

**Беленький И. Я.
Острове́рхов В. В.
Тимиргалиев Р. А.**

Измерение полной мощности сети и ее составляющих в трехфазных электрических сетях с несимметричной и нелинейной нагрузкой.

Ключевые слова: полная мощность сети, реактивная мощность сети, неактивная мощность сети, IEEE 1459-2010.

Рассмотрен метод вычисления полной мощности трехфазных электрических сетей с несимметричной нелинейной нагрузкой, изложенный в стандарте IEEE 1459-2010. Проведено сравнение этого метода с классическим методом расчета полной мощности сети. Показаны недостатки классического метода в условиях несимметричной нелинейной нагрузки. Описан измерительный преобразователь ФЕ1888.2-АД, измеряющий полную мощность трехфазной сети и ее составляющие в соответствии со стандартом IEEE 1459-2010.

**Belenky I. Y.
Ostroverkhov V. V.
Timirgaliev R. A.**

Measurement of network apparent power and its components in three-phase electrical networks with unbalanced nonlinear load.

Key words: network apparent power, network reactive power, network nonactive power, IEEE 1459-2010.

IEEE 1459-2010 method network apparent power calculation in three-phase networks with unbalanced nonlinear loads is considered. IEEE 1459-2010 method and classical method network apparent power calculation where compared. Drawbacks of classical method network apparent power calculation in networks with unbalanced nonlinear loads are shown. Measuring transducer ФЕ1888.2-АД, that apply IEEE 1459-2010 method network apparent power and its components calculation, is described.

В настоящее время весьма актуальной становится задача достоверной оценки (измерения) параметров трехфазных электрических сетей при несимметрии напряжений и нелинейной нагрузки сети, приводящей к большим искажениям синусоидальности токов и напряжений, особенно в электрических сетях, в которых мощности источника и нагрузки соизмеримы, а длина и сопротивление кабельных сетей малы. В частности, к таким сетям относятся судовые электросети и сети автономных промышленных объектов. В этих условиях становится важным вопрос правильного измерения полной мощности трехфазной сети и ее активной и реактивной составляющей.

На сегодняшний день широко распространены два подхода к определению полной мощности сети.

Первый подход определяет полную мощность сети через алгебраическую сумму полных мощностей фаз:

$$S_A = \sum S_\phi = \sum U_\phi \cdot I_\phi, \text{ где} \quad (1)$$

U_ϕ, I_ϕ – действующие значения фазных напряжений и токов, соответственно.

Полную мощность, определенную таким способом называют арифметической полной мощностью сети.

Второй подход определяет полную мощность сети через геометрическую сумму активной и реактивной мощностей сети:

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ где} \quad (2)$$

P, Q – соответственно, активная и реактивная мощности сети.

Определенную таким способом полную мощность называют векторной полной мощностью сети.

Большинство приборов и преобразователей, измеряющих параметры трехфазных электрических сетей, определяют полную мощность четырехпроводной сети соотношением (1), а трехпроводной, вследствие невозможности измерения в трехпроводной сети действующих значений фазных напряжений – соотношением (2). Такой подход справедлив в условиях электрических сетей с линейной симметричной нагрузкой, когда:

$$S_A = S_V$$

Однако, в общем случае:

$$S_A \geq S_V$$

В частности, в условиях искажения синусоидальности напряжений и токов, равенство арифметической и векторной полной мощности нарушается вследствие появления третьей составляющей полной мощности сети – мощности искажений D – обусловленной взаимным влиянием гармонических составляющих токов и напряжений. В этом случае формула (2) принимает вид [1]:

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3)$$

Однако на практике применение метода расчета мощности искажений D к трехпроводной трехфазной сети не представляется возможным и расчет полной мощности по формуле (3) нигде не применяется, что приводит к искажениям результатов измерений полной мощности в условиях несинусоидальности.

Необходимо отметить, что искажения токов и напряжений в системах электроснабжения в связи с широким применением нелинейных нагрузок (регулируемые приводы, дуговые и индукционные печи, вентильные преобразователи и др.) стали уже распространённым явлением, поэтому вопрос корректного измерения параметров сети в условиях несинусоидальности и несимметрии имеет большое практическое значение, особенно при определении потерь электроэнергии. Основным же недостатком традиционных методов определения полной мощности и арифметической, и векторной является то, что в условиях нелинейной и несимметричной нагрузки сети они не отражают главного свойства полной мощности: потери мощности в сети пропорциональны квадрату полной мощности [1, 2]. Это привело к появлению альтернативных методов расчета полной мощности сети в условиях несимметрии [3, 4]. В связи с этим необходимым представляется выработка единого подхода к измерению полной мощности сети.

Наиболее обоснованным представляется подход, изложенный в стандарте IEEE 1459-2010 [5], теоретические основы которого подробно изложены в работе [2]. Стандарт предлагает вычисление полной мощности трёхфазной сети, называемой в стандарте эффективной полной мощностью S_e , выполнять по формуле:

$$S_e = 3 \cdot U_e \cdot I_e, \text{ где}$$

U_e – эффективное напряжение трехфазной сети;

I_e – эффективный ток трехфазной сети.

Эффективное напряжение и эффективный ток для трехпроводной сети определяются по формулам:

$$U_e = \sqrt{\frac{U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{9}}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2}{3}}, \text{ где}$$

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – действующие значения межфазного напряжения, измеренные с учетом всех гармонических составляющих;

I_A, I_B, I_C – действующие значения фазных токов, измеренные с учетом всех гармонических составляющих.

Эффективное напряжение и эффективный ток для четырёхпроводной сети определяются по формулам:

$$U_e = \sqrt{\frac{3 \cdot (U_A^2 + U_B^2 + U_C^2) + U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{18}}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2}{3}}, \text{ где}$$

U_A, U_B, U_C – действующие значения фазного напряжения, измеренные с учетом всех гармонических составляющих;

I_N – действующее значение тока нейтрали.

Стандарт IEEE 1459-2010 вводит также дополнительные параметры мощности:

1. Неактивная мощность сети:

$$N_e = \sqrt{S_e^2 - P^2}$$

Этот параметр характеризует влияние не только реактивной мощности, но и мощности искажений при несинусоидальных режимах работы сети. При отсутствии высших гармоник неактивная мощность равна модулю реактивной мощности.

2. Полная мощность искажений и гармоник сети:

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2}, \text{ где}$$

S_{e1} – эффективная мощность сети, определяемая по основной частоте.

3. Полная мощность гармоник сети:

$$S_{eH} = 3 \cdot U_{eH} \cdot I_{eH},$$

$$U_{eH} = \sqrt{U_e^2 - U_{e1}^2},$$

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2}, \text{ где}$$

U_{e1} и I_{e1} – эффективные напряжение и ток, определяемые по основной частоте.

4. Коэффициент влияния гармоник:

$$K_N = \frac{S_{eN}}{S_{e1}}$$

С целью исследования различия результатов вычисления полной мощности сети, её неактивной (реактивной) составляющей классическим методом и методом, изложенным в стандарте IEEE 1459-2010, было проведено математическое моделирование.

Отклонения результатов измерений различными методами определялись по формулам:

- для полной мощности:

$$\delta S_e = \frac{S_e - S}{S_e} \cdot 100\%, \text{ где}$$

S – полная мощность сети вычисляемая по формуле (1) для четырехпроводной и по формуле (2) для трехпроводной сети.

- для неактивной мощности:

$$\delta N_e = \frac{N_e - N}{N_e} \cdot 100\% , \text{ где}$$

Q – реактивная мощность сети вычисляемая для трехпроводной сети по формуле:

$$Q = Q_I + Q_{II} = \sum_{i=1}^n U_{ABi} \cdot I_{Ai} \cdot \sin(\varphi(U_{ABi}, I_{Ai})) + \sum_{i=1}^n U_{CBi} \cdot I_{Ci} \cdot \sin(\varphi(U_{CBi}, I_{Ci})),$$

для четырехпроводной сети по формуле:

$$Q = \sum Q_{\phi} = \sum \left(\sum_{i=1}^n U_{\phi i} \cdot I_{\phi i} \cdot \sin(\varphi_{\phi i}) \right), \text{ где}$$

i – номер гармоники фазного тока и напряжения;

n – количество регистрируемых гармоник.

Была смоделирована трехфазная сеть в двух режимах:

1. Симметричная сеть с нелинейной нагрузкой.

Условия:

- гармоники тока: 2, 4, 5, 7;
- фазовый угол между гармониками напряжения и токов равен $\varphi=45^\circ$.

Результаты моделирования приведены на рисунке 1 и 2.

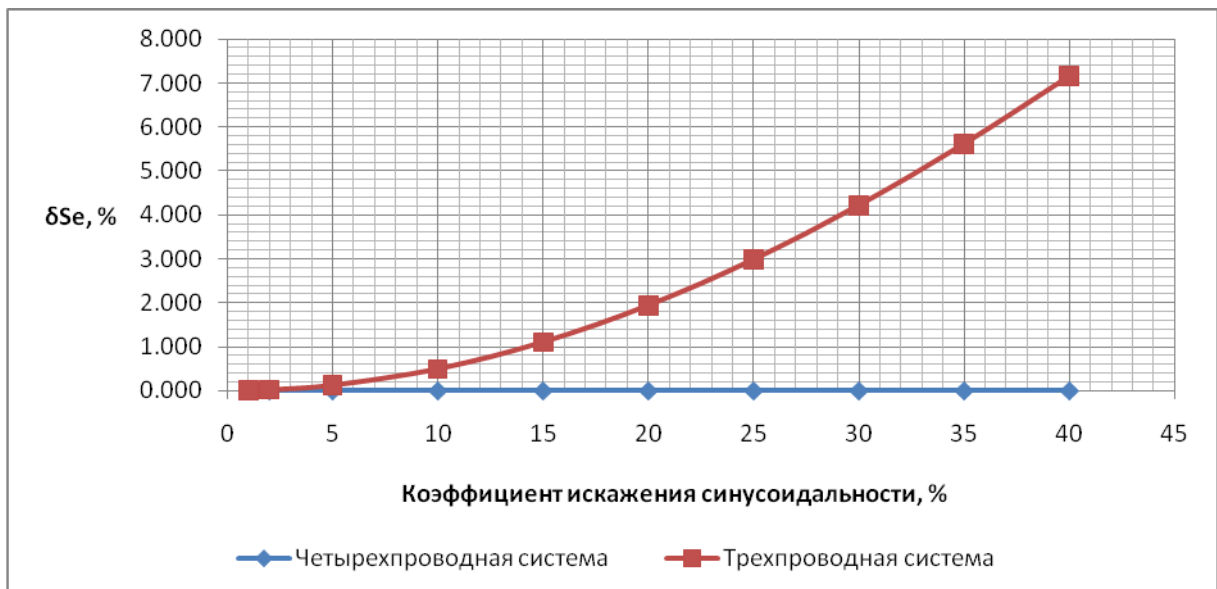


Рисунок 1

Из рисунка 1 видно, что в симметричной сети в условиях несинусоидальности токов, ошибка вычисления полной мощности трехпроводной сети растет с увеличением коэффициента искажения синусоидальности и при заданных условиях превышает 0,5% при коэффициенте искажения синусоидальности токов равном 10%. Дальнейшее

исследование показало, что увеличение числа гармоник тока приводит к росту ошибки, что выражается в увеличении крутизны графика. В тоже время рисунок 1 показывает, что в условиях симметрии напряжений и токов, вычисление полной мощности методом, изложенным в стандарте IEEE 1459 эквивалентно вычислению арифметической полной мощности для четырехпроводной сети.

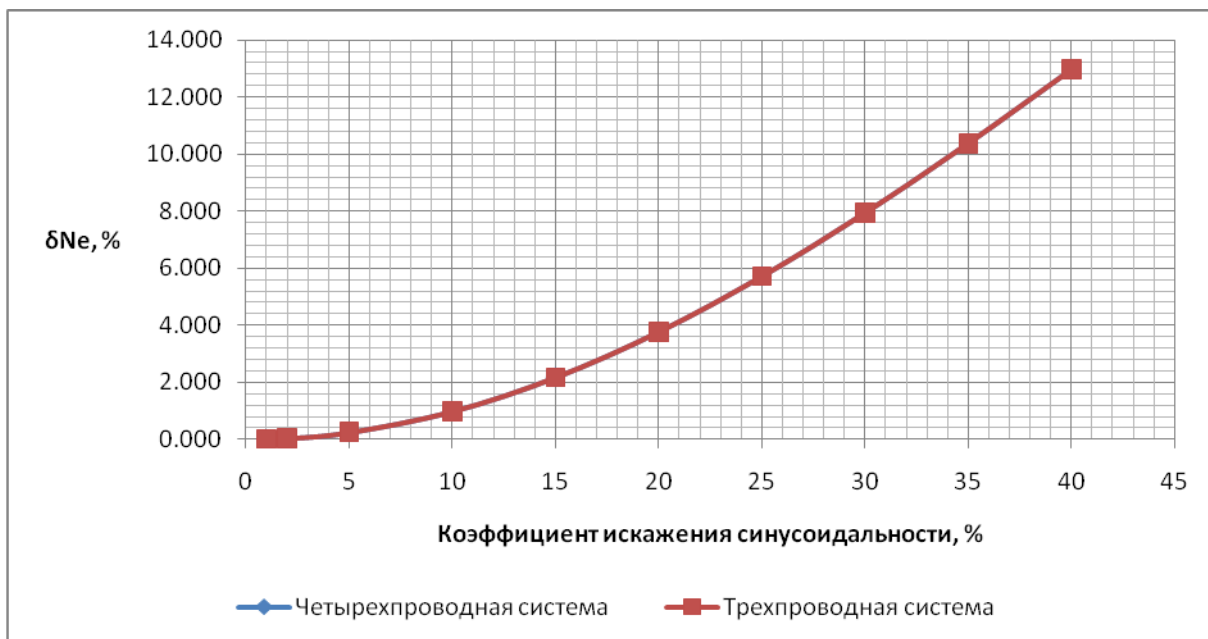


Рисунок 2

График, представленный на рисунке 2, показывает увеличение разности между неактивной и реактивной мощностью при увеличении коэффициента искажения синусоидальности, независимо от схемы сети, что обусловлено ростом мощности искажения D .

2. Сеть с несимметричной линейной нагрузкой.

Условия:

- несимметрия тока по обратной последовательности;
- угол между напряжениями и токами фазы А и С равен $\phi=0^\circ$;
- значение тока фазы В определяется из условия равенства тока нейтрали 0.

Результаты моделирования приведены на рисунке 3 и 4.

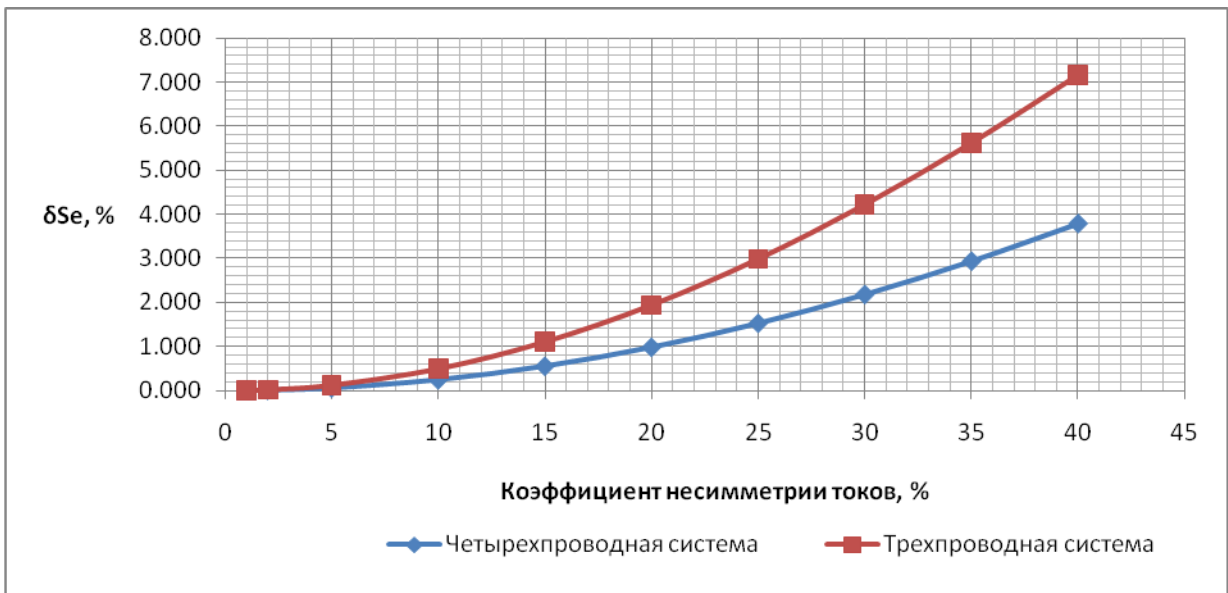


Рисунок 3

Из графиков, представленных на рисунке 3, видно, что с ростом несимметрии токов увеличивается отклонение полной мощности сети не только для трехпроводного включения, но и для четырехпроводного.

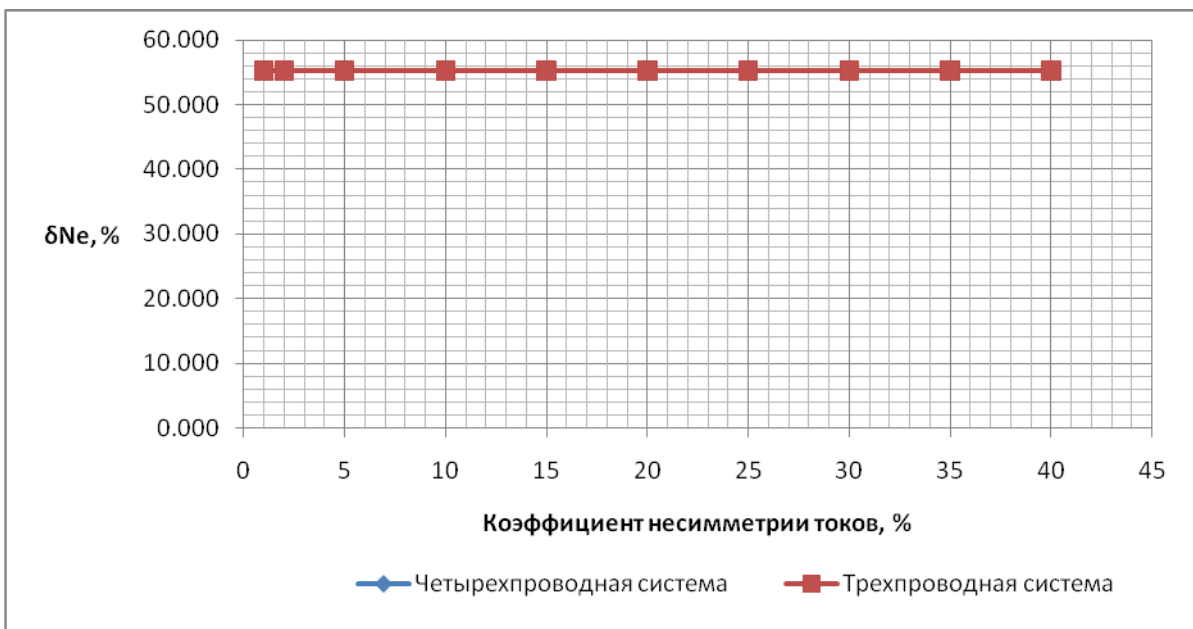


Рисунок 4

В заданных условиях, реактивная и неактивная мощности сети непрерывно увеличиваются с увеличением обратного коэффициента несимметрии токов. При этом, как показывает график, представленный на рисунке 4, неактивная мощность сети, не совершающая полезной работы, в заданных условиях более чем в два раза превышает реактивную мощность сети, вычисленную классическим способом. Это соотношение сохраняется независимо ни от схемы сети, ни от величины несимметрии тока.

Таким образом, в реальных условиях, когда к фазам сети подключены и несимметричные, и нелинейные нагрузки, классические методы расчета полной мощности сети будут

приводить к значительным ошибкам, и, следовательно, применяться в таких условиях не должны.

Методы расчета параметров мощности сети, изложенные в стандарте IEEE 1459-2010, реализованы в многофункциональных измерительных преобразователях ФЕ1888.2-АД, разработанных ОАО «Приборостроительный завод «Вибратор», город Санкт-Петербург.

Преобразователи ФЕ1888.2-АД предназначены для измерения параметров и показателей качества электрической энергии (ПКЭ) трёхпроводных и четырёхпроводных электрических сетей переменного трёхфазного тока частотой 50 Гц при работе в сетях передачи данных автоматизированных систем измерения, контроля и управления промышленных предприятий, в том числе АЭС, а также на морских судах и плавучих энергетических установках.

Для определения параметров и показателей качества трёхфазной системы выполняется математическая обработка массивов мгновенных значений входных сигналов напряжения и тока, с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). На основании результатов БПФ вычисляются гармоники токов и напряжений в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.7, а также параметры сети и показатели качества в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.30.

Преобразователь обеспечивает измерение фазных и межфазных напряжений, фазных токов, активной, реактивной и полной мощностей, гармоник, коэффициентов гармонических составляющих, параметров мощности в соответствии со стандартом IEEE1459-2010, параметров провалов, прерываний напряжения и перенапряжения. Обеспечивается объединение результатов измерения по 3-х секундному, 10-минутному и 2-часовому измерительному интервалу в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.30. Прибор хранит во внутренней памяти архив измеренных параметров сети и ПКЭ на всех интервалах объединения – максимальное время записи до 40 тысяч часов.

Преобразователь обеспечивает одновременную выдачу цифровых данных параметров и ПКЭ как по интерфейсу Ethernet (протокол обмена MODBUS-TCP), так и по RS-485 (протокол обмена MODBUS-RTU).

Конструктивно преобразователь выполнен в виде съёмного измерительного блока в герметичном металлическом корпусе и стационарного коммутационного блока двух типов:

- типа А с герметизирующими кабельными вводами и внутренними клеммами (габариты преобразователя: длина – 140 мм, ширина – 158 мм, высота – 123 мм);
- типа Б с наружными клеммами с винтовыми зажимами (габариты преобразователя: длина – 140 мм, ширина – 100 мм, высота – 123 мм).

Внешний вид преобразователя приведен на рисунке 5.



Рисунок 5

Конструкция позволяет проведение обслуживания и поверки измерительного блока без демонтажа внешних соединений с объектом контроля, подключённых к коммутационному блоку преобразователя.

В комплекте с преобразователем поставляется программа «Electro2s», обеспечивающая конфигурирование и настройку преобразователя, выполнение калибровки и представление результатов измерений параметров и ПКЭ трёхфазной системы. Внешний вид одного из окон программы приведен на рисунке 6.

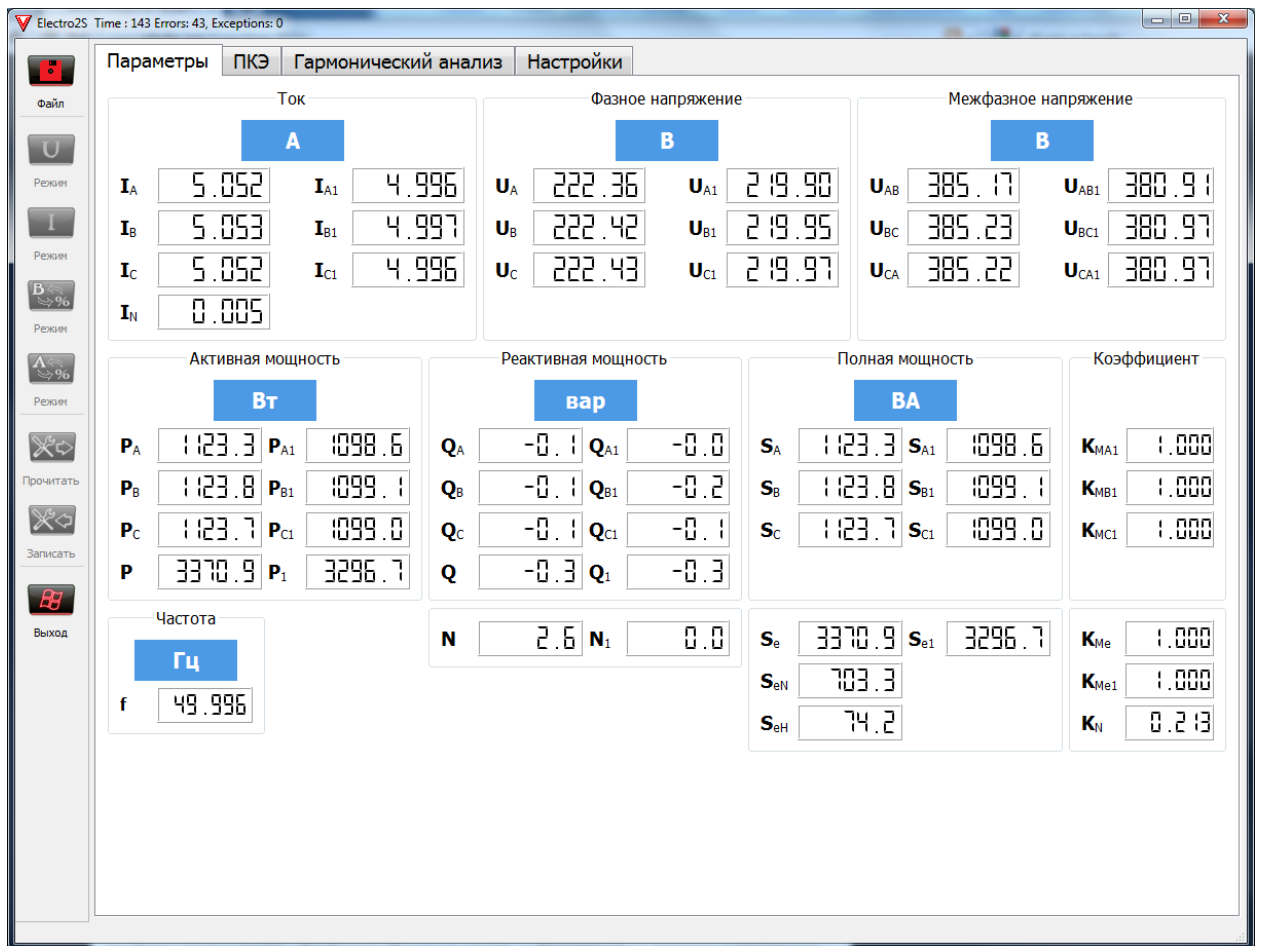


Рисунок 6

Список литературы:

1. Math H. J. Bollen, Irene Yu-Hua Gu. Signal Processing of Power Quality Disturbances. Wiley-Interscience, 2006.
2. Alexander E. Emanuel. Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow. Wiley, 2010.
3. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. М: Энергоиздат, 1985.
4. Давыдов А. С., Попенака А. Н., Аникин В. В. Особенности измерения полной и реактивной мощности и энергии в электрических сетях. Український метрологічний журнал. -2009. -№2
5. IEEE Std 1459-2010. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.

Авторы:

1. Беленький Игорь Яковлевич, ведущий инженер.
e-mail: beligyak@mail.ru
2. Островерхов Вадим Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, научный руководитель.
e-mail: ovv@vibrator.spb.ru
3. Тимиргалиев Роберт Асуатович, инженер
e-mail: rt85@yandex.ru