

УДК 621.316 / 51-74

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**Лейзгольд К.А., Ромодин А.В., Безгоднов П.А.***ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: karleyz@yandex.ru*

В статье рассмотрены проблемы управления показателями качества электрической энергии. Предлагается комплексный подход к управлению ПКЭ, первым этапом которого будет являться определение наличия взаимного влияния между ПКЭ методами корреляционного анализа. Целью работы являлось определение степени зависимости ПКЭ относительно друг друга. Было установлено, что рассматриваемые зависимости не удовлетворяют закону нормального распределения, следовательно, использование корреляционного коэффициента Пирсона недопустимо. Поэтому для основных пар показателей были рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла, значения которых подтвердили наличие умеренной линейной связи между большинством пар показателей (коэффициенты находятся в пределах от 0,340 до 0,667). Был проведен анализ статистической значимости коэффициентов, который подтвердил гипотезу о наличии значимой связи между показателями, что говорит о целесообразности учета данной связи при построении системы управления ПКЭ. Для пар показателей, значения корреляционных коэффициентов которых ниже 0,3, требуется проверка на наличие нелинейной связи, поскольку рассчитанные коэффициенты с большой точностью отражают лишь линейную связь.

Ключевые слова: показатели качества электрической энергии, корреляционный анализ, автоматизированная система управления

CROSS-IMPACT ANALYSIS OF POWER QUALITY INDICATORS**Leyzgold K.A., Romodin A.V., Bezgodov P.A.***Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: karleyz@yandex.ru*

The article dwells upon cross-impact analysis of power quality indicators (PQI) to develop complex approach to the control of defined indicators. The research peculiarity is that the authors use the methods of correlation analysis to determine the relation between indicators. Estimated data show that the sample does not conform Gaussian probability law, therefore, to analyze the relation the classic Pearson's correlation coefficient cannot be used. As a consequence, Spearman rank correlation and Kendall rank correlation coefficients were used to describe the relation. Analytical estimation of coefficient show the connectivity between most pairs of indicators, however, some indicators of relation cannot be determined unambiguously and should be examined for the nonlinear coupling. It should be noted that this article describes only the first step in method developing of a comprehensive approach to the control of power quality indicators.

Keywords: power quality indicators, correlation analysis, automated control system

Методы корреляционного анализа широко используются для исследования зависимостей в медицине, экономике и других областях деятельности человека. Универсальный математический аппарат позволяет применять корреляционный анализ в любой предметной области, таким образом, возможно его использование в электроэнергетике, например, для определения зависимостей с целью эффективного управления процессами. В работах [5, 6] рассматриваются подходы к минимизации потерь активной мощности, зависящей от показателей качества электроэнергии (ПКЭ), однако они базируются на разработке методов управления отдельными показателями, но не рассматривают улучшение показателей качества в комплексе. Например, в качестве целевой функции задается минимум отклонения напряжений и частоты от номинального значения, при этом не берутся во внимание суммарные потери, обусловленные неучтенными ПКЭ, которые, как правило, поддерживаются в сравнитель-

но широкой области допустимых значений. Необходимо учитывать, что в сложноподчиненной структуре электроэнергетических систем ПКЭ могут зависеть друг от друга. При этом взаимная зависимость может быть как прямая, так и обратная, а следовательно, улучшение одного из показателей качества может не только приводить к улучшению других показателей, но и к их ухудшению.

Проблема управления ПКЭ является актуальной, особенно для промышленных предприятий, процесс производства которых непрерывен, и любая остановка оборудования может привести к значительным потерям. Таким образом, возникает необходимость в исследовании функциональной взаимосвязи между показателями качества электроэнергии. Данное исследование позволит принимать решения по применению тех или иных средств, необходимых для улучшения качества электроэнергии.

Применение математических методов к анализу ПКЭ описано во многих рабо-

тах, в частности [3, 7], однако в таких работах математические методы используются лишь для обработки результатов измерений, а не для определения влияния одних показателей на другие.

Основываясь на математических подходах по определению взаимосвязи между независимыми величинами, приведенных в [1], возможно создание методики, которая позволит, учитывая взаимосвязи, решить поставленную задачу оптимального управления несколькими показателями комплексно.

В качестве объекта исследования взаимосвязи были взяты протоколы измерений показателей качества электрической энер-

гии предприятия нефтеперерабатывающей отрасли. В табл. 1 выборочно представлены результаты измерений (две секции шин ГПП, фаза А).

Построение системы управления ПКЭ должно включать в себя три основных этапа:

1. Установление самого факта наличия или отсутствия статистической связи между ПКЭ.

2. Прогноз значений результирующих зависимых ПКЭ по текущим параметрам режима и относительно друг друга.

3. Выявление причинных связей между ПКЭ, включая математическое описание, и управление значениями ПКЭ путем регулирования параметров режима.

Таблица 1

Показатели качества электрической энергии предприятия нефтеперерабатывающей отрасли

Наименование пункта снятия ПКЭ	Показатели качества			
	$\delta_{Uy(A)б рнбн}, \%$	$\delta_{Uy(A)б рнмн}, \%$	$K_{UA}, \%$	$K_{2U}, \%$
1	2	3	4	5
ГПП СШ1 № 1	3,12	3,02	3,32	0,38
ГПП СШ1 № 2	3,4	3,36	3,45	0,32
ГПП СШ1 № 3	3,28	3,29	3,27	0,32
ГПП СШ1 № 4	3,55	3,51	2,81	0,34
ГПП СШ1 № 5	3,15	3,19	2,75	0,25
ГПП СШ1 № 6	3,17	2,98	2,89	0,29
ГПП СШ1 № 7	2,86	3,13	2,35	0,29
ГПП СШ2 № 1	0,97	0,99	1,18	0,36
ГПП СШ2 № 2	1,67	1,84	1,17	0,32
ГПП СШ2 № 3	1,82	1,63	1,17	0,32
ГПП СШ2 № 4	1,83	1,68	1,06	0,2
ГПП СШ2 № 5	1,75	1,87	0,23	1,5
ГПП СШ2 № 6	0,78	0,65	1,21	0,71
ГПП СШ2 № 7	1,7	2	1,24	0,25

Окончание табл. 1

Показатели качества						
$K_{0U}, \%$	$K_{U(3)}, \%$	$K_{U(5)}, \%$	$K_{U(7)}, \%$	$K_{U(9)}, \%$	$K_{U(11)}, \%$	$K_{U(13)}, \%$
6	7	8	9	10	11	12
0,55	1,12	0,97	0,68	0,17	0,93	0,72
0,52	1,19	0,83	0,68	0,19	0,77	0,69
0,5	1,12	0,65	0,58	0,13	0,73	0,52
0,55	1,21	0,59	0,52	0,1	0,68	0,49
0,52	1,09	0,6	0,63	0,15	0,67	0,49
0,56	1,02	1,11	0,74	0,12	0,66	0,55
0,56	0,99	0,77	0,63	0,13	0,57	0,38
0,44	0,94	0,49	0,25	0,09	0,15	0,12
0,44	0,85	0,38	0,26	0,09	0,15	0,13
0,72	0,87	0,44	0,26	0,09	0,2	0,12
0,42	0,97	0,51	0,56	0,12	0,73	0,44
2,27	0,88	0,46	0,21	0,08	0,13	0,12
0,93	0,04	0,06	0,12	0,03	0,1	0,04
0,26	0	0	0	0	0	0

Можно заметить, что каждый следующий тип конечной цели включает в себя предыдущий: без наличия связи между величинами невозможно сделать прогноз значений зависимых переменных, в то же время без наличия прогнозных значений невозможно качественное регулирование выходных величин. Таким образом, для построения системы управления показателями качества электрической энергии необходимо начать с простого выявления взаимосвязи между отдельными парами показателей качества. Решение этой задачи производилось методами корреляционного анализа.

Проверка на соответствие выборки законам нормального распределения была проведена в соответствии с методикой, описанной в [2]. Анализ выборки снятых показателей качества показал, что данные не соответствуют законам нормального распределения, таким образом, к анализу зависимостей не может использоваться классический коэффициент Пирсона. Если выборки данных не соответствуют законам нормального распределения, то для анализа их взаимосвязи можно использовать коэффициенты ранговой корреляции Спирмэна или Кендалла. В совокупности данные коэффициенты более полно отражают реальную картину взаимодействия, коэффициент Кендалла более полно и детально анализи-

рует связи между переменными, перебирая все возможные соответствия между парами значений, а коэффициент Спирмэна более точно учитывает именно количественную степень связи между переменными.

Коэффициент корреляции Спирмэна вычисляется по формуле

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_i^{(k)} - x_i^{(j)})^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (1)$$

где $x_i^{(k)}$, $x_i^{(j)}$ ранги i -ой пары соответствующих переменных, n – количество пар переменных.

Однако, такая формула пригодна лишь для расчетов в случае отсутствия объединенных рангов в исследуемых ранжировках. Если в одной из переменных присутствует несколько одинаковых значений, то их ранги будут совпадать, в таком случае высчитываются поправочные коэффициенты:

$$T^{(k)} = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{m^{(k)}} \left[(n_t^{(k)})^3 - n_t^{(k)} \right], \quad (2)$$

где $n_t^{(k)}$ – число элементов (рангов), входящих в t -ую группу неразличимых рангов, $m^{(k)}$ – число групп неразличимых рангов у переменной $X^{(k)}$.

Тогда формула коэффициента Спирмэна запишется следующим образом:

$$\rho^* = \frac{\frac{1}{6} n(n^2 - 1) - \sum_{i=1}^n (x_i^{(k)} - x_i^{(j)})^2 - T^{(k)} - T^{(j)}}{\sqrt{\left(\frac{1}{6} n(n^2 - 1) - 2T^{(k)} \right) \cdot \left(\frac{1}{6} n(n^2 - 1) - 2T^{(j)} \right)}}. \quad (3)$$

Таблица 2

Расчет коэффициента ранговой корреляции Спирмэна

Пары ПКЭ		Коэффициент ранговой корреляции Спирмэна ρ^*	J -статистика	Критическое значение $J\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)$	Гипотеза о наличии значимой связи
$X^{(1)}$	$X^{(2)}$				
K_{UA}	$K_{U(3)}$	0,650	7,3145	2,60249	верна
K_{UA}	$K_{U(5)}$	0,549	5,8565	2,60249	верна
K_{UA}	$K_{U(7)}$	0,481	5,0072	2,60249	верна
K_{UA}	$K_{U(9)}$	0,667	7,5959	2,60249	верна
K_{UA}	$K_{U(11)}$	0,463	4,7896	2,60249	верна
K_{UA}	$K_{U(13)}$	0,521	5,4932	2,60249	верна
$\delta U_{y(A)б рнбн}$	K_{2U}	0,280	2,7956	2,6022	верна
$\delta U_{y(A)б рнбн}$	K_{0U}	0,171	1,6872	2,6022	неверна
$\delta U_{y(A)б рнмн}$	K_{2U}	0,284	2,8321	2,6022	верна
$\delta U_{y(A)б рнмн}$	K_{0U}	0,155	1,5239	2,6022	неверна
K_{0U}	K_{UA}	0,393	3,9862	2,60249	верна
K_{2U}	K_{UA}	0,463	4,7897	2,60249	верна

Коэффициент ранговой корреляции Кендалла рассчитывается по формуле

$$\tau = 1 - \frac{4v(X^{(k)}, X^{(j)})}{n(n-1)}, \quad (4)$$

где $v(X^{(k)}, X^{(j)})$ – минимальное число обменов соседних элементов последовательности $X^{(j)}$, необходимое для приведения ее к упорядочению $X^{(k)}$.

$$v(X^{(k)}, X^{(j)}) = \sum_{q=1}^{n-1} \sum_{l=q+1}^n v_{ql}^{(j,k)}, \quad (5)$$

где

$$v_{ql}^{(j,k)} = \begin{cases} 1, & \text{если нарушен порядок последовательности } \tilde{X}^{(k)}; \\ 0 & \text{– в противоположном случае.} \end{cases}$$

Если исследуемые данные повторяются (имеют одинаковые ранги), то в расчетах используется скорректированный коэффициент корреляции Кендалла:

$$\tau^* = \frac{2(U^{(k)} + U^{(j)})}{n(n-1)} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{2U^{(k)}}{n(n-1)}\right) \cdot \left(1 - \frac{2U^{(j)}}{n(n-1)}\right)}, \quad (6)$$

где коэффициент τ рассчитывается по формуле (4), поправочные величины $U^{(l)}$ определяются следующим выражением:

$$U^{(l)} = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^{m^{(k)}} \left[\left(n_t^{(k)} \right)^2 - n_t^{(k)} \right], \quad (7)$$

где $n_t^{(k)}$ – число элементов (рангов), входящих в t -ую группу неразличимых рангов, $m^{(k)}$ – число групп неразличимых рангов у переменной $x^{(k)}$.

Согласно формулам (3) и (6) был произведен расчет коэффициентов ранговой корреляции Спирмэна и Кендалла для следующих пар показателей качества электрической энергии:

1. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_{UA} – коэффициент n -й гармонической составляющей $K_{U(n)}$.

2. Установившееся значение отклонения напряжения в режиме наибольших нагрузок $\delta U_{y(A)б.рнбн}$ – коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U} .

3. Установившееся значение отклонения напряжения в режиме наибольших нагрузок $\delta U_{y(A)б.рнбн}$ – коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} .

4. Установившееся значение отклонения напряжения в режиме наименьших нагрузок $\delta U_{y(A)б.рнмн}$ – коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U} .

5. Установившееся значение отклонения напряжения в режиме наименьших нагрузок $\delta U_{y(A)б.рнмн}$ – коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} .

6. Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_{UA} .

7. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U} – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_{UA} .

Данные пары показателей были выбраны в качестве начальных, поскольку между ними наиболее очевидна логическая связь, однако данный факт не всегда говорит о функциональной связи. Расчет был произведен для выборок длиной 96 и 97 строк. Расчетные данные приведены в табл. 2, 3.

Проверка статистической значимости коэффициентов была проведена критериям, приведенным в [4]. Результаты проверки приведены в табл. 2, 3. Для коэффициента Спирмэна гипотеза о наличии значимой корреляционной связи с вероятностью α выполняется при условии:

$$J \geq J \left(\frac{1+\alpha}{2} \right), \quad (8)$$

где α – доверительная вероятность события, принята $\alpha = 0,99$.

Для коэффициента ранговой корреляции Кендалла гипотеза о наличии значимой связи выполняется при выполнении условия:

$$|\tau^*| \geq \tau_\alpha, \quad (9)$$

где τ_α – критическое значение, зависящее от количества строк в выборке и доверительной вероятности α .

Исходя из рассчитанных коэффициентов, можно сделать вывод о том, что умеренная связь (при коэффициентах Спирмэна, лежащих в пределах от 0,3 до 0,7) присутствует между следующими парами показателей:

1. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_{UA} – коэффициент n -й гармонической составляющей $K_{U(n)}$.

Таблица 3

Расчет коэффициента ранговой корреляции Кендалла

Пары ПКЭ		Коэффициент ранговой корреляции Кендалла τ^*	Критическое значение τ_α	Гипотеза о наличии значимой связи
$X^{(1)}$	$X^{(2)}$			
K_{UA}	$K_{U(3)}$	0,589	0,16	верна
K_{UA}	$K_{U(5)}$	0,460	0,16	верна
K_{UA}	$K_{U(7)}$	0,466	0,16	верна
K_{UA}	$K_{U(9)}$	0,438	0,16	верна
K_{UA}	$K_{U(11)}$	0,413	0,16	верна
K_{UA}	$K_{U(13)}$	0,426	0,16	верна
$\delta U_{y(A)б рнбн}$	K_{2U}	0,378	0,159	верна
$\delta U_{y(A)б рнбн}$	K_{0U}	0,340	0,159	верна
$\delta U_{y(A)б рнмн}$	K_{2U}	0,443	0,159	верна
$\delta U_{y(A)б рнмн}$	K_{0U}	0,416	0,159	верна
K_{0U}	K_{UA}	0,547	0,16	верна
K_{2U}	K_{UA}	0,510	0,16	верна

2. Коэффициент несимметрии по нулевой последовательности K_{0U} – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_{UA} .

3. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности K_{2U} – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_{UA} .

В случае, если коэффициент корреляции Спирмэна меньше 0,3 и статистическая значимость коэффициента не подтверждается, считается, что связь между величинами слабая, но возможно наличие нелинейной зависимости между этими показателями, что требует дополнительных исследований.

Расчет коэффициента Кендалла показал, что для всех выбранных пар показателей линейная связь будет умеренной, при этом статистически значимой.

В результате работы было выявлено, что взаимная зависимость ПКЭ не соответствует закону нормального распределения, следовательно, для определения взаимозависимости между ПКЭ невозможно использование классического коэффициента корреляции, но допускается использовать коэффициенты ранговой корреляции Спирмэна и Кендалла.

Проведенный корреляционный анализ позволил проследить явно выраженную взаимную зависимость между ПКЭ, для 7 пар коэффициенты больше 0,3, что говорит о наличии умеренной линейной связи.

Изложенный аппарат является основой для разработки методики управления ПКЭ.

В качестве следующего этапа будет производиться корректировка выявленной взаимосвязи и выведение функциональной зависимости между ПКЭ с учетом введения некоторого поправочного коэффициента, который будет зависеть от вида подключенной нагрузки.

Список литературы

1. Айвазян С.А. и др. Прикладная статистика: Исследование зависимостей: справ. изд. / С.А. Айвазян, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; под ред. С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
2. Бочкарев С.В. Управление качеством: учеб. пособ. / С.В. Бочкарев, А.Б. Петрученков, А.Г. Схиртладзе. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 439 с.
3. Долингер С.Ю., Лютаевич А.Г. Применение вейвлет-анализа для определения показателей качества электрической энергии // Омский научный вестник. – 2010. – № 1 (87). – С. 136–140.
4. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
5. Лейзгольд Д.Ю., Ромодина А.В., Трушников К.П. Показатели качества электрической энергии как индикаторы эффективности управления электропотреблением [Электронный ресурс] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 1501–1506. – Режим доступа: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005063 (дата обращения: 28.04.2015).
6. Ромодина 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. – С. 193. – Режим доступа: www.science-education.ru/113-11670 (дата обращения: 28.04.2015).
7. Сафонов Д.Г., Турахапов К.Х. Использование вероятностно-статистических методов при обработке результатов измерений показателей качества электрической энергии // Омский научный вестник. – 2010. – № 1 (87). – С. 140–144.

References

1. Ajvazjan S.A. i dr. Prikladnaja statistika: Issledovanie zavisimostej: sprav. izd. / S.A. Ajvazjan, I.S. Enjukov, L.D. Meshalkin; pod red. S.A. Ajvazjana. M.: Finansy i statistika, 1985. 487 p.
2. Bochkarev S.V. Upravlenie kachestvom: ucheb. posob. / S.V. Bochkarev, A.B. Petrochenkov, A.G. Shirladze. Perm: Izd-vo Perm. nac. issled. politehn. un-ta, 2011. 439 p.
3. Dolinger S.Ju., Ljutarevich A.G. Primenenie vejvlet-analiza dlja opredelenija pokazatelej kachestva jelektricheskoy jenerгии // Omskij nauchnyj vestnik. 2010. no. 1 (87). pp. 136–140.
4. Kobzar A.I. Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov. M.: FIZMATLIT, 2006. 816 p.
5. Lejzgold D.Ju., Romodin A.V., Trushnikov K.P. Pokazateli kachestva jelektricheskoy jenerгии kak indikator jeffektivnosti upravlenii jelektropotrebieniem [Elektronnyj resurs] // Fundamentalnye issledovaniya. 2014. no. 11–7. pp. 1501–1506. Rezhim dostupa: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005063 (data obrashhenija: 28.04.2015).

6. Romodin A.V., Lejzgold D.Ju. Model sistemy situacionnogo upravlenija gibkimi linijami jelektrperedachi v normalnyh rezhimah raboty [Elektronnyj resurs] // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2013. no. 6. pp. 193. Rezhim dostupa: www.science-education.ru/113-11670 (data obrashhenija: 28.04.2015).

7. Safonov D.G., Turahapov K.H. Ispolzovanie verojatnostno-statisticheskikh metodov pri obrabotke rezultatov izmenenij pokazatelej kachestva jelektricheskoy jenerгии // Omskij nauchnyj vestnik. 2010. no. 1 (87). pp. 140–144.

Рецензенты:

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

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