

УДК 621.3.016.313: 621.3.045.53

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИИ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ НАПРЯЖЕНИЙ

Абдиева З.Э., Сариев Б.И., Куржумбаева Р.Б., Касмамбетов Х.Т.

Кыргызский государственный технический университет КГТУ им. И. Раззакова (Бишкек, Кыргызстан)

Несимметрично загруженные фазы в электрических сетях приводят к росту потерь электроэнергии, следствием чего является снижение ее качества. Исследования проведены в реально действующих сетях и на экспериментальной установке, созданной в лаборатории с использованием электронного конструктора «Arduino». «Arduino» позволяет компьютеру моделировать электрическую нагрузку. Устройства с помощью электронного конструктора «Arduino» получают информацию датчиков и управляют исполнительными устройствами. Платформа с программным кодом построена на простой плате с современной средой для написания программного обеспечения. Это современное устройство использовано в разработанной экспериментальной установке на кафедре «Электроснабжение» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова для исследования физических процессов в электрических сетях. Исследования проводились на экспериментальной установке при различных режимах: симметричном режиме; несимметричном режиме при нагрузке на две фазы; несимметричном режиме при нагрузке на одну фазу (крайний режим несимметрии). Исследования свидетельствуют о влиянии несимметрии на рост потерь электроэнергии в электрических сетях.

**Ключевые слова:** несимметрия, потери электроэнергии в электрических сетях, экспериментальная установка, электронный датчик температуры, электронный конструктор «Arduino», сечение нулевого провода.

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225

### Введение.

Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети.

Показателями качества электроэнергии, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$  [1].

Для указанных показателей качества электроэнергии установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  и несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$  в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности  $K_{2U}$  и несимметрии напряжений по нулевой последовательности  $K_{0U}$  в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны пре-

вышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Рост потребления установленной мощности электроприемниками с несимметричной нагрузкой в быту и технологическое развитие промышленности приводят к снижению качества электрической энергии в системах электроснабжения, тем самым приводят к снижению эффективности работы систем электроснабжения и потребителей, подключенных к ним [1].

Снижение потерь электроэнергии до уровня, устанавливаемого регулирующим органом, можно добиться за счет повышения качества электрической энергии в сетях общего назначения.

Несимметрия напряжения приводит к увеличению потерь мощности и электроэнергии во всех элементах электрической сети, что обусловлено протеканием токов обратной и нулевой последовательностей. Например, при  $K_{2u} = 2\%$  добавочные потери в обмотках асинхронных двигателей  $\Delta P_{доб}$  составляют 8% основных потерь прямой последовательности  $\Delta P_{осн}$ , а при  $K_{2u} = 5\%$   $\Delta P_{доб}$  равно половине  $\Delta P_{осн}$  [1].

Таким образом, для оценки эффективности передачи и распределения электроэнергии при ухудшенном качестве электроэнер-

гии необходимо учитывать и ее дополнительные потери.

При оценке соответствия электрической энергии нормам качества электроэнергии, относящимся к несимметрии напряжений в трехфазных системах и установленное в ГОСТ Р 54149-2010, должны быть проведены измерения по ГОСТ Р 51317.4.30, подраздел 5.7, класс А.

Согласно указанного стандарта при измерении трехфазного переменного напряжения, за исключением требований к значениям коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательностям, которые должны быть в пределах от 1%  $U_1$  до 5%  $U_1$ , инструментальная составляющая неопределенности измерений коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям не должна превышать  $\pm 0,15\%$ . Например, показания средства измерения, подключенного к трехфазной системе напряжений с коэффициентом несимметрии по обратной последовательности 1,0%, должны быть в пределах от 0,85% до 1,15% (рис. 1) [2].



Рис. 1. Пример неопределенности измерений несимметрии напряжений

Конфигурация электрических сетей 0,4 кВ сложна и сильно разветвлена из-за множества ответвлений. Определение потерь по участкам требует весьма значительных вычислений. На практике эти сети заменяются обобщенными параметрами, так как учесть все влияющие факторы практически невозможно. Это облегчает инженерные расчеты и позволяет оценить уровень технических потерь с наименьшей погрешностью. Основной задачей экспериментальных исследований является определение этих параметров.

**Методы исследования.**

Нами были проведены исследования в реальных сетях на отходящих фидерах двух

подстанций 10/0,4 кВ, расположенных в сельской местности и питающих коммунально-бытовых потребителей (Аламединский РЭС, Воронцовский участок ОАО «Северэлектро»). Также исследования были проведены на установке в лабораторных условиях с помощью электронного конструктора «Arduino». Замеры выполнялись при существующем положении в сети в течение недели. При измерениях использовались лабораторные токоизмерители и вольтметры, а также счетчики.

**Результаты исследования.**

В качестве контролируемых показателей были приняты:

- пофазное почасовое измерение токов, напряжений в начале и в конце линий (рис. 5);
- пофазное и суммарное потребление активной энергии потребителями, подключенными к исследуемой отходящей от трансформаторной подстанции воздушной линии, а также суммарный отпуск активной энергии с шин подстанции 10/0,4 кВ;
- коэффициент увеличения потерь мощности вследствие неравномерности нагрузки фаз.

На рис. 2 представлена зависимость токов и падений напряжения по фазам во времени в течении суток, а на рис. 3 – изменение коэффициента несимметрии во времени, рассчитанного по следующему выражению:

$$K_H = \frac{I_o}{I_{cp}}, \tag{1}$$

где  $I_{cp} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$ ;

$$I_o = (I_a - 0,5(I_b + I_c) + \frac{\sqrt{3}}{2}(I_b - I_c))$$

Потери мощности в симметричном и несимметричном режимах определены по выражениям:

$$\Delta P_{нес} = (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + (3I_0)^2) \cdot R ; \tag{2}$$

$$\Delta P_c = \frac{1}{3} I_{cp}^2 \cdot R .$$

Из выражений (1) и (2) получим

$$\frac{\Delta P_{нес}}{\Delta P_c} = 1 + K_H^2 (2 + 3 \frac{R_o}{R_{cp}}) . \tag{3}$$

Несимметричная нагрузка вызывает дополнительные потери мощности, которые можно связать с коэффициентом несимметрии, определяемым по выражению (3). Тео-

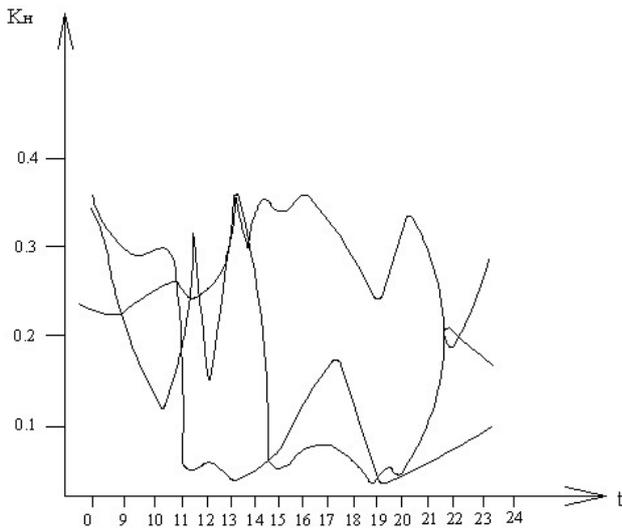


Рис. 2. Зависимость токов и падений напряжения по фазам во времени в течении суток

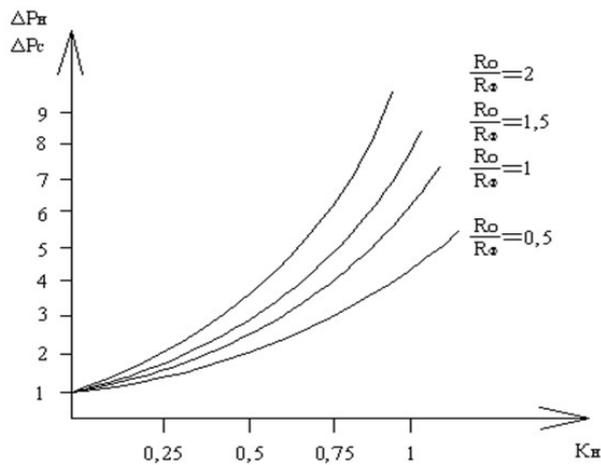


Рис. 3. Изменение коэффициента несимметрии во времени, рассчитанного по выражению (1)

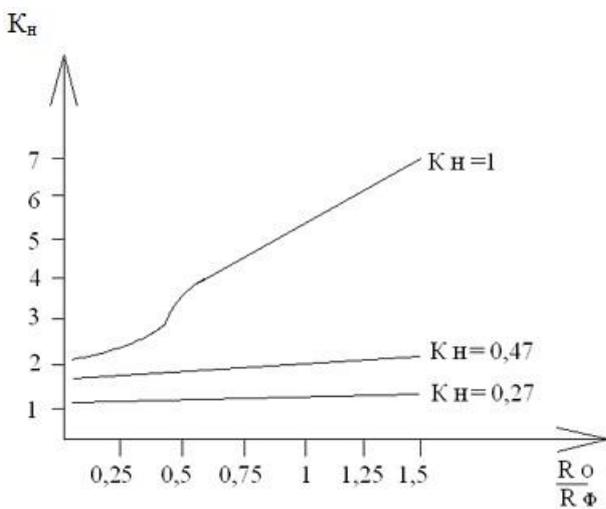


Рис. 4. Изменение  $K_H$  в зависимости от нагрузки

ретически он может изменяться от 0 до 1. Заметим, что  $K_H$  изменяется с изменением нагрузки (рис. 4). Поэтому необходимо связать его с токовым суточным графиком и определить типовой коэффициент неравномерности.

Определены относительные технических потери по фидерам и в целом по трансформаторной подстанции за исследуемый период как разница показаний головного счетчика и суммарные показания счетчиков всех абонентов по подстанции. Разница составила от 18,6% до 40,3%.

Разница, рассчитанная по выражению

$$W = K_{H/M} \cdot \Delta U_{\max} \% \cdot \tau \quad (4)$$

без учета и с учетом коэффициента неравномерности токов в фазах, показала отличие в 1,8 раза.

Сравнение расчетных относительных потерь электроэнергии с экспериментальными данными показали, что без учета коэффициента несимметрии погрешность составляет до 51%, а с учетом - до 6%. Это приемлемо, если учитывать погрешности счетчиков.

Кроме анализа дополнительных потерь из-за несимметрии также было рассмотрено влияние сопротивления нулевого провода на снижение расхода энергии. Поскольку при симметричной нагрузке фаз ( $I_A = I_B = I_C$ ), то  $K_H = 0$ . При несимметричной нагрузке фаз ( $I_A \neq I_B \neq I_C$ ) и  $0 < K_H < 1$ . В случае включения всей нагрузки на одну фазу (предельный случай несимметрии)  $K_H = 1$ .

Исследуем, как влияет сечение нулевого провода ВЛ 0,4 кВ на величину потерь энергии в ней. Для этого воспользуемся выражением (3). Поскольку потери энергии в ВЛ 0,4 кВ пропорциональны отношению  $\frac{R_0}{R_\phi}$ , то увеличение или уменьшение его значения равносильно увеличению или уменьшению потерь энергии в линии.

На рис. 4 приведено семейство характеристик  $\frac{\Delta P_{\text{нес}}}{P_c}$  от  $\frac{R_0}{R_\phi}$ , где видно, что одним из целесообразных мероприятий по экономии электроэнергии в сельских сетях 0,4 кВ необходимо признать увеличение проводимости нулевых проводов до величины, равной или даже большей, чем у фазных прово-

дов, что не противоречит требованиям ПУЭ.

Результаты замеров токов и напряжений ТП 316 и ТП 1079 представлены на рис. 5.

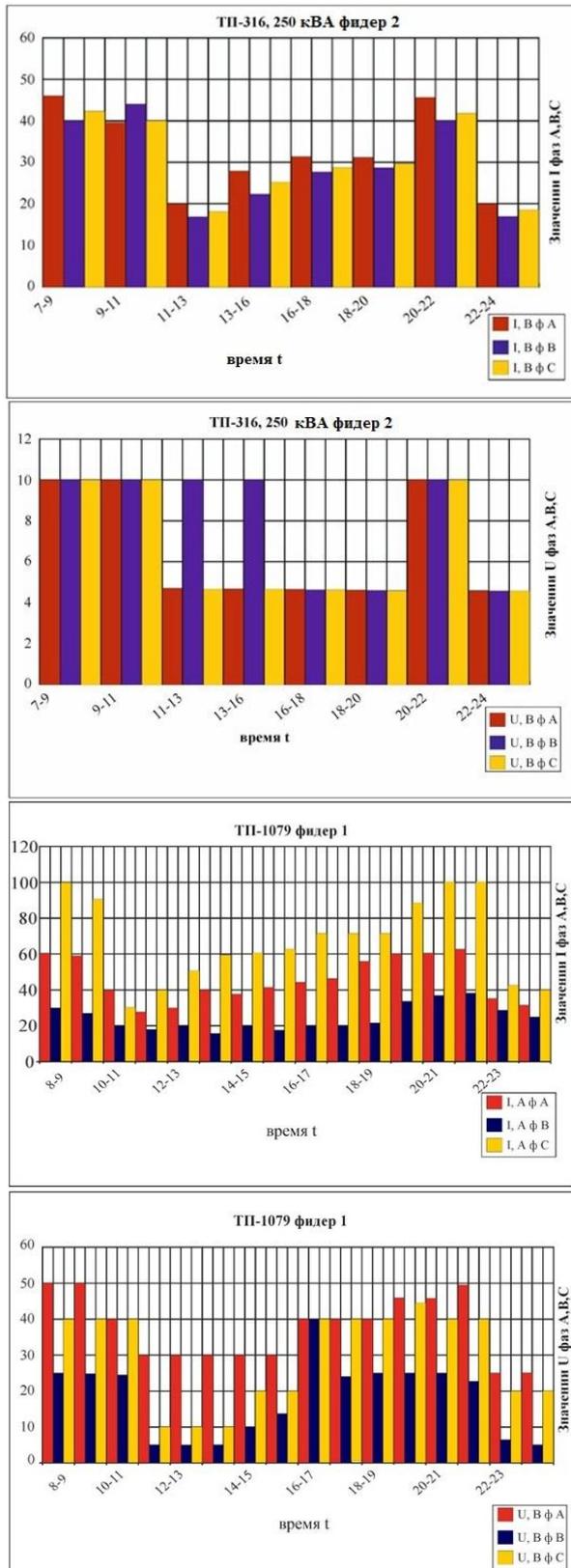


Рис. 5. Результаты замеров токов и напряжений ТП 316 и ТП 1079

Исследование влияния несимметрии на потери электрической энергии проводилось также на экспериментальной установке (рис. 6) в лабораторных условиях, с применением электронного конструктора «Arduino».

«Arduino» - это электронный конструктор и удобная платформа быстрой разработки электронных устройств. Платформа пользуется популярностью во всем мире благодаря удобству и простоте языка программирования, а также открытой архитектуре и программному коду. Устройство программируется через USB без использования программаторов [9].

Язык программирования устройств «Arduino» основан на C/C++. Он прост в освоении и на данный момент «Arduino» - самый удобный способ программирования устройств на микроконтроллерах.

Разбиение на сегменты кода функциями позволяет создавать части кода, которые выполняют определенные задания. После выполнения происходит возврат в место, откуда была вызвана функция. Причиной создания функции является необходимость выполнять одинаковое действие несколько раз.

Для программистов, работающих с BASIC, функции в «Arduino» позволяют использовать подпрограммы (GOSUB в BASIC)» [10].

Выпускаются различные модели «Arduino», которые предназначены для решения множества поставленных задач.

На рис. 6 показана экспериментальная установка для исследования влияния показателей качества электроэнергии на элементы электрической сети.

На рис. 7 приведены результаты исследования зависимости температуры нагрева элементов электрической сети от влияния несимметрии при разных режимах загрузки фаз, находящихся в физических моделях (в виде термостатов) на экспериментальной установке (рис.6). На рис. 8 показаны зависимости температуры нагрева элемента в течении суток.

### Заключение.

На основании проведенного экспериментального исследования влияния несимметрии на потери электроэнергии в электрических сетях 0,4 кВ, расчета и анализа результатов можно сделать следующие выводы:



Рис. 6. Экспериментальная установка для исследования влияния показателей качества электроэнергии на элементы электрической сети

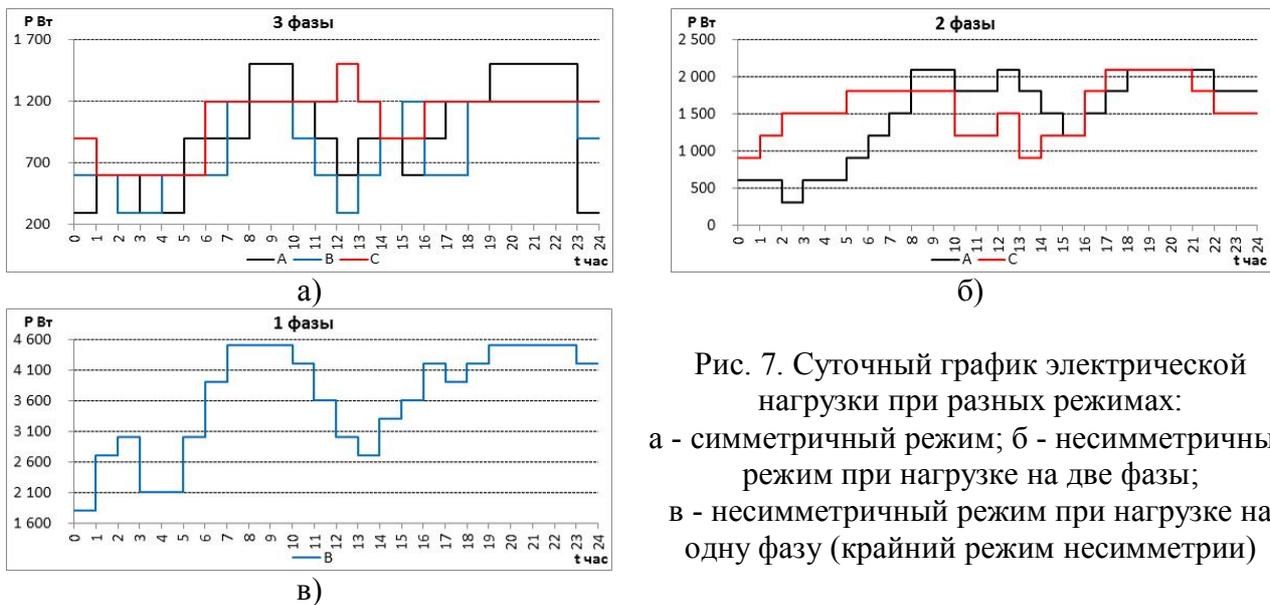


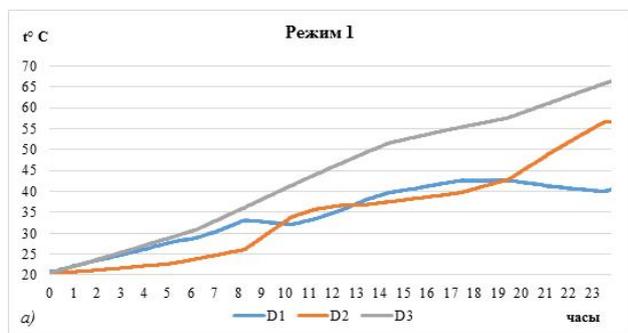
Рис. 7. Суточный график электрической нагрузки при разных режимах:  
а - симметричный режим; б - несимметричный режим при нагрузке на две фазы;  
в - несимметричный режим при нагрузке на одну фазу (крайний режим несимметрии)

1. В сетях 0,4 кВ с коммунально-бытовыми потребителями коэффициент неравномерности фаз изменяется от 0 до 0,47, что увеличивает потери электроэнергии до 2,1 раза, а в предельном случае, когда  $K_{нес} = 1$ , до 6 раз.

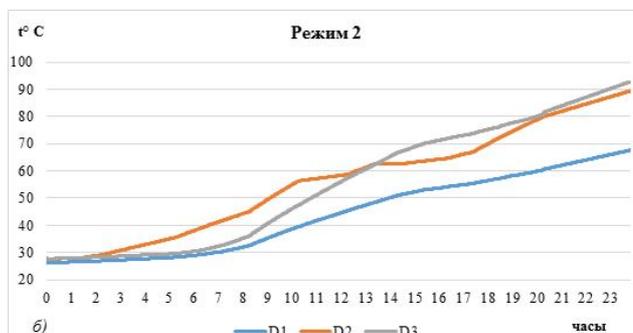
2. Необходимо определить экспериментально по сезонам года коэффициент несимметрии и типовой суточный график для характерных потребителей.

3. Одной из мер по снижению потерь электроэнергии и повышению ее качества в электрических сетях 0,4 кВ следует признать увеличение сечения нулевого провода до величины, равной или даже большей, чем сечение фазного провода.

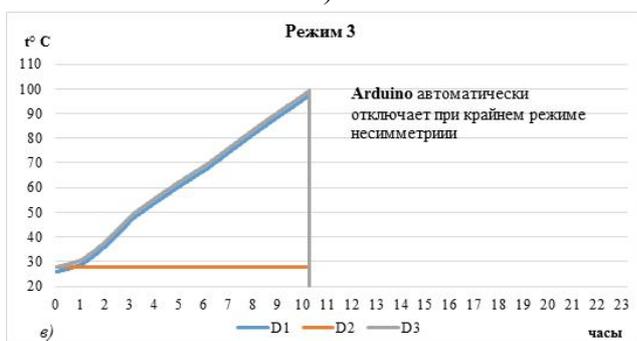
4. Исследования свидетельствуют о влиянии несимметрии на рост потерь электроэнергии в электрических сетях.



а)



б)



в)

Рис. 8. Зависимость температуры нагрева элемента в течении суток:  
а) симметричный режим; б) несимметричный режим при нагрузке на две фазы;  
в) несимметричный режим при нагрузке на одну фазу (крайний режим несимметрии)

### Список литературы

1. ГОСТ Р 54149-2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

2. ГОСТ Р 51317.4.30 (МЭК 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.

3. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Ю.С. Железко, В.Э. Воротницкий, В.Н. Казанцев; под ред. В.Н. Казанцева. - М.: Энергоатомиздат, 1983.

4. Герасименко, А.А. Электроэнергетические системы и сети. Расчёты параметров и режимов работы электрических сетей. Ч. 1, Ч. 2 / А.А. Герасименко, Т.М. Чупак. - Красноярск: 2004. - 222 с., 172 с.

5. Веников, В.А. Электрические системы. Электрические сети / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков; под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. - М.: Высш. шк., 1998. - 512 с.

6. Лыкин, А.В. Электрические системы и сети / А. В. Лыкин. - Новосибирск: НГТУ, 2002. - 246 с.

8. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 592 с.

8. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. - Ростов на/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. - 718 с.

9. Материалы по программированию Arduino: официальный сайт проекта Ардуино [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://arduino.cc/>. - Дата обращения: 20.04.2018.

10. Что такое Arduino? [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://arduino-diy.com/arduino-chto-eto-takoye>. - Дата обращения: 20.04.2018.

### Сведения об авторах

Абдиева Зарина Эдилбековна - старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, [konferenza\\_60let@mail.ru](mailto:konferenza_60let@mail.ru).

Сариев Бактыбек Имангазиевич - старший преподаватель кафедры «Электроснабжение» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, [baktybeks@mail.ru](mailto:baktybeks@mail.ru).

Куржумбаева Роза Бейшенбековна - кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, [kurzhumbaeva@mail.ru](mailto:kurzhumbaeva@mail.ru).

Касмамбетов Хусейн Талантбекович - старший преподаватель кафедры «Электро-снабжение» Кыргызского государственного

технического университета им. И. Раззакова, [kusein@mail.ru](mailto:kusein@mail.ru).

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE ASYMMETRY OF A THREE-PHASE STRESS SYSTEM

Abdieva Z.E., Sariev B.I., Kurzhumbaeva R.B., Kasmambetov K.T.

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova (Bishkek, Kyrgyzstan)

“Arduino” allows the computer to simulate the electrical load. Devices using “Arduino” receive sensor information and control the actuators. The platform, with software code, is built on a simple board with a modern environment for writing software. This modern device was used in the developed experimental installation at the Department of Electric Power Supply of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, for the study of physical processes in electrical networks. The investigations were carried out on an experimental setup under various conditions: a symmetric regime; asymmetric mode, with a load on two phases; unbalanced mode, with a single phase load (extreme asymmetry mode). Studies show the influence of asymmetry on the growth of electricity losses in electrical networks.

**Keywords:** *asymmetry, power losses in electrical networks, experimental installation, electronic temperature sensor, electronic constructor "Arduino", section of zero wire.*

**DOI:** 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225

### References

1. GOST 54149-2010 *Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems]. (In Russian)
2. GOST 51317.4.30 (IEC 61000-4-30: 2008) *Electrical energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Methods for measuring the quality of electrical energy.* (In Russian)
3. Zhelezko Yu.S., Vorotnitskiy V.E., Kazantsev V.N. *Poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh energosistem* [Electricity losses in electric networks of power systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1983. (In Russian)
4. Gerasimenko A.A., Chupak T.M. *Elektroenergeticheskie sistemy i seti. Raschety parametrov i rezhimov raboty elektricheskikh setey. Ch. 1, Ch. 2* [Electric power systems and networks. Calculation of parameters and operating modes of electrical networks. Part 1, Part 2]. Krasnoyarsk, 2004. 222 p., 172 p. (In Russian)
5. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti* [Electrical systems. Electrical networks]. Moscow, Vysshaya shkola, 1998. 512 p. (In Russian)
6. Lykin A.V. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Novosibirsk, NGTU, 2002. 246 p. (In Russian)
7. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow, Energoatomizdat, 1989. 592 p. (In Russian)
8. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* [Transmission and distribution of electrical energy]. Rostov na Donu, Feniks; Krasnoyarsk, Izdatel'skie proekty, 2006. 718 p. (In Russian)
9. *Materialy po programmirovaniyu Arduino. Ofitsialnyy sayt proekta Arduino* [Materials on programming Arduino. Official site of the project Arduino]. Available: <http://arduino.cc/>. (In Russian)
10. *Chto takoe Arduino? [What is Arduino?]*. Available: <http://arduino-diy.com/arduino-cto-eto-takoye/>. (In Russian)

**Authors' information**

Zarina E. Abdieva - Senior Lecturer of the Department "Power Supply" at Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, *konferenzia\_60let@mail.ru*.

Baktybek I. Sariev - Senior Lecturer of the Department "Power Supply" at Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, *baktybeks@mail.ru*.

Roza B. Kurzhumbayeva - Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department "Power Supply" at Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, *kurzhumbaeva@mail.ru*.

Husein T. Kasmambetov - Senior Lecturer of the Department "Power Supply" at Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakova, *kusein@mail.ru*.

Дата принятия к публикации  
(Date of acceptance for publication)  
29.05.2018

Дата публикации  
(Date of publication):  
25.06.2018

