

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

© Смердов А.А., Брикун А.Н., 2009

Запропоновано математичні моделі процесів генерації електричної енергії в системах відновлюваної енергетики: сонячної у вигляді імпульсних випадкових процесів з детермінованим тактовим інтервалом і вітрової – аперіодичними імпульсними випадковими процесами.

Mathematic models of processes of electric energy generation in the systems of restorative energy power is proposed – solar energy as casual impulse with preset clock intervals and wind energy with aperiodic casual impulse processes.

Постановка проблемы. Характерной чертой развития современной энергетики является широкое вовлечение в энергобаланс передовых стран мира возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В Европейском сообществе ставится задача увеличить долю ВИЭ в общем энергопотреблении к 2010 году до 12 % при установленной мощности солнечных фотоэлектрических систем до 3 ГВт. Основными возобновляемыми энергоресурсами в мире в 2030 году будут солнечная и ветровая энергия. Прогнозируемая установленная мощность солнечных фотоэлектрических систем составит 300 ГВт при стоимости 1000 евро/кВт и стоимости электроэнергии 0,05 – 0,12 евро/кВт·час [1]. Являясь периодической функцией времени, мощность источников возобновляемой энергии колеблется случайным образом и зависит от целого ряда факторов, учет которых является необходимым при оценке эффективности систем, использующих ВИЭ.

Анализ последних достижений и публикаций. За последние 10–15 лет были разработаны и усовершенствованы модели различных ВИЭ, методы расчета их технических характеристик без учета случайного фактора [2–5]. В работах [6, 7] была показана возможность описания процессов генерации и потребления энергии в системах солнечной энергетики статистическими методами.

Задача исследований. Целью настоящей статьи является разработка математических моделей процессов генерации электрической энергии в системах возобновляемой солнечной и ветровой энергетики методами теории импульсных случайных процессов.

Изложение основного материала. Последовательность импульсов, параметры которых являются случайными величинами, называется импульсным случайным процессом. Для любой реализации $\zeta(t)$ импульсного случайного процесса задается форма импульсов, а момент их возникновения и окончания, а также амплитуды являются случайными. Форма импульсов задается детерминированной функцией времени $u(t)$, которая равна нулю вне интервала $0 \leq t \leq 1$. Тогда импульсы любой реализации случайного процесса получаются умножением $u(t)$ на величину ξ_n , сдвигом по оси времени на величину t_{2n} и делением на величину $t_n = t_{2n+1} - t_{2n}$ [8]

$$x(t - t_{2n}, t_{2n+1}) = x_n u\left(\frac{t - t_{2n}}{t_n}\right). \quad (1)$$

Величина солнечного излучения, приходящего на Землю, определяет мощность фотоэлектрических генераторов, используемых в солнечной энергетике. Солнечное излучение представляет собой временной импульсный поток с суточной периодичностью. Основные параметры, характеризующие форму и положение импульсов солнечного излучения, являются импульсными случайными функциями времени. На рис. 1 представлена плотность потока солнечной радиации на горизонтальную поверхность в течение одной недели января в штате Колорадо (40° с. ш.) США [3].

Выходная мощность солнечного электрогенератора в этом случае будет пропорциональна величине потока солнечной радиации и представляет случайный процесс, у которого импульсы со случайными параметрами появляются на детерминированных (тактовых) интервалах времени. Такие импульсные случайные процессы представляют собой результат наложения стационарной случайной последовательности импульсов на детерминированную последовательность тактовых интервалов и относятся к импульсным случайным процессам без накопления [8].

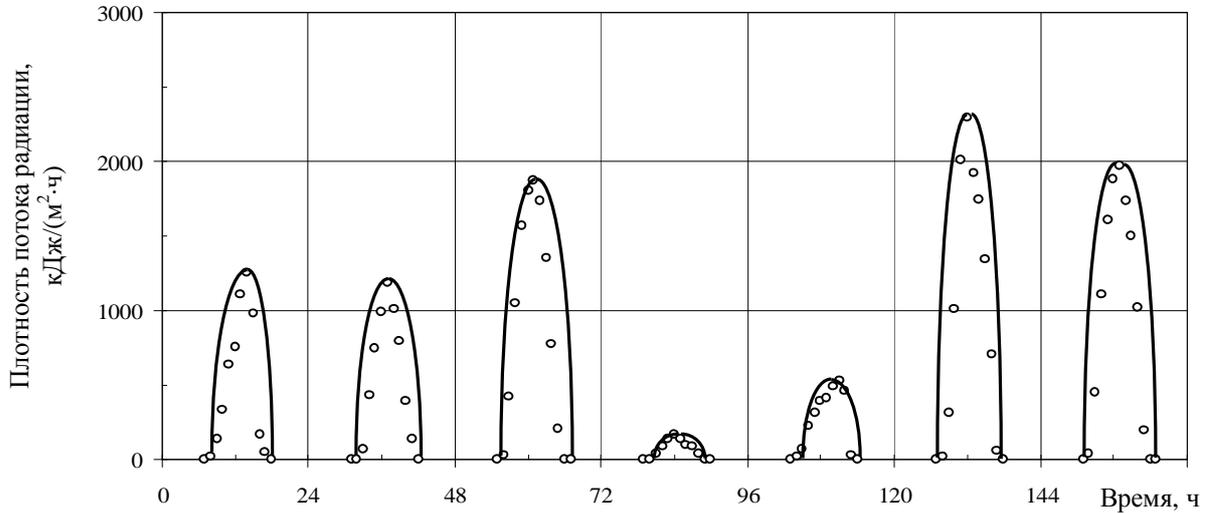


Рис. 1. Плотность потока радиации в течение недели в январе

В импульсных случайных процессах с детерминированным тактовым интервалом момент появления t_{2n} любого n -го импульса можно представить в виде

$$t_{2n} = nT + n_n, \quad (2)$$

где T — длина тактового интервала; n — случайная величина с нулевым средним значением.

Для описания случайных процессов используется энергетический спектр, который дает усредненную картину распределения энергии случайного процесса по частотам элементарных гармонических составляющих, но не учитывает их фазовой структуры. Энергетический спектр импульсного случайного процесса с детерминированными тактовыми интервалами складывается из непрерывной части

$$F_H(w) = \frac{2}{T} \left\{ (a^2 + s^2) K_0(w) - a^2 |q_{ln}(w)|^2 K_\infty(w) \right\} \quad (3)$$

и дискретной части, состоящей из дискретных линий на частотах, кратных частоте $2p/T$ повторения импульсов

$$F_D(w) = \frac{4pa^2}{T^2} |q_{ln}(w)|^2 K_\infty(w) \sum_{r=-\infty}^{\infty} d\left(w - \frac{2pr}{T}\right). \quad (4)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$K_0(w) = \int_0^{\infty} x^2 |g(wx)|^2 w_{1t}(x) dx, \quad (5)$$

$$K_\infty(w) = \left| \int_0^{\infty} x g(wx) w_{1t}(x) dx \right|^2, \quad (6)$$

где $w_{1t}(t)$ — одномерная функция распределения длительностей импульсов; $q_{ln}(w)$ — характеристическая функция случайной величины n_n ; a, s^2 — среднее значение и дисперсия случайных амплитуд импульсов; $d(w)$ — дельта функция.

Импульсные случайные процессы с детерминированным тактовым интервалом являются адекватной моделью для описания временных процессов изменения плотности солнечного излучения в течение суток и мощности солнечных электрогенераторов, учитывающих случайную величину потока излучения, время восхода и захода солнца, продолжительность светового дня.

Рассмотрим модель электрогенератора работающего на основе преобразования случайного потока солнечной энергии, представленного на рис. 1. Равноотстоящие импульсы с временным периодом T задаются в форме положительной полуволны синусоиды (косинусоиды), имеющей одинаковую длительность τ_0 и случайную амплитуду a . Используя соотношения (3)–(4), найдем энергетический спектр последовательности некоррелированных равноотстоящих синусоидальных положительных импульсов постоянной длительности и случайной амплитуды, который будет равен

$$F(w) = \frac{2t_0^2}{T} \frac{\cos \frac{wt_0}{2}}{\left[1 - \left(\frac{wt_0}{p}\right)^2\right]} \left[s^2 + \frac{2pa^2}{T} \sum_{r=-\infty}^{\infty} d\left(w - \frac{2pr}{T}\right) \right], \quad (7)$$

где σ^2 – дисперсия случайных амплитуд.

Для модели электрогенератора с выходным потоком энергии описываемым случайной последовательностью прямоугольных импульсов с детерминированным тактовым интервалом, длительность которых имеет двустороннюю модуляцию и подчиняется равномерному закону распределения, энергетический спектр равен [8]

$$F(w) = \frac{4a^2}{w^2T} \left[1 - \frac{\sin^2 awT}{a^2w^2T^2} + \left(\frac{\sin^2 awT}{a^2w^2T^2} - \frac{\sin 2awT}{2awT} \right) \cos wt_0 + \frac{4p}{T} \left(\frac{\sin awT \sin \frac{wt_0}{2}}{awT} \right)^2 \sum_{r=-\infty}^{\infty} d\left(w - \frac{2pr}{T}\right) \right], \quad (8)$$

где τ_0 – среднее значение длительности импульсов; α – относительная величина, определяющая длительность интервала модуляции импульсов: $0 < \alpha < 0,5 - \tau_0/T$.

Ветроэлектрические установки преобразовывают энергию ветра в электрическую энергию. Ветер на различных высотах в атмосфере Земли для каждой точки ее поверхности характеризуется его скоростью, которая является случайной величиной в пространстве и времени, зависящей от многих факторов местности, сезона года и погодных условий. Поэтому все процессы, напрямую связанные с использованием текущего значения скорости ветра, в частности генерация электроэнергии в ветроэлектрических установках, имеют сложный случайный характер [1, 2]. В самом общем виде выходная мощность ветроэлектрогенератора может быть представлена последовательностью прямоугольных импульсов постоянной амплитуды a и случайной длительности, возникающих в случайные моменты времени (рис. 2).

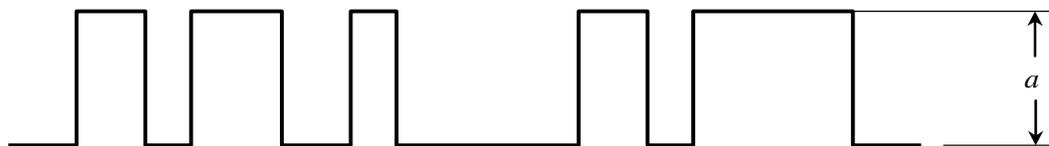


Рис. 2. Последовательность прямоугольных случайных импульсов

Модели в ветровой энергетике описываются случайными процессами с накоплением, называемыми еще аперiodическими импульсными случайными процессами [8]. В отличие от процессов без накопления, для которых разность между моментами появления двух последовательных импульсов не может превосходить удвоенную длительность тактового интервала, для

процессов с накоплением эта разность может быть произвольной. Интервал между моментами появления двух последовательных импульсов реализации равен

$$m_n = t_{2n+2} - t_{2n} \quad (9)$$

и является суммой двух случайных величин: длительности импульса τ с характеристической функцией $q_{1t}(w)$ и длительности паузы между импульсами с характеристической функцией $q_{1t_n}(w)$.

Энергетический спектр аperiodического импульсного случайного процесса определяется выражением

$$F(w) = \frac{2a^2}{T} \left\{ \left[1 + \left(\frac{s}{a} \right)^2 \right] K_0(w) + 2 \operatorname{Re} \left[\frac{Q(-w)Q_1(-w)q_{1t_i}(w)}{1 - q_{1m}(w)} \right] + \frac{g^2(0)t_0^2}{T} d(w) \right\}. \quad (10)$$

В формуле (10) приняты следующие обозначения:

$$Q(w) = \int_0^{\infty} xg(wx) w_{1t}(x) dx, \quad (11)$$

$$Q_1(w) = \int_0^{\infty} xg_1(wx) w_{1t}(x) dx, \quad (12)$$

$$g_1(w) = \int_0^1 u(1-x) e^{-iwx} dx = g(-w) e^{-iw}, \quad (13)$$

$$q_{1m}(w) = q_{1t}(w)q_{1t_n}(w). \quad (14)$$

Формула (10) указывает на существенное различие энергетических спектров аperiodического импульсного случайного процесса и импульсного случайного процесса с детерминированным тактовым интервалом. Спектр (10) не содержит дискретной части характерной для спектра процесса с детерминированным тактовым интервалом (кроме одной дискретной компоненты, соответствующей постоянной составляющей процесса).

Используя соотношения (10)–(14) найдем спектр аperiodического импульсного случайного процесса, представленного на рис. 2, когда длительности импульсов и пауз подчинены одному и тому же нормальному закону распределения. В случае $s_t \ll T$, энергетический спектр равен

$$F(w) = \frac{4a^2}{w^2 T} \frac{1 - e^{-s_t^2 w^2}}{\frac{-s_t^2 w^2}{2} \cos \frac{wT}{2} + e^{-s_t^2 w^2}} + \frac{a^2}{2} d(w). \quad (15)$$

Адекватные математические модели описания процессов генерации электрической энергии в гелио- и ветроустановках позволят оптимизировать их структуру и создавать адаптивные энергосистемы. Однако это потребует большого объема экспериментальных исследований случайных процессов генерации энергии.

Выводы. 1. Теория импульсных случайных процессов, разработанная применительно к анализу систем передачи информации, является эффективным средством описания случайных процессов генерации электрической энергии в системах возобновляемой солнечной и ветровой энергетики.

2. Моделями, описывающими процесс генерации электрической энергии в системах солнечной энергетики, являются импульсные случайные процессы с детерминированным тактовым интервалом.

3. Моделями, описывающими процесс генерации электроэнергии в ветроустановках, являются аperiodические импульсные случайные процессы.

1. Безруких П.П., Стребков Д.С. *Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии.* – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. 2. Твайдел Дж., Уэйр А. *Возобновляемые источники энергии: Пер. с*

англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 3. Даффи Дж. А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. 4. Мхитарян Н. М. Гелиоэнергетика. Системы, технологии, применение. – К.: Наук. думка, 2002. 5. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 6. Smerdov A., Bondarenko B., Polyakov M., Brykun A. Stochastic models in solar energy // Proc. 4-th Res. and Devel. Conf. of Central and Eastern European Inst. of Agricultural Engin. – Moscow: VIESH, 2005. – P. 134–139. 7. Смердов А.А., Брикун А.Н. Описание случайных процессов генерации и потребления энергии в системах солнечной энергетики // Матеріали VI Міжнар. конф. “Відновлювана енергетика ХХІ століття”. – АР Крим. – 2005. – С. 44–47. 8. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. – М.: Сов. радио, 1966.

УДК 621.3.011.72

П.Г. Стахів, Ю.Я. Козак, Ю.П. Франко
Національний університет “Львівська політехніка”

СТРУКТУРА МАКРОМОДЕЛІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПАРАМЕТРИЧНУ ІДЕНТИФІКАЦІЮ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

© Стахів П.Г., Козак Ю.Я., Франко Ю.П., 2009

Описано порівняльний аналіз затрат машинного часу і якості отриманої макромоделі залежно від вибраної форми макромоделей у вигляді нелінійного дискретного рівняння стану. Зазначене питання є важливим при автоматизації побудови макромоделей з використанням оптимізації, оскільки невдалий вибір математичного представлення, зокрема апроксимація нелінійних характеристик, часто приводить до значних чисельних затрат аж до зациклювання оптимізаційного процесу.

This paper is devoted to comparative analysis of computer time consumption and obtained model quality as dependence on selected form of developed macromodel using nonlinear discrete state equation. Mentioned question is an important one during automation of macromodel creation procedure using optimization algorithms because wrong choice of mathematical representation form (especially approximation of nonlinear characteristics) often leads to considerable numerical efforts up to optimization process failure.

Постановка проблеми. Задача математичного моделювання нелінійних динамічних систем є складною задачею з багатьма розв’язками. У задачах такого типу важливим є вибір оптимального розв’язку, який би забезпечував задану точність моделі і до того ж час мінімізував час її ідентифікації. [6] Універсального підходу до розв’язку цієї задачі не існує тому доцільним є розробка швидких алгоритмів ідентифікації макромоделей для певної групи об’єктів. У нашому випадку такою групою моделювання об’єктів є електромагнітні системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування оптимізаційного підходу до побудови динамічних макромоделей дозволило певною мірою уніфікувати процедуру ідентифікації параметрів моделі на основі концепції “чорної скриньки” [1]. Однак така уніфікація, яка цілковито ігнорує особливості модельованого об’єкта, приводить до значних затрат комп’ютерного часу під час реалізації процедур оптимізації, зокрема внаслідок великої кількості змінних оптимізації [5]. Пришвидшення процесу обчислень шляхом розпаралелення є доволі складним і не завжди дає позитивний результат [2, 4]. Тому перспективним є підхід до побудови дискретних макромоделей, який на етапі структурної ідентифікації, дозволяє вибрати оптимальну форму математичної моделі.