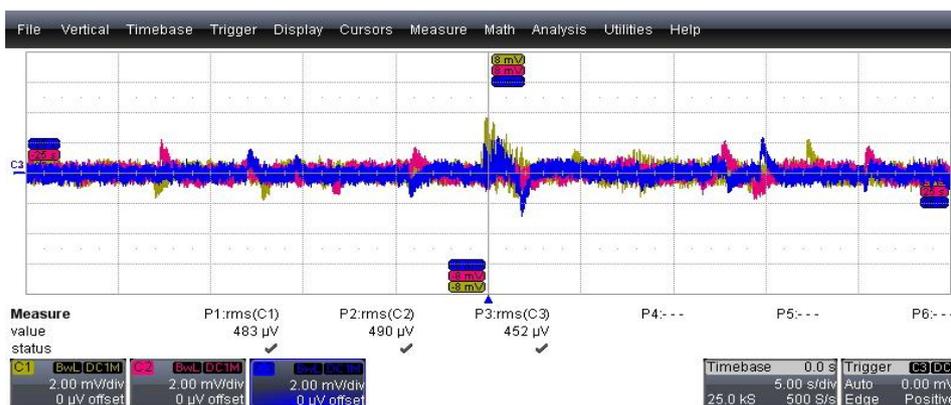


Рис. 7. Осциллограмма изменения тока  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Первая фаза (A) выделена фиолетовым цветом, вторая фаза (V) – розовым и третья фаза – желтым. Из этих осциллограмм видно, что изменения токов имеют резкий и неповторимый характер. Кроме того, изменение фазных токов отличается от синусоидальной по форме.

Используя быстрое преобразование Фурье, доступное в функциях осциллографа типа LeCroy WaveRunner, графики токов были разложены в ряд Фурье и получен график, представленный на рисунке 8 ниже.

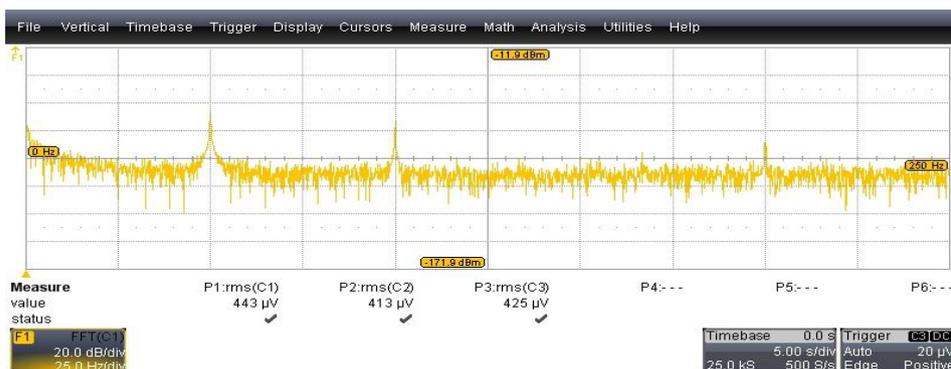


Рис. 8. Распространение тока ЭДП на ряд Фурье (Fast Fourier Transformation)  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из этого графика видно, что на кривых токов выделяются первая, вторая и четвертая гармоники, т.е. их амплитуды больше остальных гармоник.

На рисунке 9 показаны осциллограммы изменения фазных напряжений в процессе работы печи, т.е. при плавке металлолома.

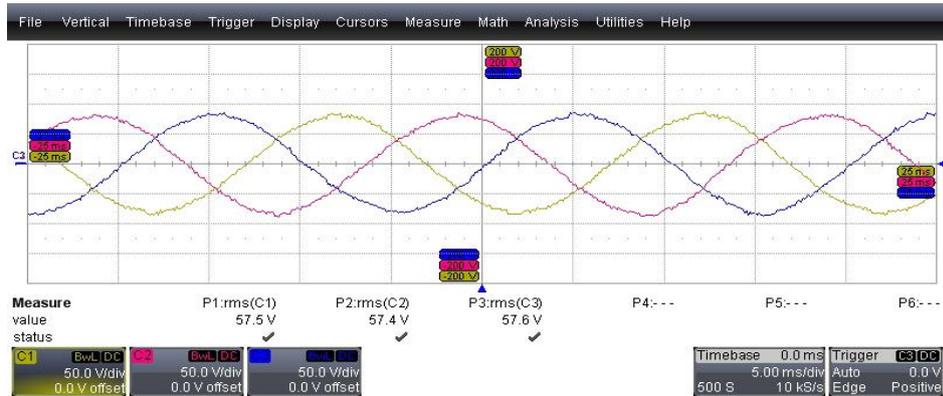


Рис. 9. Осциллограммы напряжения в режиме плавки ЭДП *Fig. 9. Voltage oscillograms in the melting mode of electric arc furnaces*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

Из рисунка видно, что работа печи не оказывает сильного влияния на форму фазных напряжений. Это можно объяснить наличием реактора с высокой индуктивностью, подключенного к системе электроснабжения, и устройства компенсации реактивной мощности SVG, подключенного к сети в динамическом режиме. Фазное напряжение не сильно отличается по величине [3-4, 17-18].

С помощью быстрого преобразования Фурье осциллограмма напряжения, доступного в функциях осциллографа типа LeCroy Wave Runner, графики изменения тока были разложены в ряд Фурье и получен график, представленный на рисунке 10 ниже.

Из графика видно, что на кривых напряжения хорошо видны по величине первая, вторая и третья гармоники. Следует подчеркнуть, что эти эксперименты проводились в условиях, когда электродуговая печь не работала при очень большой нагрузке. Поэтому резких различий в кривых тока и тем более напряжения не заметно. Как упоминалось в статье, при регистрации изменения напряжения во вторичной обмотке короткого замыкания печного трансформатора, расположенного в литейном цехе, с помощью анализатора AR6, можно было увидеть, что напряжение в трех фазах резко изменилось с точки зрения амплитуда и форма [1, 17-20].

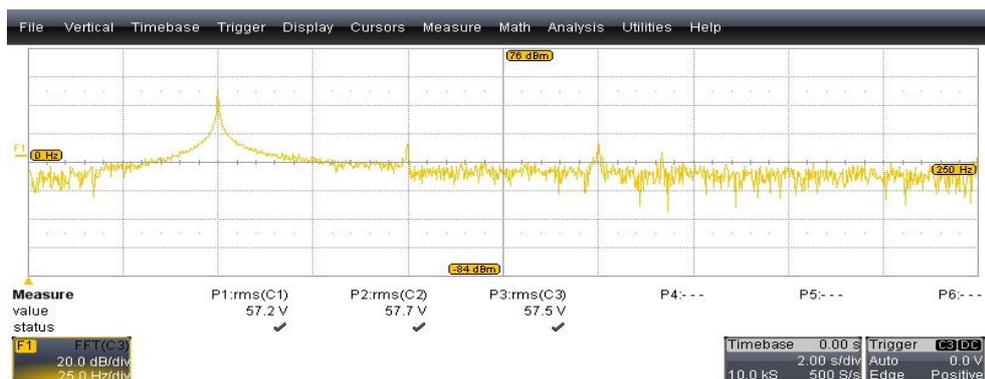


Рис. 10. Распространение кривой изменения напряжения по линии Фурье (Fast Fourier Transformation) *Fig. 10. Propagation of the voltage change curve along the Fourier line (Fast Fourier Transformation)*

\*Источник: Составлено авторами *Source: compiled by the author.*

### Выводы (Conclusions)

На основе анализа результатов приведенных выше экспериментальных исследований можно прийти к следующему выводу:

1. Электродуговые печи являются мощными нелинейными потребителями с динамически изменяющейся электрической нагрузкой. Поэтому при работе печи в режиме плавки показатели качества напряжения и тока резко ухудшаются, а форма кривых резко отличаются от синусоидальной;

2. Эффекты ухудшения показателей качества электроэнергии отчетливо проявляются во вторичной обмотке печного трансформатора, на шинах промышленной подстанции, питающей станцию электроэнергией, то эти эффекты проявляются в гораздо более затухающем состоянии и могут быть зарегистрированы специальными анализаторами и осциллографами;

3. При работе электродуговой печи в режиме плавления величина напряжения отличается от номинального значения от 300 до 500 вольт. Если устройство компенсации реактивной мощности SVG не подключено в динамическом режиме, отклонение напряжения может достигать до 5000 В.

В заключение следует отметить, что электродуговая печь как нелинейный и сильно меняющийся потребитель оказывает существенное влияние на ухудшение качественных показателей электроэнергии. С точки зрения теории показателей качества электрической энергии данная ситуация является ярким примером негативного влияния на качественные показатели источника питания со стороны потребителя.

#### Литература

1. Zbigniew Łukasik and Zbigniew Olczykowski, (2020). *Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems*. Energies 2020, 13, 1462; <https://doi.org/10.3390/en13061462>
2. Z. Olczykowski, (2018). *The Influence of Disturbances Generated by Arc Furnaces on the Power Quality*. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Energy and Power Engineering. Vol.12, №9, 2018. DOI:10.5281/zenodo.1474626
3. Ю.А.Сычев, Р.Ю.Зимин, (2021). *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
4. М.К.Бобожанов, С.Махмутханов, С.Айтбаев, (2023), *Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form*. Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form. AIP Conf.: Proceedings 2552. 2023, 05011. <https://doi.org/10.1063/5.0113890>
5. Thomas Hay, Ville-Valtteri Visuri, Matti Aula, and Thomas Echterhof, (2020). *A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process*. Advanced science news. Steel research int. 2020, 2000395, pp.1-22. <https://doi.org/10.1002/srin.202000395>
6. Maciej Klimas; Dariusz Grabowski, and all Authors, (2023). *Analysis of correlations between electric arc furnace model coefficients*. 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194885
7. A. Bracale, P. Caramia, P. D. Falco, G. Carpinelli and A. Russo, (2020). *DC electric arc furnace modelling for power quality indices assessment*. 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 1-6
8. T.A.C. Maia and V.C.Onofri, (2022). *Survey on the electric arc furnace and ladle furnace electric system*. Ironmaking & Steelmaking, vol. 49, no. 10, pp. 976-994
9. M.Cernan, Z.Muller, J.Tlusty and V.Valouch, (2021). *An improved SVC control for electric arc furnace voltage flicker mitigation*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 129, pp. 106831.
10. B.S.Jebaraj, J.Bennet, R.Kannadasan, M.H.Alsharif, M.-K.Kim, A.A.Aly, et al., (2021). *Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and Static VAR Compensator*. Electronics, vol. 10, no. 9, 2021.
11. А.Николаев, П.Тулупов, А.Денисевич и С.Рыжевол, (2021). *Анализ гармонического состава токов и напряжений дуг в дуговой сталеплавильной печи с использованием математической модели*. Вестник Южно-Уральского государственного Университета. Серия: «Энергетика». 21, 2 (апр. 2021), 72–84. <https://doi.org/10.14529/power210208>
12. V.Y.Ushakov, A.V.Mytnikov, I.U.Rakhmonov, (2023). *Traditional Electrical Diagnostic Methods*. Power Systems, 2023, Part F1292, pp. 179–197.
13. I.U.Rakhmonov, F.A.Hoshimov, N.N.Kurbonov, D.A.Jalilova, (2022). *Optimization of the Modes of Electric Loads of Power-consuming Units Operating in Different Production Modes*. AIP Conference Proceedings, 2022, 2552, 050022. <https://doi.org/10.1063/5.0112391>
14. I.U.Rakhmonov, V.Ya.Ushakov, N.N.Niyozov, N.N.Kurbonov, M.Mamutov, (2021). *Energy saving in industry*. E3S Web of Conferences, 2021, 289, 07014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907014>
15. I.Rakhmonov, A.Berdishev, B.Khusanov, U.Khaliknazarov, U.Utegenov, (2020). *General characteristics of networks and features of electricity consumers in rural areas*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 883(1), 012104.

16. М.М.Камолов, Ш.Дж.Джураев, С.Т.Исмоилов, С.А.Абдулкеримов, Х.Б.Назирова, (2020). *Учёт несинусоидального/несимметричного режима работы электрической сети коммунально-бытового назначения при расчете уровня тока нулевого проводника*. Электричество. - М.: 2020; 1: С.35-43.

17. М.М.Камолов, Х.Б.Назирова, С.Т.Исмоилов, Ш.Дж.Джураев, А.С.Амирханов, (2019). *Экспериментальная оценка качества электрической энергии современных коммунально-бытовых и офисных электроприемников*. ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК. Серия: Инженерные исследования. 2019; 2(46): 26-33.

18. М.К.Бобожанов, А.Расулов, С.Махмутхонов, (2022) *Оценка несинусоидальности напряжения по мощности потребителя*. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГО- И РЕСУРСО-СБЕРЕЖЕНИЯ. – Т.: Специальный выпуск (№83). 2022; 177-182.

19. Amarjeet Singh, Ravindra Kumar Singh, Asheesh Kumar Singh, (2017). *Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations -A Review*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). Vol-4, Issue-4, Apr- 2017. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.4.4>

20. Andriy Lozynskyy, Jacek Kozyra, and all authors, (2022). *A Mathematical Model of Electrical Arc Furnaces for Analysis of Electrical Mode Parameters and Synthesis of Controlling Influences*. Energies 2022, 15, 1623. <https://doi.org/10.3390/en15051623>

#### Авторы публикации

**Бобожанов Максуд Каландарович** – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>. *E-mail*: [mbobojanov@yahoo.com](mailto:mbobojanov@yahoo.com)

**Каримов Рахматилло Чориевич** – д-р философии (PhD) по техн. наукам, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643>. *E-mail*: [raxmatillo82@mail.ru](mailto:raxmatillo82@mail.ru)

**Попкова Оксана Сергеевна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-3007-6853>. *E-mail*: [oksiniy@mail.ru](mailto:oksiniy@mail.ru)

**Туйчиев Фуркат Нумонович** – д-р философии (PhD) по техн. наукам, доцент, доцент кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0002-0047-7066>. *E-mail*: [tuychievfn@gmail.com](mailto:tuychievfn@gmail.com)

**Махмутханов Султонхужа Камолхужа угли** – ассистент кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. *ORCID*: <https://orcid.org/0000-0001-6098-4097>. *E-mail*: [sultonmk@mail.ru](mailto:sultonmk@mail.ru)

#### References

1. Zbigniew Łukasik and Zbigniew Olczykowski, (2020). *Estimating the Impact of Arc Furnaces on the Quality of Power in Supply Systems*. Energies 2020, 13, 1462; <https://doi.org/10.3390/en13061462>

2. Z.Olczykowski, (2018). *The Influence of Disturbances Generated by Arc Furnaces on the Power Quality*. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Energy and Power Engineering. Vol.12, №9, 2018. DOI:10.5281/zenodo.1474626

3. Yu.A.Sychoy, R.Yu.Zimin, (2021). *Improvement of Power Quality in Power Supply Systems of the Mineral Resource Complex Using Hybrid Filter Compensation Devices*. Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 247. pp. 132-140. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.14

4. M.K.Bobojanov, S.Mahmutkhonov, S.Aytbaev, (2023), *Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form*. Investigation of the Problems Non-Sinusoidal of the Voltage Form. AIP Conf.: Proceedings 2552. 2023, 05011. <https://doi.org/10.1063/5.0113890>

5. Thomas Hay, Ville-Valtteri Visuri, Matti Aula, and Thomas Echterhof, (2020). *A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process*. Advanced science news. Steel research int. 2020, 2000395, pp.1-22. <https://doi.org/10.1002/srin.202000395>

6. Maciej Klimas; Dariusz Grabowski, and all Authors, (2023). *Analysis of correlations between electric arc furnace model coefficients*. 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe. DOI: [10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194885](https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194885)
7. A. Bracale, P. Caramia, P. D. Falco, G. Carpinelli and A. Russo, (2020). *DC electric arc furnace modelling for power quality indices assessment*. 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 1-6
8. T.A.C. Maia and V.C. Onofri, (2022). *Survey on the electric arc furnace and ladle furnace electric system*. Ironmaking & Steelmaking, vol. 49, no. 10, pp. 976-994
9. M.Cernan, Z.Muller, J.Tlusty and V.Valouch, (2021). *An improved SVC control for electric arc furnace voltage flicker mitigation*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 129, pp. 106831.
10. B.S.Jebaraj, J.Bennet, R.Kannadasan, M.H.Alsharif, M.-K.Kim, A.A.Aly, et al., (2021). *Power quality enhancement in electric arc furnace using matrix converter and Static VAR Compensator*. Electronics, vol. 10, no. 9, 2021.
11. A.Nikolaev, P.Tulupov, A.Denisevich, and S.Ryzhevolskiy (2021). *Analysis of the Harmonic Composition of Currents and Voltages of Arcs in an Electric Arc Furnace Using a Mathematical Model*. Bulletin of South Ural State University. Series: "Energy". 21, 2 (April 2021), 72–84. <https://doi.org/10.14529/power210208>
12. V.Y.Ushakov, A.V.Mytnikov, I.U.Rakhmonov, (2023). *Traditional Electrical Diagnostic Methods*. Power Systems, 2023, Part F1292, pp. 179–197.
13. I.U.Rakhmonov, F.A.Hoshimov, N.N.Kurbonov, D.A.Jalilova, (2022). *Optimization of the Modes of Electric Loads of Power-consuming Units Operating in Different Production Modes*. AIP Conference Proceedings, 2022, 2552, 050022. <https://doi.org/10.1063/5.0112391>
14. I.U.Rakhmonov, V.Ya.Ushakov, N.N.Niyozov, N.N.Kurbonov, M.Mamutov, (2021). *Energy saving in industry*. E3S Web of Conferences, 2021, 289, 07014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907014>
15. I.Rakhmonov, A.Berdishev, B.Khusanov, U.Khaliknazarov, U.Utegenov, (2020). *General characteristics of networks and features of electricity consumers in rural areas*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 883(1), 012104.
16. M.M.Kamolov, Sh.D.Juraev, S.T.Ismoilov, S.A.Abdulkerymov, Kh.B.Nazirov, (2020). *Consideration of non-sinusoidal/asymmetrical operating mode of the power network for public utility services when calculating the zero conductor current level*. Electricity, (2020); 1: 35-43.
17. M.M.Kamolov, Kh.B.Nazirov, S.T.Ismoilov, Sh.D.Juraev, A.S.Amirkhanov, (2019). *Experimental assessment of power quality of modern public utility and office electrical consumers*. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research, (2019); 2(46): 26-33.
18. M.K.Bobojanov, A.N.Rasulov, S.K.Mahmutkhonov, (2022). *Assessment of voltage non-sinusoidality by consumer power*. Problems of Energy and Resource Saving, (2022); Special Issue (No. 83): pp.177-182.
19. Amarjeet Singh, Ravindra Kumar Singh, Asheesh Kumar Singh, (2017). *Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations -A Review*. International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS). Vol-4, Issue-4, Apr- 2017. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.4.4.4>
20. Andriy Lozynskyy, Jacek Kozyra, and all authors, (2022). *A Mathematical Model of Electrical Arc Furnaces for Analysis of Electrical Mode Parameters and Synthesis of Controlling Influences*. Energies 2022, 15, 1623. <https://doi.org/10.3390/en15051623>

#### Authors of the publication

**Maksud K. Bobojanov** – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>. E-mail: [mbobojanov@yahoo.com](mailto:mbobojanov@yahoo.com)

**Rakhmatillo Ch. Karimov** – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643>. E-mail: [raxmatillo82@mail.ru](mailto:raxmatillo82@mail.ru)

**Oksana S. Popkova** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3007-6853>. E-mail: [oksiniy@mail.ru](mailto:oksiniy@mail.ru)

**Furkat N. Tuychiev** – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0047-7066>. E-mail:

*tuuchievfn@gmail.com*

***Sultonkhuzha K. Makhmutkhanov*** – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan. *ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6098-4097>. E-mail: [sultonmk@mail.ru](mailto:sultonmk@mail.ru)*

*Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика*

***Получено*** ***28.02.2025 г.***

***Отредактировано*** ***12.03.2025 г.***

***Принято*** ***04.04.2025 г.***