

УДК 621.314

## АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ РАБОТЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ТРЁХФАЗНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Семёнов А.С., Матул Г.А., Хазиев Р.Р., Шевчук В.А., Черенков Н.С.

*Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Мирный, e-mail: sash-alex@yandex.ru*

Данная научная статья посвящена вопросам исследования и анализа показателей качества электрической энергии при работе асинхронного двигателя от трёхфазной сети в лаборатории электромагнитной совместимости и качества электроэнергии Политехнического института (филиала) ФГАОУ ВПО «СВФУ имени М.К. Аммосова» в г. Мирном. Поставлены задачи измерения и анализа показателей качества электроэнергии. Рассмотрены вопросы обеспечения норм качества электроэнергии. Определен перечень измеряемых характеристик в соответствии с требованием ГОСТ 13109-97. Рассмотрены различные схемы подключения анализатора к трёхфазной сети. Приведено описание программного обеспечения для работы с измеренными показателями качества электроэнергии. Получены и проанализированы результаты измерений, произведенных за сутки согласно ГОСТ 13109-97. Исследованию подлежали действующее напряжение и напряжение основной частоты, установившееся отклонение напряжения, частота, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения, коэффициенты n-ой гармонической составляющей напряжения, кратковременная доза фликера, угол фазового сдвига между фазными напряжениями, активная и реактивная мощности, коэффициент мощности. Сделаны выводы и заключения по полученным результатам.

**Ключевые слова:** показатели качества электрической энергии, энергетическое обследование, электромагнитная совместимость, отклонение напряжения, провалы и перенапряжения, гармоники, искажения синусоидальности, коэффициент несимметрии, мощность

## ANALYSIS QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY IN THE WORK ASYNCHRONOUS MACHINE FROM THREE-PHASE POWER SUPPLY

Semenov A.S., Matul G.A., Khaziev R.R., Shevchuk V.A., Cherenkov N.S.

*Polytechnic Institute (branch) «NEFU name after M.K. Ammosov», Mirny, e-mail: sash-alex@yandex.ru*

This scientific article is devoted to the study and analysis of the quality of electrical energy in the work of the asynchronous machine from three-phase network in the laboratory of electromagnetic compatibility and power quality Polytechnic Institute (branch) «NEFU name after M.K. Ammosov» in Mirny. The task of measuring and analysis of the quality of electricity. The problems of ensuring the quality standards of electricity. The list of the measured characteristics in accordance with the requirements of GOST 13109-97. Various schemes connect the analyzer to the three-phase network. The description of software for the work with the measured parameters of quality of electric power. Received and reviewed the results of measurements made per day according to GOST 13109-97. The study was subject to the applicable current and voltage of the fundamental frequency, steady-state voltage deviation, frequency, coefficients unbalance voltage reverse and zero sequences, the coefficients waveform distortion voltage coefficients of n-th harmonic component voltage, short-dose flicker, the angle of phase shift between phase voltages, active and reactive power, power factor. The findings and conclusions on the obtained results.

**Keywords:** indicators of quality of electrical energy, energy audit, electromagnetic compatibility, the voltage deviation, failures and voltage, harmonics, distortion of sinusoidally, asymmetry coefficient, power

Электрическая энергия как товар используется во всех сферах жизнедеятельности человека, обладает совокупностью специфических свойств и непосредственно участвует при создании других видов продукции, влияя на их качество. Понятие качество электроэнергии (КЭ) отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электроприемник (ЭП) предназначен для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальной частоте, напряжении, токе и т.п., поэтому для нормальной его работы должно быть обеспечено требуемое КЭ. Таким образом, качество электрической энергии определяется совокупностью ее характеристик, при которых ЭП могут нормально работать и выполнять заложенные в них функции.

К основным задачам измерения и анализа показателей качества электроэнергии (ПКЭ) относятся: обнаружение помех и их оценка; регистрация измеренных числовых характеристик в целях обработки и отображения результатов; оценка измеренных значений показателей качества электроэнергии на соответствие установленным требованиям; определение источника помех; проведение коммерческих расчетов между поставщиком и потребителем электроэнергии. Для организации измерений необходимо определить вид контроля, точку осуществления измерений и виды контролируемых ПКЭ. В зависимости от длительности наблюдения можно выделить два вида организации контроля КЭ: периодический и постоянный [4]. Отличие постоянного контроля от пе-

риодического заключается в непрерывности времени измерений и обработки результатов.

Возможны два варианта реализации поставленной задачи по измерению и анализу ПКЭ: система мониторинга, основанная на методах виртуального моделирования физических процессов; система мониторинга, основанная на применении контрольно-измерительных приборов [3]. На сегодняшний день методы виртуального моделирования широко применяются во всех областях науки и производства, так как они позволяют оперативно и с наименьшими затратами определить определенные параметры конечного результата. Особенно широко виртуальное моделирование применяется в проектной деятельности. Основным преимуществом второго варианта системы мониторинга ПКЭ является высокая точность, так как метод основан на измерениях физических величин [1, 5–8]. Также исследования, направленные на использование этого метода, позволяют определить принципиально новые требования к приборам учета и мероприятиям, обеспечивающим оптимизацию ПКЭ.

В настоящее время утверждены новые стандарты ГОСТ Р 51317.4.7-2008 и ГОСТ Р 51317.4.30-2008, регламентирующие методы измерения ПКЭ. Эти стандарты базируются на международных стандартах МЭК 61000, разработанных для пересмотра европейского стандарта на КЭ EN 50160. Также с 1 июля 2014 года вводится в действие новый ГОСТ Р 54149-2010, устанавливающий

требования к допустимому уровню помех в электрических сетях общего назначения.

Современные анализаторы ПКЭ должны обеспечивать измерение следующих характеристик в соответствии с требованиями действующего в настоящее время ГОСТ 13109-97 [2]: действующее напряжение и напряжение основной частоты; установившееся отклонение напряжения; частоту; коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, искажения синусоидальности кривой напряжения,  $n$ -ой гармонической составляющей напряжения, временного перенапряжения; отклонение частоты; длительности провала напряжения, временного перенапряжения; глубину провала напряжения; размах изменения напряжения; кратковременную и длительную дозу фликера; угол фазового сдвига между фазными напряжениями основной частоты; активную и реактивную мощности.

Измерения ПКЭ и их дальнейший анализ при работе асинхронного двигателя проводились с использованием средств измерений и программного обеспечения типа «Ресурс». Измерители «Ресурс-UF2М» имеют один четырехканальный универсальный вход измерения напряжения и два четырехканальных входа тока (с номинальными значениями тока 1 и 5 А).

На рис. 1 показан измерительный стенд: трёхфазный источник питания, асинхронный двигатель, прибор «Ресурс-UF2М» с токоизмерительными клещами.

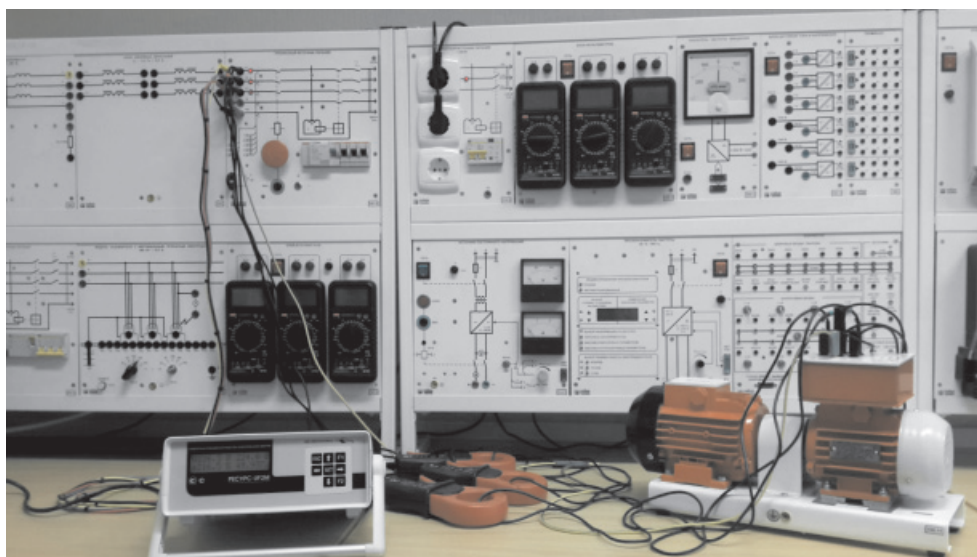


Рис. 1. Измерительный стенд с прибором «Ресурс-UF2М»

Входы напряжения и каждый вход тока гальванически изолированы между собой, что позволяет подключать прибор после-

довательно с другими устройствами (счетчиками электроэнергии, регистраторами и т.п.). Для измерения в схемах с двумя

трансформаторами тока применяется специальный режим, когда отсутствующий ток рассчитывается на основании измеряемых. Измерители могут быть использованы в качестве образцовых счетчиков электроэнергии при проверке (или поверке) счетчиков электроэнергии классов точности 0,5 и ме-

нее точных на месте эксплуатации. Устройства считывания подключаются к интерфейсу RS-232 измерителя.

В качестве схемы измерения была выбрана трехфазная четырехпроводная система, так как она соответствует схеме подключения анализатора «Ресурс-UF2М» (рис. 2).

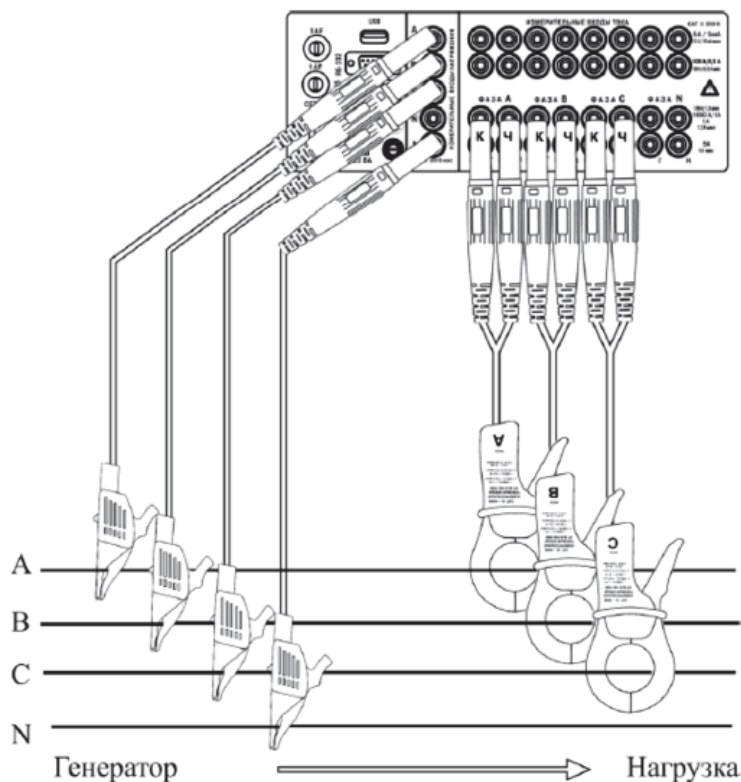


Рис. 2. Трехфазная четырехпроводная схема измерения напряжения (220/380 В) с использованием токоизмерительных клещей

Все полученные данные измерялись с интервалом 1 секунда и имеют очень большой объем в табличном эквиваленте. Для получения усредненных суточных графиков с минутным интервалом измерения воспользуемся методикой обработки и анализа результатов программного обеспечения «Ресурс-UF2Plus». Оно предназначено для чтения всех архивируемых значений параметров с измерителей ПКЭ типа «Ресурс», их отображения, сохранения и экспорта в Microsoft Excel. Также обеспечивает работу с файлами, записанными измерителями «Ресурс-UF2М» непосредственно на подключенный внешний USB-накопитель данных типа flash-диска.

В качестве электродвигателя использовался трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором марки АИР56А4УЗ, параметры которого приведены в таблице.

#### Технические данные асинхронного двигателя АИР56А4УЗ

Наименование параметра	Значение
Высота оси вращения вала, $h$	56 мм
Мощность, $P_H$	0,12 кВт
Синхронная скорость вращения, $n_1$	1500 об/мин
Номинальная скорость вращения, $n_H$	1350 об/мин
КПД, $\eta$	0,63
Коэффициент мощности, $\cos \varphi$	0,66
Номинальное напряжение, $U_H$	220/380 В
Номинальный ток, $I_H$	0,76/0,44 А
Соединение обмоток	$Y/\Delta$
Число пар полюсов, $2p$	2
Класс изоляции	B
Режим работы	S1

В качестве результатов измерений приведем данные об отклонениях фазных и межфазных напряжений, отклонениях частоты, активной и реактивной мощностях, коэффициента мощности, коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности, коэффициентах искажения синусоидальности фазных и межфазных напряжений, коэффициентах  $n$ -ых гармонических составляющих, фазовых углов между токами и напряжениями, кратковременной дозы фликера. Графи-

ки будем приводить только для параметров, имеющих значительные отклонения от норм ПКЭ.

1. Отклонение фазных и межфазных напряжений: значения отклонений по фазе А превышают номинально допустимое значение 5% и достигают 6,14%, что в 1,23 раза больше нормы; показания на фазах В и С не превышают номинально допустимое значение 5%; отклонения межфазных напряжений находятся в пределах нормы и не превышают 5% (рис. 3).

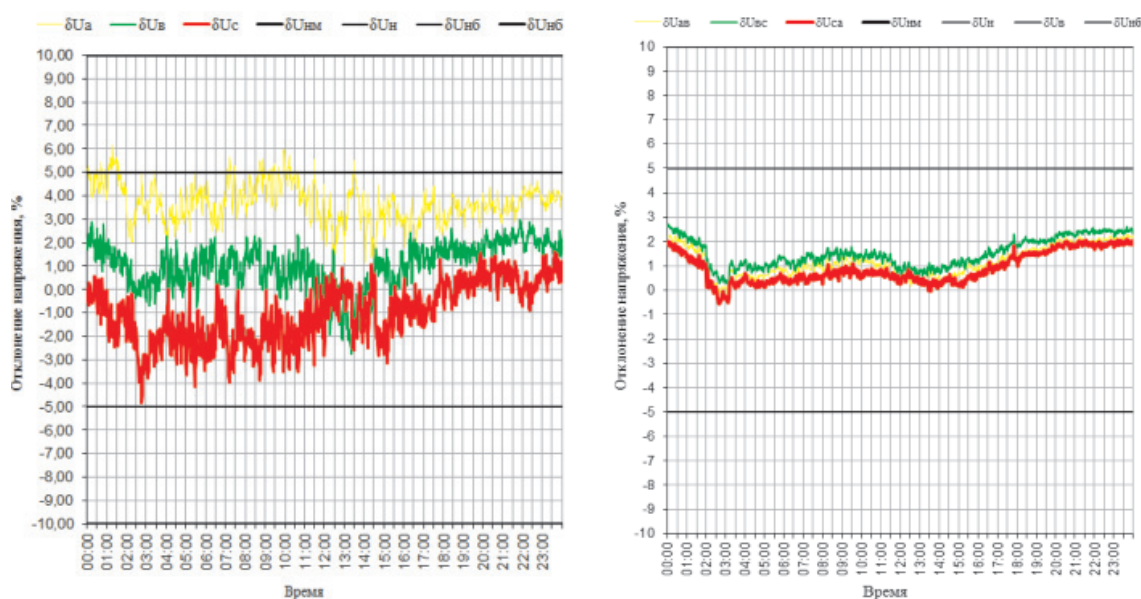


Рис. 3. Показатели отклонения фазных и межфазных напряжений

2. Отклонения частоты: отклонений частоты по номинальному и предельному допустимым значениям зарегистрировано не было; показатели находятся в пределах нормы и отклонения не превышают 0,2 Гц.

3. Значения активной и реактивной мощностей: в целом показания активной и реактивной мощностей соответствуют техническим параметрам двигателя и в среднем находятся в пределах 0,26 кВт и 0,056 кВАр соответственно (рис. 4).

4. Коэффициент мощности: показания коэффициента мощности в целом являются соответствующими требованиям и не опускаются ниже 0,2, что соответствует режиму работы двигателя на холостом ходу.

5. Коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательности: коэффициент несимметрии по обратной последовательности не превышает ни предельного, ни номинально допустимого значения, и его максимум составляет 0,68%, тогда как ко-

эффициент несимметрии по нулевой последовательности превышает предельно допустимое значение, которое составляет 4% на 1,86% и составляет 5,86% (рис. 5).

6. Коэффициент искажения синусоидальности: показания коэффициентов искажения синусоидальности фазных и межфазных напряжений не превышает номинально допустимого значения, которое равно 8%, и лишь в некоторые периоды времени искажения синусоидальности подбирается к 6%.

7. Коэффициенты  $n$ -х гармонических составляющих: показания коэффициентов  $n$ -х гармонических составляющих как фазного, так и межфазного напряжений за весь период измерений не превышали номинально допустимых значений для всего ряда гармоник трехфазной сети со 2 по 40.

8. Фазовые углы между током и напряжением: показания фазовых углов между токами и напряжениями примерно равны по всем фазам и колеблются от 75 до 80 градусов.



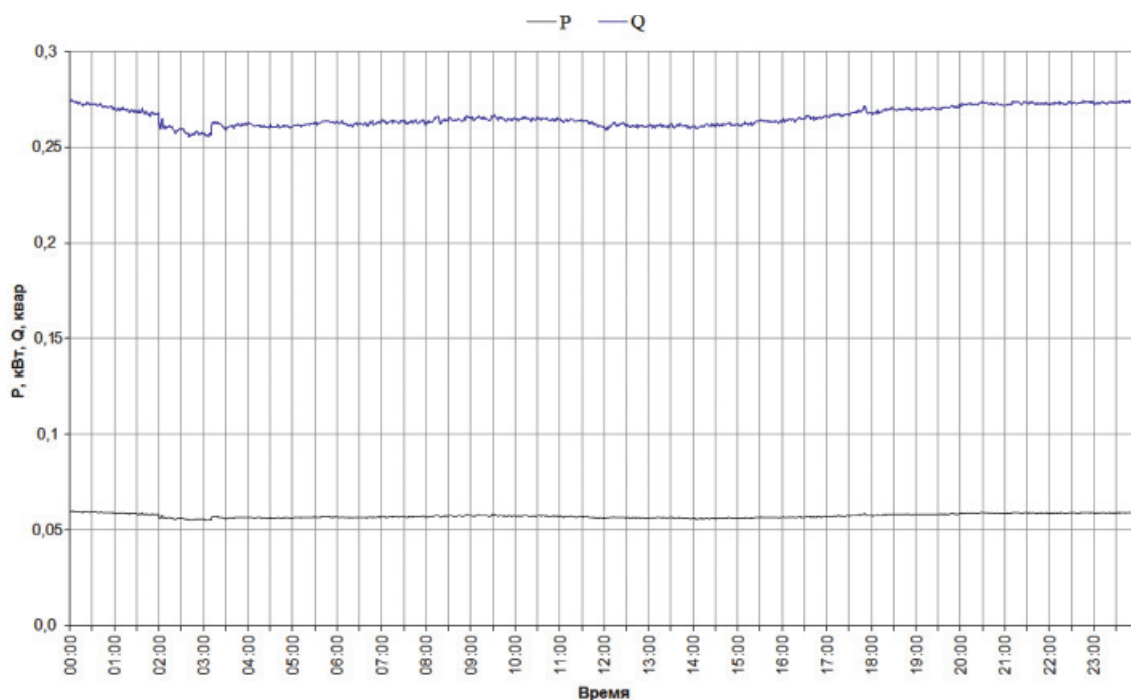


Рис. 4. Показатели активной и реактивной мощностей

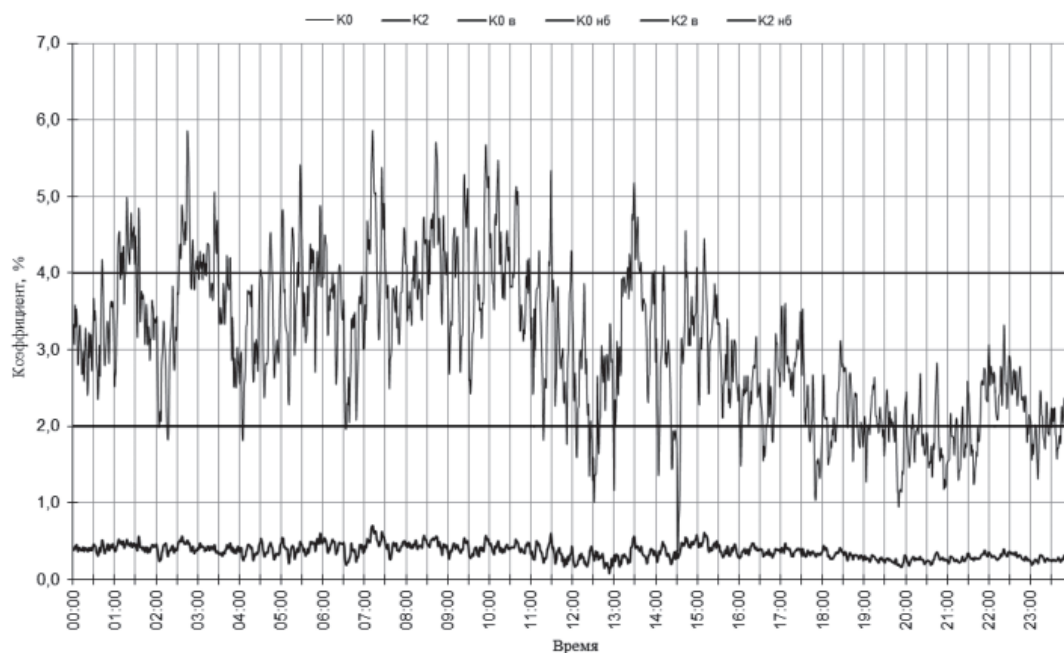


Рис. 5. Показатели коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности

9. Кратковременная доза фликера: показания кратковременной дозы фликера в целом колеблются возле значения 0,4 pst, что соответствует норме (не более 1 pst) и лишь в редкие интервалы времени происходит увеличение максимума до 1,6 pst (рис. 6).

В заключение подведем итоги по соответствию измеренных показателей качества электроэнергии требованиям ГОСТа. Соот-

ветствие качества электроэнергии выполняется: по отклонению частоты, коэффициенту искажения синусоидальности напряжения, по коэффициенту  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности; не выполняется: по установленному отклонению напряжения, по коэффициенту несимметрии напряжений по нулевой последовательности.

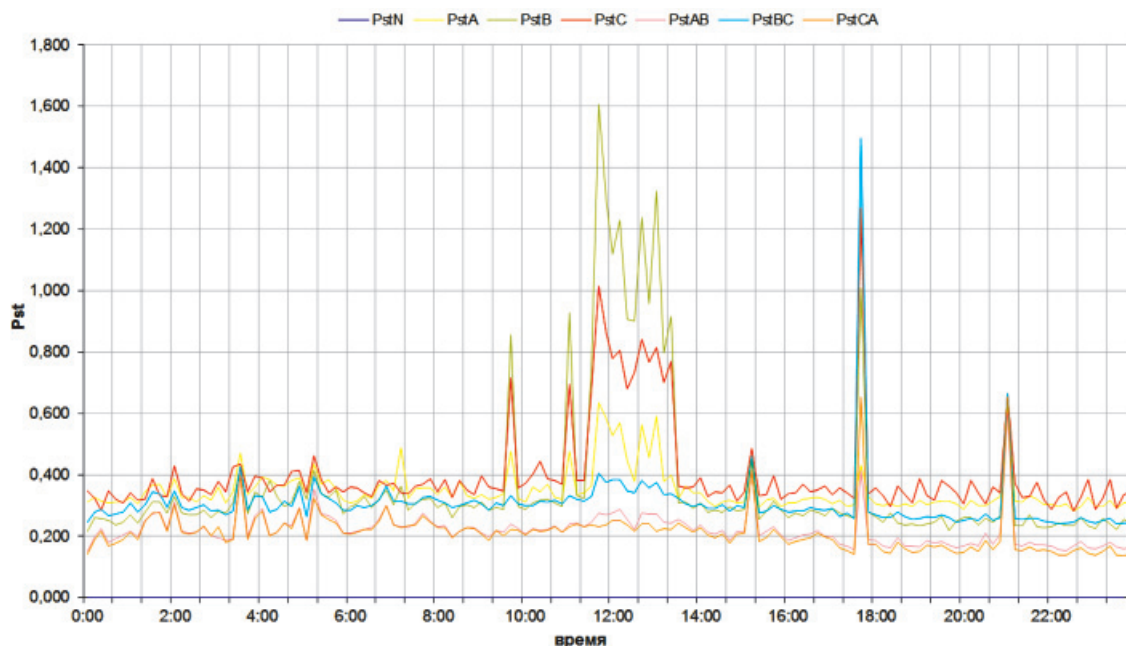


Рис. 6. Показатели кратковременной дозы фликера

Таким образом, можно отметить, что в целом при работе асинхронного двигателя от трёхфазной сети при прямом пуске качество электрической энергии соответствует требованиям ГОСТа. Исследования по измерению ПКЭ при работе асинхронного двигателя будут продолжены для случая работы от преобразователя частоты.

**Список литературы**

1. Semenov A.S. Development of monitoring system for measuring the quality of electrical energy on the mining industry. Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 1st International Academic Conference. Vol. 1, October 27–28, 2012, St. Louis, USA. 428 p. pp. 301–304.
2. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Карташев И.И., Тульский В.Н., Кузнецов Н.М., Семёнов А.С. Мониторинг показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения горных предприятий: монография. – М.: Изд-во Перо, 2013. – 142 с.
4. Кузнецов Н.М., Бебихов Ю.В., Самсонов А.В., Егоров А.Н., Семёнов А.С. Качество электрической энергии горных предприятий: монография. – М.: Издательский дом «Академии Естествознания», 2012. – 68 с.
5. Кузнецов Н.М., Семёнов А.С. Разработка системы мониторинга для измерения показателей качества электроэнергии на горных предприятиях // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4 (часть 2). – С. 295–299.
6. Кузнецов Н.М., Семёнов А.С., Бебихов Ю.В., Рыбников А.В. Результаты мониторинга показателей качества электрической энергии потребителей подземного рудника // Горный журнал. – 2014. – № 1. – С. 23–26.
7. Семёнов А.С. Разработка системы мониторинга показателей качества электроэнергии горных предприятий // Технические науки – от теории к практике. – 2012. – № 11. – С. 68–73.
8. Семёнов А.С., Кузнецов Н.М. Анализ результатов мониторинга показателей качества электрической энергии в подземном руднике // Измерительная техника. – 2014. – № 4. – С. 31–34.

**References**

1. Semenov A.S. Development of monitoring system for measuring the quality of electrical energy on the mining industry.

Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 1st International Academic Conference. Vol. 1, October 27–28, 2012, St. Louis, USA. 428 p. pp. 301–304.

2. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
3. Kartashev I.I., Tul'skii V.N., Kuznetsov N.M., Semenov A.S. Monitoring pokazatelei kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniia gornykh predpriatii: monografiia. M.: Izdatel'stvo Pero, 2013. 142 p.
4. Kuznetsov N.M., Bebikhov Iu.V., Samsonov A.V., Egorov A.N., Semenov A.S. Kachestvo elektricheskoi energii gornykh predpriatii: monografiia. M.: Izdatel'skii dom «Akademii Estestvoznaniia», 2012. 68 p.
5. Kuznetsov N.M., Semenov A.S. Razrabotka sistemy monitoringa dlia izmereniia pokazatelei kachestva elektroenergii na gornykh predpriatiiakh // Fundamental'nye issledovaniia. 2013. no. 4 (chast' 2). pp. 295-299.
6. Kuznetsov N.M., Semenov A.S., Bebikhov Iu.V., Rybnikov A.V. Rezul'taty monitoringa pokazatelei kachestva elektricheskoi energii potrebitelei podzemnogo rudnika // Gornyi zhurnal. 2014. no. 1. pp. 23–26.
7. Semenov A.S. Razrabotka sistemy monitoringa pokazatelei kachestva elektroenergii gornykh predpriatii // Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike. 2012. no. 11. pp. 68–73.
8. Semenov A.S., Kuznetsov N.M. Analiz rezul'tatov monitoringa pokazatelei kachestva elektricheskoi energii v podzemnom rudnike // Izmeritel'naia tekhnika. 2014. no. 4. pp. 31–34.

**Рецензенты:**

Петров В.Л., д.т.н., профессор, проректор по учебной работе МГГУ, зам. председателя Совета УМО вузов РФ по образованию в области горного дела, г. Москва;  
 Зырянов И.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой ГиНД, Политехнического института (филиала), ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», зам. директора по науке НИИ «Якутни-проалмаз» АК «АЛРОСА» (ОАО), г. Мирный.  
 Работа поступила в редакцию 23.07.2014