УДК 621.317.384+621.317.353

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ КАК ИНДИКАТОРЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Лейзгольд Д.Ю., Ромодин А.В., Трушников К.П.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, e-mail: pub@msa.pstu.ac.ru

В статье рассматриваются вопросы контроля эффективности внедряемых энергосберегающих мероприятий в системе электроснабжения административного здания на основании данных мониторинга показателей качества электрической энергии. В ходе работы посредством использования регрессионного анализа определены функциональные зависимости потерь активной мощности от основных показателей качества электрической энергии: медленного изменения напряжения, несимметрии и несинусоидальности. Сформированы обобщенная модель зависимости потерь электрической энергии от отдельных показателей качества электрической энергии. Разработана модель влияния отклонения ПКЭ на потери активной мощности в системе электроснабжения учебного корпуса Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ). Проведена апробация полученной модели на данных замеров показателей качества электрической энергии учебного корпуса ПНИПУ, в результате чего были определены соответствующие потери мощности.

Ключевые слова: показатели качества электрической энергии, энергосбережение, энергомониторинг

POWER QUALITY INDICATORS AS EFFECTIVENESS INDICATORS OF POWER MANAGEMENT

Leyzgold D.Y., Romodin A.V., Trushnikov K.P.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: pub@msa.pstu.ac.ru

In article is described control of the effectiveness of implemented energy-saving measures in the electricity system of the administrative building, which is based on power quality monitoring. During the work the functional dependence of active power losses off the main power quality indicators (PQI), such as a slow change of the voltage, unbalance and non-sinusoidal, was obtained by the use of regression analysis. Generalized model of the dependence of active power losses from the individual quality of electric energy was described. A model of the effect of the deviation of PQI on the active power losses in the power supply system of educational building Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) was elaborated. The approbation of the resulting model to the data of measurements of quality of electric energy educational building PNRPU was conducted, which resulted in defined corresponding loss of active power.

Keywords: power quality indicators, energy-saving, energy-monitoring

Энергомониторинг (ЭМ) является основной из составляющих системного подхода к реализации программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности [4, 8, 10].

Опыт реализации программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности [13], принятой в ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (далее по тексту – ПНИПУ) в 2011 году, позволяет сделать выводы о влиянии вероятностного изменения климатических условий, человеческого фактора и пр. на достижение плановых показателей эффективности реализации энергосберегающих мероприятий.

Поэтому актуальной задачей с точки зрения управления процессами энергосбережения и повышения энергетической эффективности при эксплуатации оборудования [5, 11] становится разработка и внедрение автоматизированной системы ЭМ, позволяющей осуществлять сбор и хранение информации об объекте энергопотребления, а также контролировать как основные (мощность, расход энергии), так и дополнительные (приращение потерь в статическом и динамическом режиме) индикаторы энергетической эффективности для проведения подробного анализа энергетических показателей с целью выявления отклонений от проектных показателей энергетической эффективности и их улучшения.

В [14] представлена модель системы ситуационного управления электроэнергетической системы, которая включает в себя блок управления показателями качества электрической энергии (ПКЭ), осуществляющего их коррекцию в пределах допустимого режима, посредством регулирования потоков мощности [7, 12]. При этом несомненную актуальность несет в себе решение задачи определения оптимального

значения ПКЭ, при котором потери активной мощности будут минимальны.

Ввиду того, что потребители электрической энергии имеют наименьшее значение потерь мощности при идеальном качестве электрической энергии (ЭЭ), было предложено в качестве индикаторов эффективности системы электропотребления использовать ПКЭ.

В [2, 6] приведена графическая интерпретация зависимостей приращения затрат на эксплуатацию электрооборудования при отклонении ПКЭ от номинальных значений, на основе которой, посредством использования регрессионного анализа, получены функции приращения потерь активной мощности.

Рассмотрим влияния отклонения отдельных показателей качества электрической энергии на приращение потерь активной мощности.

Медленные изменения напряжения

Согласно [3] допустимые значения медленного изменения напряжения составляют $\delta U = \pm 10\%$, поэтому аппроксимация зависимостей производилась на отрезке отклонения напряжения [–10%; 10%]. Полученная при этом зависимость приращения потерь активной мощности от величины отклонения напряжения и коэффициента загрузки для динамической нагрузки выглядит следующим образом:

$$\delta P_{\text{дин}}^{(\delta U)} = A_1 \cdot (\delta U)^2 + A_2 \cdot \delta U = \\ = \left(-0,03773 \cdot k_{\text{з.дин}}^2 + 0,0664 \cdot k_{\text{з.дин}} - 0,0185\right) \cdot (\delta U)^2 + \\ + \left(0,212 \cdot k_{\text{з.дин}}^2 + 0,225 \cdot k_{\text{з.дин}} - 0,288\right) \cdot \delta U, \text{ о.е.}, \quad (1)$$

где A_1, A_2 – интерполяционные коэффициенты, зависящие от коэффициента загрузки; δU – отклонение напряжения от номинального значения, о.е.; $k_{\text{з}}$ – коэффициент загрузки динамической нагрузки, о.е.

В организациях бюджетной сферы, как правило, отсутствует система технического учета ЭЭ, поэтому достоверные данные мониторинга загрузки только динамической нагрузки могут быть недоступны, вследствие этого предлагается в качестве коэффициента загрузки использовать общий коэффициент загрузки системы электропотребления

$$k_{\text{з.дин}} \approx k_{\text{з}} = \frac{P_{\text{дин}} + P_{\text{стат}}}{P_{\text{ном.дин}} + P_{\text{ном.стат}}} = \frac{P_{\text{потр}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{потр}}$ – текущее потребление электрической мощности системой электропотребления, кВт; $P_{\text{дин}}$, $P_{\text{ном.дин}}$ – потребляемая и номинальная мощность динамической нагрузки, кВт; $P_{\text{стат}}$, $P_{\text{ном.стат}}$ – потребляемая и номинальная мощность статической нагрузки, кВт.

На основании опытных данных влияния отклонения напряжения на потребление мощности осветительных установок [6] получена интерполяционная формула зависимости потерь статической нагрузки:

$$\delta P_{\text{ст}}^{(\delta U)} = 2,87 \cdot (\delta U)^3 - 0,263 \cdot (\delta U)^2 + 0,9985 \cdot \delta U, \text{ о.е}, \quad (3)$$

где δU – относительное отклонение напряжения от номинального значения, о.е.

Несимметрия напряжения

Влияние несимметрии на потери для динамической нагрузки может быть определено по зависимости [6]:

$$\delta P_{\text{дин}}^{\varepsilon} = 2,41 \cdot \varepsilon_u^2, \quad (4)$$

где ε_u – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности.

Несимметрии в статической нагрузке обуславливают потери электрической мощности, пропорциональные квадрату коэффициента несимметрии [6], поэтому относительное приращение потерь определяется как

$$\delta P_{\text{стат}}^{\varepsilon} = \varepsilon_u^2. \quad (5)$$

Несинусоидальность напряжения

Влияние высших гармоник было также выражено в виде зависимости относительного приращения потерь [6]:

$$\delta P_{\text{дин}}^{\nu} = \sum_{\nu=2}^{\infty} \frac{u_\nu^2}{\nu\sqrt{\nu}}, \quad (6)$$

где u_ν – отношение напряжения ν-й гармоники к номинальному; ν – номер гармоники.

Дополнительные потери активной мощности статической нагрузки, обусловленные протеканием токов высших гармоник, определяются [6]:

$$\delta P_{\text{стат}}^{\nu} = \sum_{\nu=2}^{\infty} u_\nu^2. \quad (7)$$

На основании зависимостей приращения потерь активной мощности от рассмотренных показателей качества электриче-

ской энергии разработана модель влияния отклонения ПКЭ от нормируемых значений на потери электрической мощности в зависимости от состава нагрузки:

$$\begin{cases} \Delta P^{\delta U} = P_{\text{потр}} \cdot \left(a_{\text{дин}} \cdot \delta P_{\text{дин}}^{\delta U} + a_{\text{стат}} \cdot \delta P_{\text{стат}}^{\delta U} \right) \\ \Delta P^{\varepsilon} = P_{\text{потр}} \cdot \left(a_{\text{дин}} \cdot \delta P_{\text{дин}}^{\varepsilon} + a_{\text{стат}} \cdot \delta P_{\text{стат}}^{\varepsilon} \right) \\ \Delta P^{\nu} = P_{\text{потр}} \cdot \left(a_{\text{дин}} \cdot \delta P_{\text{дин}}^{\nu} + a_{\text{стат}} \cdot \delta P_{\text{стат}}^{\nu} \right) \end{cases}, \text{ кВт}, \quad (8)$$

где $a_{\text{дин}}$, $a_{\text{стат}}$ – относительный состав динамической и статической нагрузок соответственно определяемых как

$$a_{\text{дин}} = \frac{P_{\text{ном.дин}}}{P_{\text{ном.дин}} + P_{\text{ном.стат}}}$$

и

$$a_{\text{стат}} = \frac{P_{\text{ном.стат}}}{P_{\text{ном.дин}} + P_{\text{ном.стат}}}, \text{ о.е.} \quad (9)$$

Разделение по составу нагрузок рассмотрим на примере учебного корпуса электротехнического факультета (ЭТФ) ПНИПУ. На момент проведения энергетического обследования [9] установлено следующее: статическая нагрузка составляет 404,2 кВт, динамическая – 48,1 кВт. Тогда согласно (9): $a_{\text{дин}} = 0{,}106$ и $a_{\text{стат}} = 0{,}894$. С учетом этого модель приращения потерь активной мощности от несоответствия ПКЭ нормируемым значениям учебного корпуса ЭТФ ПНИПУ примет вид

$$\Delta P = P_{\text{потр}} \cdot \left(0{,}106 \cdot \left(\delta P_{\text{дин}}^{\delta U} + \delta P_{\text{дин}}^{\varepsilon} + \delta P_{\text{дин}}^{\nu} \right) + 0{,}894 \cdot \left(\delta P_{\text{стат}}^{\delta U} + \delta P_{\text{стат}}^{\varepsilon} + \delta P_{\text{стат}}^{\nu} \right) \right). \quad (10)$$

Согласно протоколу изменения ПКЭ учебного корпуса ЭТФ ПНИПУ [9] в системе электроснабжения зафиксированы следующие отклонения ПКЭ (табл. 1–3).

Таблица 1

Результаты измерения коэффициента несимметрии напряжения

Граница диапазона	Результаты измерения, 95 % измерений		Результаты измерения, 100 % измерений	
	ε_u	$T1$	ε_u	$T2$
$\varepsilon_{u\text{В}}$	4,03	0,00	4,94	0,00

Таблица 2

Результаты измерения медленных изменений напряжения

Граница диапазона	Результаты измерения, 95 % измерений			Результаты измерения, 100 % измерений		
	$\delta U_{\text{у}}$	$T1$	$T1_{(\Sigma)}$	$\delta U_{\text{у}}$	$T2$	$T2_{(\Sigma)}$
$\delta U_{\text{В}}^{\text{I}}$	+01,05	00,00	00,00	+01,30	00,00	00,00
$\delta U_{\text{Н}}^{\text{I}}$	–00,13	00,00		–00,16	00,00	

Примечание. T1, T2 – время выхода величины за рамки нормально и предельно допустимого диапазона соответственно.

Рассчитанное по формулам (1)–(9) распределение относительного увеличения потерь от снижения ПКЭ по типу нагрузки указано в табл. 4. Несмотря на то, что ПКЭ находятся в допустимых пределах (времени превышения допустимых величин не наблюдается), согласно полученной модели потерь, описанной выражением (10), потери активной мощности в электроприемниках электрической сети учебного корпуса ЭТФ ПНИПУ, обусловленные отклонениям ПКЭ, составляют 2,85 кВт, что сравнимо с величиной потерь в распределительной сети.

Таблица 3

Результаты измерения коэффициентов несинусоидальности напряжения

Номер n-гармоники	Граница диапазона	Результаты измерения, 95 % измерений		Результаты измерения, 100 % измерений	
		$K_{U(n)}$	$T1$	$K_{U(n)}$	$T2$
2	u_{vB}	0,5	0,00	0,53	0,00
3	u_{vB}	0,93	0,00	0,97	0,00
4	u_{vB}	0,39	0,00	0,41	0,00
5	u_{vB}	2,12	0,00	2,16	0,00
6	u_{vB}	0,17	0,00	0,18	0,00
7	u_{vB}	1,78	0,00	1,85	0,00
8	u_{vB}	0,2	0,00	0,2	0,00
9	u_{vB}	0,28	0,00	0,29	0,00
10	u_{vB}	0,13	0,00	0,14	0,00
11	u_{vB}	0,98	0,00	1,04	0,00
12	u_{vB}	0,08	0,00	0,09	0,00
13	u_{vB}	1,12	0,00	1,13	0,00
14	u_{vB}	0,07	0,00	0,08	0,00
15	u_{vB}	0,1	0,00	0,11	0,00
16	u_{vB}	0,06	0,00	0,06	0,00
17	u_{vB}	0,67	0,00	0,7	0,00
18	u_{vB}	0,06	0,00	0,06	0,00
19	u_{vB}	0,49	0,00	0,51	0,00
20	u_{vB}	0,08	0,00	0,08	0,00
21	u_{vB}	0,06	0,00	0,06	0,00
22	u_{vB}	0,07	0,00	0,08	0,00
23	u_{vB}	0,57	0,00	0,58	0,00
24	u_{vB}	0,06	0,00	0,07	0,00
25	u_{vB}	0,48	0,00	0,52	0,00
26	u_{vB}	0,08	0,00	0,09	0,00
27	u_{vB}	0,06	0,00	0,06	0,00
28	u_{vB}	0,06	0,00	0,07	0,00
29	u_{vB}	0,4	0,00	0,42	0,00
30	u_{vB}	0,06	0,00	0,07	0,00
31	u_{vB}	0,46	0,00	0,5	0,00
32	u_{vB}	0,06	0,00	0,06	0,00
33	u_{vB}	0,08	0,00	0,09	0,00
34	u_{vB}	0,05	0,00	0,05	0,00
35	u_{vB}	0,39	0,00	0,41	0,00
36	u_{vB}	0,05	0,00	0,05	0,00
37	u_{vB}	0,31	0,00	0,32	0,00
38	u_{vB}	0,06	0,00	0,07	0,00
39	u_{vB}	0,06	0,00	0,07	0,00
40	u_{vB}	0,06	0,00	0,06	0,00

Примечание. Приведены среднеквадратичные значения коэффициентов n-й гармонической составляющей по фазам.

Таблица 4

Расчетные величины удельных потерь

Вид потерь	За период 95 %		За период 100 %	
	Относительные потери, %			
	Статическая нагрузка	Динамическая нагрузка	Статическая нагрузка	Динамическая нагрузка
От отклонения напряжения	1,046	0,168	1,294	0,194
От несимметрии напряжения	0,162	0,391	0,244	0,588
От несинусоидальности напряжения	0,133	0,0093	0,142	0,0099
Итого	1,341	0,5683	1,68	0,7919

Заключение

Таким образом, выявлена необходимость определения дополнительных индикаторов эффективности с целью использования в системе энергомониторинга для формирования своевременных управляющих воздействий на процесс энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Также определены индикаторы эффективности управления электропотреблением, основывающиеся на приращении потерь электрической энергии от отклонения ПКЭ от нормативных значений, на основании которых разработана модель зависимости приращения потерь в статической и динамической нагрузке от отклонения основных ПКЭ и приведена ее апробация на примере системы электропотребления учебного корпуса ЭТФ ПНИПУ, в результате чего доказана возможность выявления ненормативного потребления электрической энергии в системе электроснабжения на основании значений описанных индикаторов.

На основании изменения потерь ЭЭ от колебания величин ПКЭ можно построить систему поддержки принятия решений, оценивающую состояние системы электроснабжения и позволяющую своевременно вырабатывать управляющее воздействие или оповещение персонала о ненормативных потерях с целью скорейшего их устранения. Однако присутствует необходимость более углубленного анализа границ изменения индикаторов, при которых на систему энергопотребления требуется незамедлительное воздействие.

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта Президента Российской Федерации поддержки молодых ученых – кандидатов наук № МК-5279.2014.8 на тему: «Синтез эффективных технологий удаленного мониторинга и управления состоянием интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью».

Список литературы

1. Влияние качества напряжения на экологические параметры системы освещения [Электронный ресурс] // Г.Я. Вагин, О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин и др. Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. Режим доступа: www.science-education.ru/113-11601.

2. Гаврилов Ф.А. Качество электрической энергии: конспект лекций: учеб. пособие. – Мариуполь: Изд-во ПГТУ, 2007.

3. ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

4. Елтышев Д.К., Хорошев Н.И. Системный подход к формированию и реализации программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности [Электронный ресурс] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5-4. – С. 697–701.

5. Казанцев В.П., Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И. Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 28а–34.

6. Качество электрической энергии горных предприятий [Электронный ресурс] / Н.М. Кузнецов, Ю.В. Бебихов, А.В. Самсонов и др. – Российская Академия Естествознания. – 2012. – Режим доступа: http://www.rae.ru/monographs/156.

7. Кузнецов М.И., Ромодин А.В., Костыгов А.М. Экспериментальное исследование управления потоком реактивной мощности в электрической системе с трёхобмоточным трансформатором // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 46–50.

8. Кычкин А.В. Долгосрочный энергомониторинг на базе программной платформы OPENJEVIS // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления.– 2014.– № 1 (9). – С. 5–15.

9. Отчет об энергетическом обследовании ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» / А.А. Ташкинов, А.В. Ромодин, В.А. Кузьминов и др. – Пермь: ПНИПУ, 2012. – 393 с.

10. Петроченков А.Б., Ромодин А.В. Комплекс «Энергооптимизатор» // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 49.

11. Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И. Об одном формализованном методе оценки управленческих решений (на примере управления электротехническими объектами) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 87. – С. 166–171.

12. Петроченков А.Б., Франк Т., Ромодин А.В., Кычкин А.В. Полунатурное моделирование активно-адаптивной электрической сети // Электротехника. – 2013. – № 11. – С. 60–63.

13. Повышение энергетической эффективности пермского национального исследовательского политехнического университета / А.В. Ромодин, А.В. Кухарчук, Д.Ю. Лейзгольд и др. // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2012. – № 1. – С. 49–58.

14. Ромодин А.В., Лейзгольд Д.Ю. Модель системы ситуационного управления гибкими линиями электропередачи в нормальных режимах работы [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – Режим доступа: www.science-education.ru/113-11670.

References

1. Vagin G.Ya., Masleeva O.V., Pachurin G.V. *Sovremenniye problemy nauki i obrazovania – Modern problems of science and education,* 2013, no. 6, available at: www.science-education.ru/113-11601.

2. Gavrilov F.A. *Kachestvo elektricheskoy energii* [Power quality]. Mariupol: PGTU Publ., 2007.

3. *GOST R 54149-2010 Elektricheskaya energiya. Sovmestimost tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya*.

4. Eltyshev D.K., Khoroshev N.I. *Fundamentalnye issledovaniya – Fundamental research,* 2014, no. 5 (v. 4), pp. 697–701.

5. Kazantcev V.P., Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Khoroshev N.I. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2011, no. 11, pp. 28a-34.

6. Kuznetsov N.M., Bebikhov Yu.V., Samsonov A.V. *Kachestvo elektricheskoy energii gornykh predpriyatiy* [Power quality of mining enterprises]. Rossiyskaya Akademiya Estestvoznaniya, 2012, Avable at: http://www.rae.ru/monographs/156/ (accessed 15 August 2014).

7. Kuznetsov M.I, Romodin A.V., Kostygov A.M. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2011, no. 11, pp. 46–50.

8. Kychkin A.V. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatelskogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya.*, 2014, vol. 1, no.9, pp. 5–15.

9. Tashkinov A.A., Romodin A.V., Kuzminov V.A., *Otchet ob energeticheskom obsledovanii FGBOU VPO «Permskiy natsionalnyi issledovatelskiy politekhnicheskiy universitet»* [Report on the energy survey of Perm National Research Polytechnic University]. Perm: PNIPU Publ., 2012, 393 p.

10. Petrochenkov A.B., Romodin A.V. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2010, no. 6, pp. 49.

11. Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Khoroshev N.I. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU – St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2009, no. 87, pp. 166-171.

12. Petrochenkov A.B., Frank T., Romodin A.V., Kychkin A.V. *Elektrotekhnika – Russian Electrical Engineering*, 2013, no. 11, pp. 60–63.

13. Romodin A.V., Kukharchuk A.V., Leyzgold D.Yu., Kalinin I.S., Kuzminov V.A., *Energetika. Innovatsionnye napravleniya v energetike. CALS-tekhnologii v energetike,* 2012, no. 1, pp. 49–58.

14. Romodin A.V., Leyzgold D.Yu., *Sovremenniye problemy nauki i obrazovania – Modern problems of science and education,* 2013, no. 6, available at: www.science-education.ru/113-11670.

Рецензенты:

Бочкарёв С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Кавалеров Б.В., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 06.11.2014.