

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

*Побудовано математичну модель відхилення напруги в залежності від параметрів якості електроенергії та електроспоживання, що дозволяє прогнозувати параметри якості електроенергії в електричних мережах. Застосування отриманої моделі дозволить оптимізувати роботу електротехнічного комплексу.*

*Построена математическая модель отклонения напряжения в зависимости от параметров качества электроэнергии и электропотребления, позволяющая прогнозировать параметры качества электроэнергии в электрических сетях. Применение полученной модели позволит оптимизировать работу электротехнического комплекса.*

**Введение.** Исследования последних лет показали, что сниженное качество электроэнергии негативно влияет на работу электротехнического оборудования, приводит к нарушению технологического процесса, является причиной дополнительных капиталовложений, сказывается на работе устройств учета электроэнергии и др. [1-4]. Поэтому исследование режимов напряжения и их оптимизации в электрических сетях приобрели на сегодняшний день особую актуальность. На основании вышеизложенного нами проведены исследования по прогнозированию отклонения напряжения от параметров качества электроэнергии и электропотребления в электрических сетях 0,4 кВ коммунальных предприятий.

**Целью** настоящей работы является построение математической модели отклонения напряжения в зависимости от параметров качества электроэнергии и электропотребления, позволяющей прогнозировать отклонение напряжения в электрических сетях.

**Основная часть.** Для проведения прогнозирования поведения отклонений напряжения в электрических сетях коммунальных предприятий целесообразно применение методов регрессионного и дисперсионного анализа [5-7].

Для оценки закона распределения отклонения напряжения в сетях освещения необходимо построить регрессионную зависимость между флуктуациями напряжения  $\delta U$  (результурующий фактор) и факторами  $P$  (кВт),  $I$  (А),  $P_t$  (доза фликера). Для каждого фактора имеется  $n = 24$  наблюдений, которым ставятся в соответствие  $n$  значений результирующего фактора.

Гипотеза состоит в том, что  $\delta U$  связано с остальными факторами линейно, т.е.

$$\delta U = a_0 + a_1 I + a_2 P + a_3 P_t \tag{1}$$

где величины  $a_0, a_1, a_2, a_3$  – неизвестны и должны быть определены в дальнейшем.

Тогда для временных отсчетов  $t_j (j = 1 \dots 24)$

$$\delta U_j = a_0 + a_1 I_j + a_2 P_j + a_3 P_{tj}, \quad (j = 1 \dots 24) \tag{2}$$

Таким образом, для вектора  $\vec{a} = (a_0, a_1, a_2, a_3)^T$  неизвестных коэффициентов имеем переопределенную систему уравнений, т.е. систему линейных уравнений, в которой количество уравнений больше числа неизвестных:

$$X\vec{a} = \vec{V}, \tag{3}$$

где  $\vec{V} = (\delta U_1, \delta U_2, \dots, \delta U_{24})^T$ .

$$X = \begin{pmatrix} 1 & I_1 & P_1 & P_{t1} \\ 1 & I_2 & P_2 & P_{t2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & I_{24} & P_{24} & P_{t24} \end{pmatrix} \tag{4}$$

Полученную систему решаем методом наименьших квадратов (МНК). Составляем нормальную систему уравнений, домножая слева матрично-векторное уравнение на  $X^T$ , символом  $T$  обозначено транспонирование матрицы

$$X^T X \vec{a} = X^T \vec{V}, \tag{5}$$

решая которое с помощью оператора МНК, находим

$$\vec{a} = (X^T X)^{-1} X^T \vec{V} \tag{6}$$

В нашем случае с помощью (6) было получено:

$$a_0 = 32,664; a_1 = 5,465; a_2 = 0,124; a_3 = -1,415.$$

Таким образом, получено, что наиболее сильная корреляция существует между  $\delta U$  и  $I$  (наибольший из коэффициентов при факторах  $a_1$ ).

Для оценки степени адекватности построенной регрессии реальному процессу, необходимо вычислить коэффициент множественной корреляции

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{j=1}^{24} e_j^2}{\sum_{j=1}^{24} (\delta U_j - \delta \bar{U})^2}}, \tag{7}$$

где  $e_j = \delta U_j - \delta \hat{U}_j, \quad \delta \hat{U}_j = a_0 + a_1 I_j + a_2 P_j + a_3 P_{tj},$  ( $j = 1 \dots 24$ ) – значения флуктуаций напряжения, полученные с помощью регрессии, а

$$\delta \bar{U} = \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} \delta U_j \tag{8}$$

На основании проведенных расчетов, было получено значение  $R = 0,789$ , которое говорит о вполне удовлетворительном согласии исходных данных с построенной моделью.

На рис. 1 показаны графики  $\delta \bar{U} \Big|_{j=1}^{24}$  и  $\delta \hat{U} \Big|_{j=1}^{24}$ .

Полученная модель может быть использована для прогноза отклонения напряжения в электрических сетях.

Зададим вектор прогнозных значений

$$X_0 = (1, I_{np}, P_{np}, P_{tnn}) = (1; 33; 6; 1,1) \tag{9}$$

Тогда точечный прогноз

$$\delta U_{np} = X_0 \bar{a} = 2,652. \quad (10)$$

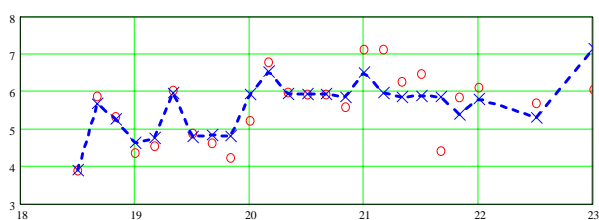


Рис. 1. Результаты аппроксимации и их сравнение с исходными данными

Оценим среднеквадратичное отклонение (СКО) прогноза

$$\delta U_{np} = t_{\varepsilon/2} \cdot S \left[ X_0^T (X^T X)^{-1} X_0 \right]^{1/2}. \quad (11)$$

В данном выражении

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{24} e_j^2}{n-m}}, \quad n = 24, \quad m = 24, \quad (12)$$

где  $t_{\varepsilon/2}$  – значение критерия Стьюдента для  $1-\varepsilon/2$  доверительной вероятности (берется значение  $\varepsilon/2$ , т.к. критерий двусторонний).

Получены доверительные интервалы для математического ожидания прогноза  $M(\delta U_{np})$  при различных значениях доверительной вероятности (для различных значений  $t_{\varepsilon/2}$ )

$$2,652 - \delta U_{np} < M(\delta U_{np}) < 2,652 + \delta U_{np}.$$

Так как  $P = 1-\varepsilon$ , то отсюда получим для  $P = 0,95$

$$0,979 < M(\delta U_{np}) < 4,325.$$

В результате получены доверительные интервалы для математического ожидания прогноза отклонения напряжения в зависимости от качества электрической энергии с помощью математической модели.

Наличие высших гармоник напряжения и тока неблагоприятно сказывается на работе электротехнического оборудования, так как они вызывают дополнительные потери активной мощности во всех элементах системы электроснабжения. На основании вышеизложенного для выявления влияния на отклонение напряжения в зависимости от флуктуаций амплитуд гармоник нами была построена регрессионная зависимость между флуктуациями напряжения  $\delta U$  и флуктуациями отдельных гармоник  $A_3, A_5, A_7, A_9$ .

Для определения зависимости воспользуемся методикой предыдущего раздела, для каждого фактора имеется  $n = 24$  наблюдений,  $m = 5$ , которым ставятся в соответствие  $n$  значений результирующего фактора.

В результате проведенных расчетов получено, что наиболее сильная корреляция имеет место между отклонением напряжения ( $\delta U$ ) и флуктуациями 7-й и 9-й гармоник, а корреляция между флуктуациями напряжения 3-й и 5-й существенно слабее. Получены доверительные интервалы для математического ожидания прогноза с помощью математической модели.

**Выводы.** Таким образом, корреляция между флуктуациями напряжения и мощностью существенно слабее, чем корреляция с током или дозой фликера. Наиболее сильная корреляция имеет место между отклонением напряжения ( $\delta U$ ) и флуктуациями 7-й и 9-й гармоник, а корреляция между флуктуациями напряжения 3-й и 5-й существенно слабее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы её обеспечения в технике. / Э. Хабигер. - М.: Энергоатомиздат, 1995. – 231с.
2. Гриб О. Г. Качество электрической энергии в системах электроснабжения / О. Г. Гриб [и др.]. – Харьков, ХНАГХ, 2006. – 272с.
3. Шаров Ю. В. Управление качеством электроэнергии / Ю. В. Шаров [и др.]. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. – 320с.
4. Гриб О. Г. Контроль потребления электроэнергии с учетом её качества / О. Г. Гриб [и др.]. - Харків, ХНУРЕ, 2010. – 443 с.
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. / Е. С. Вентцель. - М.: Наука, 1984. – 386 с.
7. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного характера. / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 488 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Habiger `E. `Elektromagnitnaya sovmestimost'. Osnovy ee obespecheniya v tehnikе. / `E. Habiger. - M.: `Energoatomizdat, 1995. - 231s. 2. Grib O. G. Kachestvo `elektricheskoy `energii v sistemah `elektrosnabzheniya / O. G. Grib [i dr.]. - Har'kov, HNAGH, 2006. - 272s. 3. Sharov Yu. V. Upravlenie kachestvom `elektro`energii / Yu. V. Sharov [i dr.]. - M.: Izd. dom M`EI, 2006. - 320s. 4. Grib O. G. Kontrol' potrebleniya `elektro`energii s uchetom ee kachestva / O. G. Grib [i dr.]. - Harkiv, HNURE, 2010. - 443 s. 5. Gmurman V. E. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika / V. E. Gmurman: Ucheb. posobie. - M.: Vysshaya shkola, 2000. - 479 s. 6. Ventcel' E.S. Teoriya veroyatnostej. / E. S. Ventcel'. - M.: Nauka, 1984. - 386 s. 7. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo haraktera. / N. N. Moiseev. - M.: Nauka, 1981. - 488 s.

Поступила 25.01.2013

Сапрыка Василий Александрович  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт"  
кафедра автоматизации энергосистем  
61002, Харьков, Фрунзе, 21  
тел. (068) 6166285, e-mail: vaska\_sapryka@yandex.ru

Sapryka V.A.

#### Prediction of voltage fluctuation in electric grids.

A mathematical model of voltage fluctuation versus parameters of power quality and power consumption is developed to allow predicting parameters of the power quality in electric grids. Application of the model will result in an electrical complex functioning optimization.

**Key words – voltage fluctuation, mathematical model, electrical grids.**