

D. G. Alekseyivskiy, P. D. Andriienko, V. P. Meetl'skiy, I. Y. Nemudriy  
**Analysis of the operation of a wind power plant with aerodynamic multiplication**

*The results of simulation of a wind power plant with of aerodynamic multiplication at a variable speed turbines are presented. The basic technical means for improvement of their efficiency are proposed.*

**Key words:** wind power plant, the turbine, power, efficiency.

УДК: 621.31

Ю. Г. Качан<sup>1</sup>, А. В. Николенко<sup>2</sup>, В. В. Кузнецов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук Запорожской государственной инженерной академии

<sup>2</sup>Канд. техн. наук Национальной металлургической академии Украины, г. Днепропетровск

<sup>3</sup>Ассистент Национальной металлургической академии Украины, г. Днепропетровск

## О МОДЕЛИРОВАНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*Предлагается стохастическая модель напряжений в электросетях промышленных предприятий с некачественной электроэнергией, позволяющая решать задачи энергоэффективности и экономической целесообразности применения средств защиты работающего в их цехах электрооборудования.*

**Ключевые слова:** стохастическая модель, напряжение, электросети промышленных предприятий, некачественная электроэнергия.

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие некачественной электроэнергии в сетях промышленных предприятий приводит к ускоренному физическому старению и снижению энергоэффективности используемого оборудования, повышению рисков возникновения аварийных ситуаций на производстве. В [1] показано, что решение данной проблемы следует искать в технико-экономической плоскости с привлечением методов математического моделирования.

В [2] предложена методика принятия оптимального решения по эксплуатации электрооборудования в условиях некачественной электросети на основе экономической оценки различных вариантов восстановления питающего напряжения до заданных показателей качества и показана возможность ее применения на примере работы асинхронного электродвигателя (АД). Согласно данной методике по текущим показателям качества электроэнергии в сети предприятия и на основе энергомеханической и тепловой моделей электромеханического преобразователя [3, 4] рассчитываются его энергетические показатели и осуществляется прогноз времени безаварийной работы [5]. В случае существенных отклонений рассчитанных таким образом показателей от заданных рассматриваются различные варианты технических решений восстановления качества подводимого к двигателю электропитания. Для каждого из вариантов выполняется стоимостная оценка и принимается окончательное решение о его экономической целесообразности.

Предложенная методика в целом позволяет оптимизировать выбор технических средств для восстановления качества электроэнергии по стоимостному критерию с учетом ограничений на энергетические показатели данного электропотребителя. Однако, связанные с этим расчеты, предполагают знание закономерностей изменения напряжений в реальных цеховых сетях, где работает рассматриваемое электрооборудование. А это требует про-

ведения дорогостоящих и длительных экспериментов в каждом конкретном случае. Наиболее целесообразным выходом из создавшейся ситуации является дополнение упомянутых выше математических аналогов моделью с элементами формирования напряжений в цеховых сетях.

**Целью настоящей работы является** разработка стохастического генератора напряжений в цеховой электросети промышленного предприятия с некачественной электроэнергией.

### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время накоплен большой опыт моделирования процессов, протекающих в электрических сетях [6]. При этом в качестве математических аналогов применяются имитационные и аналитические модели. Последние из них позволяют определять расчетные значения показателей электрических сетей (характеристики пиков, выбросов и колебаний) без построения реализаций процессов. Однако они не всегда достаточны для решения задач электроснабжения, особенно нелинейных: регулирования напряжения, реактивной мощности, применения стабилизаторов, компенсаторов, релейных устройств. К тому же получить необходимую для их применения исходную информацию бывает не менее сложно, чем само решение.

Как известно [7], режимы потребления электроэнергии в цехах промышленных предприятий различны и определяются видами технологических процессов и используемого оборудования. При этом показатели качества электроэнергии (ПКЭ) непостоянны и меняются в зависимости от ряда факторов, таких, например, как наличие в сети потребителей, питаемых от полупроводниковых преобразователей, в том числе и с фазо-импульсным регулированием (гальванические ванны, дуговые печи). Работа последних приводит к нарушению сим-

метрии, синусоидальности напряжения, а в ее спектре появляются ярко выраженные высшие гармоники.

Если режим работы всех потребителей электроэнергии зависит от динамики технологического процесса, либо меняется со строгой закономерностью, предписанной производственным циклом, проблемы с заданием показателей ее качества в цеховой сети не возникает. Но в большинстве случаев указанные потребители работают в технологической линии совместно с электроприемниками, включение или отключение которых от сети происходит случайным образом. В результате показатели качества питающего напряжения формируются, вследствие отсутствия детерминированных связей между приемниками, случайным образом. Этим и объясняется целесообразность применения вероятностных методов для моделирования процессов в системах электроснабжения [6]. Причем для решения рассматриваемой задачи имитация реализаций случайных процессов в электросети является наиболее предпочтительной.

Сложность непосредственной имитации линейных напряжений в сети с некачественной электроэнергией заключается в том, что все гармонические составляющие имеют фиксированные частоты их колебаний, на которые накладываются случайные изменения амплитуд и начальных фаз. При этом последующий анализ энергетических показателей электроприемников (например АД) по его энергомеханической модели уже предполагает предварительное разложение указанных напряжений на эти составляющие. Отсюда и следует, что генерировать целесообразнее не случайные последовательности напряжений, а амплитуды и начальные фазы присутствующих в них гармоник.

Указанный подход предполагает из экспериментально снятых реализаций напряжений выделять с определенной последовательностью участки (не менее одного периода основной частоты) и, разложив их в ряд Фурье, получать конкретные значения указанных амплитуд и фаз, составив из них случайные последовательности. Полученные таким образом реализации и будут служить исходной информацией для создания статистических генераторов синтезируемой модели.

Один из возможных вариантов структурной схемы генераторов случайных последовательностей амплитуд и начальных фаз гармонических составляющих линейных напряжений представлен на рис. 1. Здесь:  $\Gamma_\gamma$  – генератор «белого» шума (значений равномерно распределенной некоррелированной случайной величины, соответствующих моментам времени  $\Delta t_\gamma$ , в интервале 0; 1);  $\Pi_{U_{mABi\gamma}}$ ,  $\Pi_{U_{mBCi\gamma}}$  – преобразователи законов распределений амплитуд  $i = \overline{1, n}$  – гармоник линейных напряжений  $U_{mAB}$  и  $U_{mBC}$ , соответственно;  $\Pi_{\Psi_{ABi\gamma}}$ ,  $\Pi_{\Psi_{BCi\gamma}}$  – преобразователи законов распределений начальных фаз  $i = \overline{1, n}$  – гармоник указанных напряжений  $U_{AB}$  и  $U_{BC}$ ;  $\Phi_{U_{mABi\gamma}}$ ,  $\Phi_{U_{mBCi\gamma}}$  – фильтры, формирующие коррелированные амплитуды гармоник линейных напряжений  $U_{AB}$  и  $U_{BC}$ , соответственно;

$\Phi_{\Psi_{ABi\gamma}}$ ,  $\Phi_{\Psi_{BCi\gamma}}$  – фильтры, формирующие коррелированные начальные фазы гармоник этих же напряжений;  $\tau_{(U_{mAB} \rightarrow U_{mBC})i}$  – смещение амплитуды  $i$  – гармоник линейного напряжения  $U_{BC}$  относительно  $i$  – гармоник линейного напряжения  $U_{AB}$  по оси  $\tau$ , определяемое по их взаимокорреляционной функции;  $\tau_{(\Psi_{AB} \rightarrow \Psi_{BC})i}$  – смещение начальной фазы  $i$  – гармоник линейного напряжения  $U_{BC}$  относительно начальной фазы  $i$  – гармоник линейного напряжения  $U_{AB}$  по оси  $\tau$ , определяемое по их взаимокорреляционной функции.

По воспроизведенным таким образом случайным изменениям амплитуд ( $U_{mABi}$ ,  $U_{mBCi}$ ,  $U_{mCi}$ ) и начальных фаз ( $\Psi_{ABi}$ ,  $\Psi_{BCi}$ ,  $\Psi_{Ci}$ ) гармонических составляющих линейных напряжений определяются их мгновенные значения. Затем последние алгебраически складываются в сумматорах, формируя случайные последовательности  $u_{AB}(\Delta t_\gamma)$ ,  $u_{BC}(\Delta t_\gamma)$  и  $u_{CA}(\Delta t_\gamma)$ .

Как видно из рис. 1 первичный случайный процесс, представляющий собой некоррелированную распределенную по равномерному закону в интервале [0; 1] случайную величину, воспроизводится соответствующим генератором. Существуют различные способы ее получения, среди которых программный метод генерирования псевдослучайных последовательностей (ПСП) самый удобный с практической точки зрения. Современные ЭВМ в математическом обеспечении имеют встроенную функцию генерирования ПСП, используя которую можно решать большинство задач моделирования сигналов.

В блоках  $\Pi_{U_{mABi\gamma}}$ ,  $\Pi_{U_{mBCi\gamma}}$  и  $\Pi_{\Psi_{ABi\gamma}}$ ,  $\Pi_{\Psi_{BCi\gamma}}$  выполняются преобразования первичного случайного сигнала к некоррелированным с заданными законами распределения. Выбор наиболее эффективного из них зависит от вида этих законов. Наиболее часто для выполнения данной операции используются методы нелинейного преобразования (обратной функции), кусочно-линейной аппроксимации закона распределения и метод исключения (Неймана).

Формирующие фильтры  $\Phi_{U_{mABi\gamma}}$ ,  $\Phi_{U_{mBCi\gamma}}$ ,  $\Phi_{\Psi_{ABi\gamma}}$ ,  $\Phi_{\Psi_{BCi\gamma}}$  преобразуют некоррелированные случайные последовательности с заданными законами распределения в коррелированные по автокорреляционным функциям соответствующих величин. Одним из наиболее часто применяемых способов преобразования является рекурсивная фильтрация входного ряда

$$y_n = \sum_{k=0}^N c_k x_{n-k},$$

причем  $M[y_n] = 0$ , а

$$M[y_n y_k] = \begin{cases} K_{n-k}, & |n-k| \leq N; \\ 0, & |n-k| > N, \end{cases}$$

где  $y_n$  – выходная коррелированная последовательность,  $x_n$  – входная некоррелированная последовательность,  $c_k$  –



ного значения линейного напряжения  $u_{CA}(t)$  осуществляется по известному соотношению

$$\underline{U}_{CA} = -(\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC}).$$

Очевидно, что применение данного выражения приведет к образованию систематической ошибки за счет того, что значения линейного напряжения  $\underline{U}_{CA}$  не будут соответствовать характерному для него закону распределения. Эта ошибка моделирования может быть устранена путем реализации случайно выбираемой последовательности (рандомизации) генерирования линейных напряжений.

Если, в цехах промышленных предприятий существуют электроприемники, расчет энергетических показателей которых требует задания фазных напряжений, например, асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, которые являются симметричными потребителями, переход к этим напряжениям может быть осуществлен в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} \underline{U}_{AB\gamma_i} = \underline{U}_{A\gamma_i} - \underline{U}_{B\gamma_i} \\ \underline{U}_{BC\gamma_i} = \underline{U}_{B\gamma_i} - \underline{U}_{C\gamma_i} \\ \underline{U}_{CA\gamma_i} = \underline{U}_{C\gamma_i} - \underline{U}_{A\gamma_i} \end{cases}$$

где  $\underline{U}_{A_i}, \underline{U}_{B_i}, \underline{U}_{C_i}$  – комплексы соответствующих гармоник фазных напряжений. При этом необходимые величины  $U_{m\gamma_i}$  и  $\Psi_{\gamma_i}$  для получения исходных значений напряжений  $\underline{U}_{AB\gamma_i}, \underline{U}_{BC\gamma_i}$  и  $\underline{U}_{CA\gamma_i}$  имеются на выходе блоков  $\Phi_{U_{m\gamma_i}}$  и  $\Phi_{\Psi_{\gamma_i}}$  приведенных на рис. 1 генератора.

## ВЫВОДЫ

Разработанная стохастическая модель напряжений в электросетях промышленных предприятий позволяет решать задачи энергоэффективности и экономической целесообразности применения средств защиты работающего в их цехах электрооборудования в случае некачественной электроэнергии. Очевидно, что она может быть использована для решения и других задач некачественного электроснабжения.

**Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов**

**О моделировании напряг в электрических сетях промышленных предприятий**

*У статті розглянута запропонована стохастична модель напруг в електромережах промислових підприємств з неякісною електроенергією, яка дозволяє розв'язувати задачі енергоефективності та економічної доцільності щодо застосування засобів захисту працюючого в їх цехах електрообладнання.*

**Ключові слова:** *стохастична модель, напруга, електромережі промислових підприємств, неякісна електроенергія.*

**U. G. Kachan, A. V. Nikolenko, V. V. Kuznetsov**

**About design of tensions in electric networks of industrial enterprises**

*The article is devoted to the stochastic model of tensions in the electric systems of industrial enterprises with electric power of low quality. This model is allowed to decide the tasks of power-efficiency and economic practicability of protective equipment application for electrical equipment working in their workshops.*

**Key words:** *stochastic model, tension, electric networks of industrial enterprises, electric power of low quality.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качан, Ю. Г. О технико-экономической целесообразности работы асинхронных двигателей в сетях с некачественной электроэнергией / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика 2008. – Вип. 80 – С. 58–62.
2. Качан, Ю. Г. О методике выбора экономически целесообразных средств защиты асинхронных двигателей, работающих в условиях некачественной электроэнергии / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2011. – Вип. 4 (16). – С. 67–72.
3. Качан, Ю. Г. Реализация модели асинхронного двигателя для условий некачественного питания / Качан Ю. Г., Николенко А. В., Кузнецов В. В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2009. – №3. – С. 56–58.
4. Качан, Ю. Г. Идентификация параметров и проверка адекватности тепловой модели асинхронного двигателя, работающего в условиях некачественной электроэнергии / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 1/ (17). – С. 90–94.
5. Качан, Ю. Г. Тепловая составляющая экономического ущерба от работы асинхронного двигателя в условиях некачественной электроэнергии / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2010. – Вип. 85 – С. 113–118.
6. Шидловский, А. К. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения / А. К. Шидловский, Э. Г. Куренный. – К. : Наук. думка, 1984. – 273 с.
7. Качан, Ю. Г. О количественной оценке качества электрической энергии в сетях промышленных предприятий / Ю. Г. Качан, А. В. Николенко, В. В. Кузнецов // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2010. – Вип. 84. – С. 9–16.
8. Прохоров, С. А. Математическое описание и моделирование случайных процессов / С. А. Прохоров. – Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. – 209 с.

*Стаття надійшла до редакції 17.02.2012.*

*Після доробки 24.02.2012.*