

УДК 621.311

## **ИМИТАЦИЯ СЛУЧАЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**А.А. Булгаков, В.А. Коваленко, Л.А. Колесников**  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»

*Рассматривается вероятностная модель изменения электрической нагрузки. Представлены результаты имитации случайного процесса изменения электрической нагрузки в электрической системе. Показано поэтапное улучшение качества воспроизведения теоретической автокорреляционной функции по эстафетному методу.*

**Ключевые слова:** Электрическая нагрузка, случайный процесс, автокорреляционная функция, имитация

***Annotation.** A probabilistic model of electrical load is considered. The results of simulating a random process of electrical load in an electrical system are presented. The stage-by-stage improvement of the quality of reproduction of the theoretical autocorrelation function by the relay method is shown.*

**Keywords:** Electrical load, random process, autocorrelation function, simulation

**Постановка задачи<sup>1</sup>.** В общем случае процессы изменения нагрузки в системах электроснабжения имеют случайный характер, поскольку определяется индивидуальными особенностями множества отдельных электроприемников системы и технологическими процессами производства, которые содержат элементы случайности. Вероятностная модель изменения электрической нагрузки была предложена проф. Г.М. Каяловым [1-2].

Ряд задач в системах электроснабжения не имеет аналитических решений и может быть разрешен лишь путем имитационного моделирования, достоверность которого требует точного воспроизведения числовых характеристик случайных процессов изменения электрической нагрузки при имитации.

**Модель нагрузки.** При расчетах в системах электроснабжения обычно используется модель задания нагрузки в виде токов. Моделируемый процесс изменения нагрузки  $I(t)$  в амперах является стационарным эргодическим процессом с нормальным распределением ор-

---

<sup>1</sup> Авторы благодарят проф. Куренного Э.Г. за помощь в постановке задачи.

динат и характеристиками: среднее значение  $I_c$  и среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma_I$ .

Процесс  $I(t)$  является функцией времени и моделируется дискретным с шагом  $\Delta$ . Ординаты процесса являются зависимыми. Степень линейной связи отдельных ординат на расстоянии  $\tau$  в среднем характеризует автокорреляционная функция (КФ). Характерными КФ для процессов изменения электрической нагрузки в системах электропитания является экспоненциальная

$$K_I(\tau) = \sigma_I^2 \exp\{-\alpha|\tau|\} \quad (1)$$

и экспоненциально-косинусоидальная КФ

$$K_I(\tau) = \sigma_I^2 \exp\{-\alpha|\tau|\} \cos\{\omega_0\tau\}, \quad (2)$$

которая указывает на наличие скрытой периодичности в  $I(t)$ . В формулах (1) и (2)  $\omega_0$  – коэффициент, характеризующий скрытую периодичность, а  $\alpha$  – декремент затухания КФ, величина обратно пропорциональная времени корреляции  $\alpha = 1/\tau_k$ , которое может быть определено по формуле

$$\tau_k = \int_0^{\infty} |R_I(\tau)| d\tau \quad (3)$$

с использованием нормированной КФ

$$R_I(\tau) = \frac{K_I(\tau)}{\sigma_I^2}. \quad (4)$$

Отметим, что наряду с КФ вида (1) и (2), которые являются не дифференцируемыми в окрестности  $0+$ , процесс изменения электрической нагрузки может характеризоваться и более сложной КФ [3]

$$K_I(\tau) = \sigma_I^2 \exp\{-\alpha|\tau|\} \left( \cos\{\omega_0\tau\} + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin\{\omega_0|\tau|\} \right), \quad (5)$$

которая в той же области является дифференцируемой.

Обычно сначала моделируют нормированный случайный процесс  $x(t)$  с нулевым средним значением  $x_c = 0$  о.е. и единичным СКО  $\sigma_x = 1$  о.е., а после переходят уже к процессу  $I(t)$ .

**Эстафетный метод**, предложенный на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и городов ДонНТУ [4], относится к группе перестановочных методов.

Пусть требуется воссоздать значение КФ имитационного процесса в нескольких точках, каждая из которых задана значениями аргумента  $\tau_{3l}$  и КФ  $K_I(\tau_{3l})$ , где  $l$  – порядковый номер точки. Предположим, что каким-либо методом получена случайная последователь-

ность ординат процесса  $\tilde{x}(t)$ , функция распределения которой удовлетворяет заданным требованиям. Тогда среднее значение  $x_c$  и дисперсия будут равны соответствующим характеристикам искомого процесса  $x(t)$ . Очевидно, любая перестановка ординат в пределах длительности реализации  $T$  не меняет вида распределения и его моментов, но приводит к изменению КФ. Идея метода состоит в изменении КФ процесса за счет перестановок ординат реализации.

Ординаты имитационных процессов разделены малым интервалом  $\Delta$  при общем их количестве  $N_\Delta = T/\Delta + 1$ . В связи с этим КФ вычисляется по формуле:

$$\tilde{K}_j = \frac{1}{N_\Delta - j} \sum_{i=1}^{N_\Delta - j} \tilde{x}_i \tilde{x}_{i+j} - x_c^2, \quad (6)$$

где  $i = t/\Delta$ ,  $j = \tau/\Delta$  – количество интервалов  $\Delta$  в интервалах  $t$  и  $\tau$ .

В контролируемых точках вычисляются и сравниваются заданная КФ и КФ полученного процесса, оценивается их разность.

В общем случае необходимо переставить ординаты процесса таким образом, чтобы для заданных аргументов  $\tau_{zl} = j_l \Delta$  отличия между КФ были бы минимальными. Очевидно, что каждую перестановку следует выполнять только в том случае, если в результате ее хотя бы по одной контролируемой ординат КФ различие между КФ уменьшается, а по другим, по меньшей мере, не увеличивается.

Количество возможных комбинаций перестановок ординат даже при конечном их числе очень большое. Поэтому найти теоретически оптимальный алгоритм минимизации перестановок вряд ли возможно.

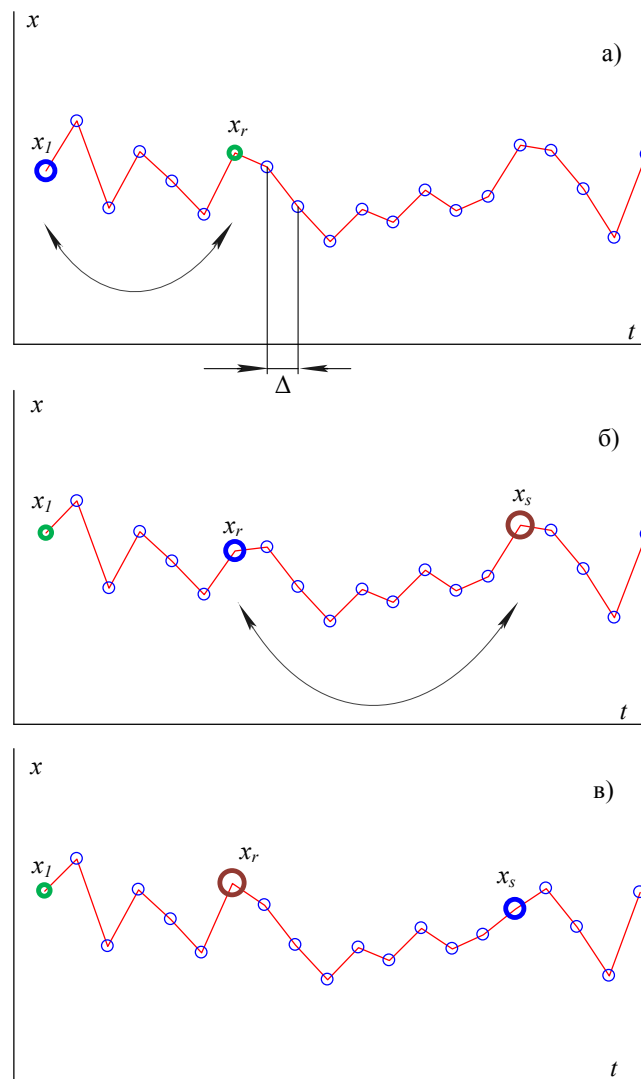
Предложен следующий алгоритм перестановок. Сначала поочередно проверяется возможность перестановки каждой ординаты  $x_i$  с начальной ординатой. Если в некоторой точке  $i = r$  выполняется условие перестановки, то ордината  $x_r$  меняется местами с начальной.

После перестановки выполняется пошаговый перебор, но уже оцениваются перестановки ординат при  $i \geq r + 1$  с ординатой  $x_r$ , которая заняла место начальной ординаты. Иными словами, ордината  $x_1$  так сказать передала эстафету ординате  $x_r$  – отсюда и название метода.

Если в процессе дальнейших переборов встретится новая подходящая ордината  $x_s$ , то меняются ординаты  $x_r$  и  $x_s$ , а ордината  $x_1$  остается на месте  $i = r$ . После окончания перестановок относительно  $i = 1$  вся процедура снова повторяется, но начиная со второй ординаты.

Процедура перестановки ординат процесса в эстафетном методе иллюстрируется рисунком 1.

**Практическая реализация.** В качестве эталонной (теоретической) задавалась экспоненциальная КФ со значениями  $\alpha$ , равными 0,4, 0,2, 0,1, 0,05 и 0,01. На рисунке 2 эталонная КФ показанная точечной линией. Непрерывной линией показана улучшенная КФ. Число исходных точек процесса было принято равным 500. Число контролируемых точек КФ принималось равным 50, 100 и 250.



*Рисунок 1 – К пояснению эстафетного метода: исходный процесс (а), результат перестановки ординат  $x_l$  и  $x_r$  (б), результат перестановки ординат  $x_r$  и  $x_s$  (в)*

Преобразование КФ проводилось поэтапно в 4 этапа. Путем поэтапного улучшения КФ (число контролируемых точек принято 100)

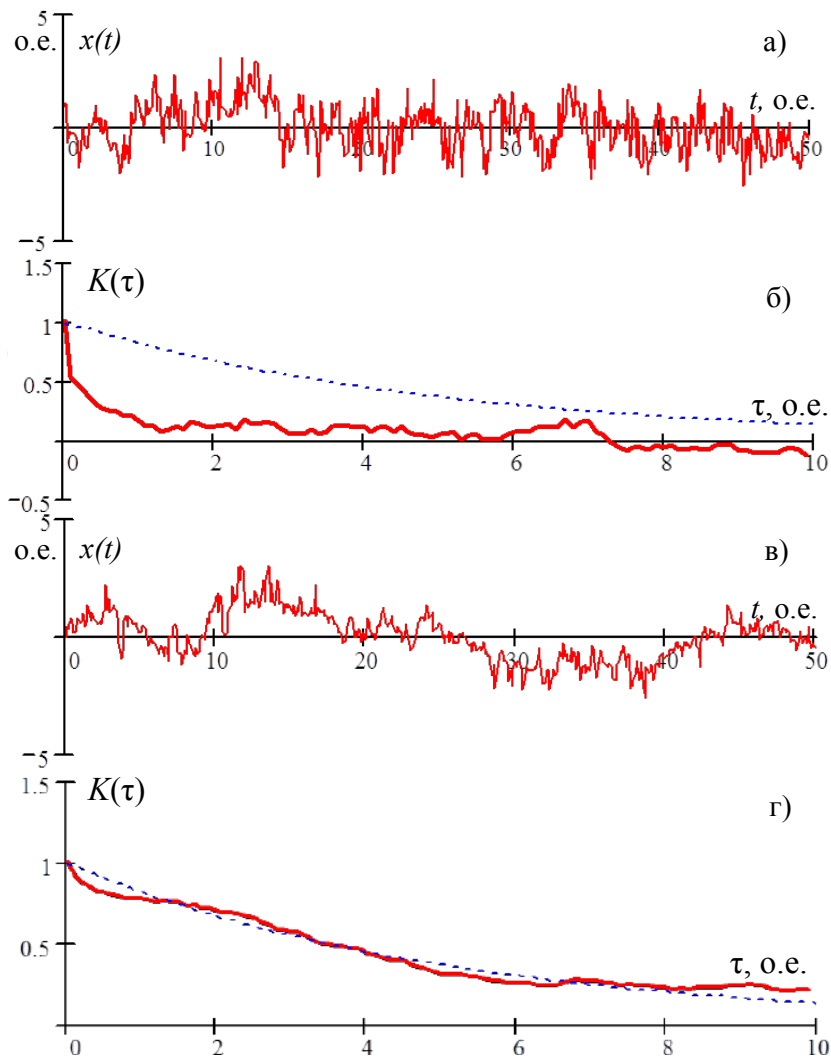
**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ,  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ**

---

для значений  $\alpha$  равных 0,4, 0,2 и 0,1 удалось достичь точности моделирования 10%, а для  $\alpha$  равного 0,05 и 0,01 только 20%.

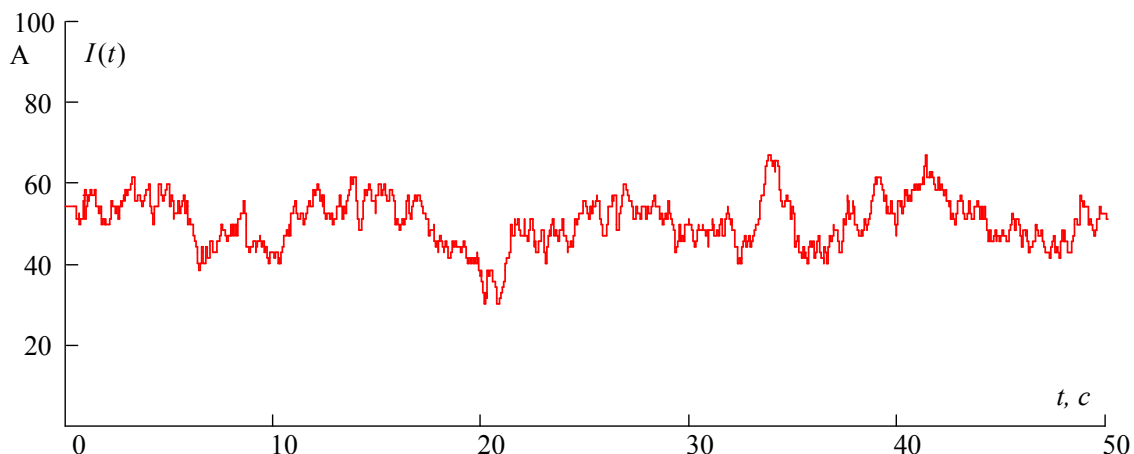
Увеличение числа контролируемых точек КФ приводит к затягиванию процесса преобразования и уменьшению точности моделирования. Наоборот, уменьшение числа контролируемых точек КФ до 50 точек привело к ускорению процесса моделирования.

Полученная точность КФ в 10% является достаточной для моделирования случайных процессов изменения электрической нагрузки в системах электроснабжения, однако она не является предельной. Дальнейшее преобразование для улучшения имитационной КФ и получения большей точности возможно, но требует также дополнительных затрат по времени.



*Рисунок 2 – Первый (а, б) и четвертый (в, г) этапы преобразования исходного процесса эстафетным методом для  $\alpha = 0,2$  о.е.: нормированный процесс (а, в) и его КФ (б, г)*

Результирующий случайный процесс  $I(t)$ , который получен умножением каждой ординаты нормированного процесса  $x(t)$  на  $\sigma_I$  и прибавлением среднего значения  $I_c$ , показан на рис. 3.



*Рисунок 3 – Стационарный случайный процесс изменения тока с характеристиками:  $I_c = 50 \text{ A}$ ,  $\sigma_I = 5 \text{ A}$*

### **Выводы**

1. Использование эстафетного метода для имитации обеспечивает получение случайных процессов не только с заданным законом распределения, а и с желаемой КФ.
2. Применение эстафетного метода позволяет контролировать качество воспроизведения КФ для заданного количества ординат.

### **Перечень ссылок**

1. Каялов, Г.М. О применении теории вероятностей к анализу нагрузок промышленных электросетей / Г.М. Каялов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1958. – № 1. – С. 73-79.
2. Каялов, Г.М. Теория случайных процессов и расчет нагрузок заводских электрических сетей / Г.М. Каялов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1961. – № 11. – С. 65-81.
3. Ведерников, А.С. Метод квадратичного кумулятивного осреднения в расчетах резкопеременных графиков электрических нагрузок систем электроснабжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ведерников Александр Сергеевич. – Самара, 2005. – 25 с.
4. Погребняк Н.Н. Метод квадратичного инерционного сглаживания в расчетах нагрузок промышленных электрических сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Погребняк Наталья Николаевна. – Донецк, 1999. – 25 с.