

ВПЛИВ СТОХАСТИЧНОГО ХАРАКТЕРУ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ЇХНЮ СТІЙКІСТЬ

К.С. Клен*, канд.техн.наук, В.Я. Жуйков**, докт.техн.наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

Наведено формули для розрахунку процесу зміни енергії у системах розосередженої генерації з врахуванням його випадкового характеру у просторі двох та трьох змінних. Представлено графік дискретного відображення процесу зміни енергії та діаграму Ламерея для дослідження стійкості цього процесу. Відмічено, що через випадковий характер процесу зміни енергії система може виходити із зони стійкої роботи. Наведено методику знаходження диференціалу випадкового процесу з Вінеровською складовою за формулою Іто. Представлено методику застосування закону повторного логарифму до Вінеровського процесу та наведено графіки його типових траєкторій як на всьому інтервалі спостереження, так і в околі нуля. Обґрунтовано необхідність застосування у системах розосередженої генерації накопичувачів енергії для забезпечення їхньої стійкої роботи. Бібл. 11, рис. 8.

Ключові слова: системи розосередженої генерації, принцип невизначеності Гейзенберга, накопичувач, випадкові процеси.

Вступ. У поточний час спостерігається тенденція збільшення частки електростанцій на відновлюваних джерелах енергії, насамперед вітрових та сонячних станцій, в структурі генеруючих потужностей енергосистем багатьох країн світу, зокрема України, що посилює вимоги в частині удосконалення керування режимами їхньої роботи [1]. Широке застосування знайшли системи розосередженої генерації, які реалізують моніторинг та облік енергетичних потоків в реальному часі, а також використовують оптимальні закони керування та вирішують питання забезпечення протікання двонаправлених потоків енергії, стійкості та надійності систем [2]. В той же час це створює низку проблем, пов'язаних із встановленням стійких режимів роботи енергосистем, до яких приєднані електростанції з відновлюваними джерелами енергії, для яких характерною є стохастична зміна рівнів енергії генерації, споживання та навантаження, зміна якого також носить імовірнісний характер, що значно ускладнює її регулювання та послаблює стійкість. Розрахунок балансу енергії у вказаних системах, стійкість яких розраховується за лінійними та/або нелінійними моделями зі зворотним зв'язком, відбувається на деякому базовому інтервалі або інтервалі спостереження, що призводить до появи невизначеності розрахунку енергії згідно з принципом Гейзенберга [3]. Дія принципу Гейзенберга вказує на обмежену точність прийняття рішення та на можливість накопичення помилки при тривалій роботі, що визначає необхідність формування спеціальних керуючих впливів з врахуванням фрактальної природи систем розосередженої генерації [4].

Тому **метою даної роботи** є доведення відповідності зміни процесів генерації та споживання енергії у системі розосередженої генерації Вінеровському процесу на основі використання принципу невизначеності Гейзенберга та визначення особливостей її роботи із забезпеченням умов стійкості.

Енергія генерації та споживання у системах розосередженої генерації. Застосування принципу невизначеності Гейзенберга до керування потоками енергії у системах розосередженої генерації як на базовому інтервалі, так і на інтервалі спостереження, дозволяє записати наступне обмеження виду:

$$\Delta W_G \cdot \Delta t \cdot \Delta W_C \leq C_W, \quad (1)$$

де ΔW_G , ΔW_C – деякі (наприклад, середньоквадратичні) значення величин енергії генерації та споживання відповідно, які вимірюються або фіксуються з певною точністю, і використовуються для керування; Δt – мінімальне значення інтервалу спостереження, для якого вимірюється значення енергії; величини C_W , як деякі константи, можуть трактуватися як середньоквадратичне відхилення: енергії генерації ΔW_G ; часового інтервалу Δt ; енергії споживання ΔW_C .

Таким чином, обмеження (1) описує деякий об'єм тримірного простору C_w , в якому всі три змінні ΔW_G , ΔW_C , Δt є незалежними векторами (рис. 1).

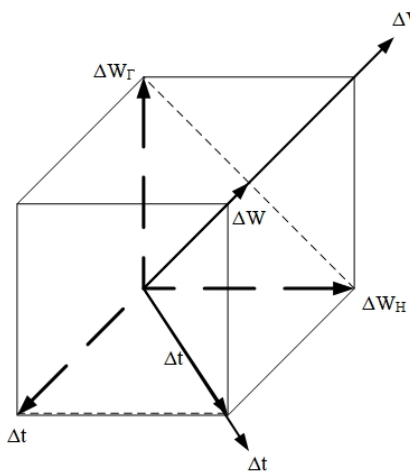


Рис. 1

У точці рівноваги системи, де забезпечується її стабільна робота та відбір максимальної енергії відновлюваних джерел, величина енергії генерації ΔW_G дорівнює величині енергії споживання ΔW_C : $\Delta W_G = \Delta W_C = \Delta W$, і від простору трьох змінних необхідно зробити перехід до простору двох змінних ΔW , Δt шляхом проектування векторів змінних на обрані вісі. Оскільки обидва вектори енергії проектуються на одну вісь, то сумарна проекція дорівнює $\sqrt{2}/2 \Delta W_G + \sqrt{2}/2 \Delta W_H = \sqrt{2} \Delta W$, а проекція на вісь часу, відповідно, $\sqrt{2}/2 \Delta t$. Тобто у просторі двох змінних у точці рівноваги у виразі (1) набуває вигляду $\Delta W \cdot \Delta t \leq C_w$, що відповідає сформульованому принципу невизначеності Гейзенберга.

Якщо перейти до простору трьох змінних, то (1) набуває вигляду

$$\Delta W^2 \cdot \Delta t \leq C_w. \quad (2)$$

Оцінимо фрактальну розмірність системи. Для цього прологарифмуємо (2)

$$\ln \Delta W + 0,5 \ln \Delta t \leq \ln C_w^*, \quad (3)$$

де $C_w^* = \sqrt{C_w}$.

Якщо кількість генераторів у системі збільшити до $(n-1)$, то вираз (3) набуде вигляду

$$\ln \Delta W + \frac{1}{n} \ln \Delta t \leq \ln C_w^*. \quad (4)$$

Перепишемо (4), виділивши доданок $0,5 \ln \Delta t$

$$\ln \Delta W + \frac{1}{n/2} \ln \Delta t + \frac{1}{2} \ln \Delta t \leq \ln C_w^*.$$

Тобто, якою б не була кількість генераторів у системі, у розрахунках присутній доданок $0,5 \ln \Delta t$, який вказує на те, що розмірність системи буде дробовою, і це свідчить про її фрактальну природу.

Повертаючись до степеневій формі запису, вираз (3) за умови $\Delta W_G = \Delta W_C = \Delta W$ набуває вигляду

$$\Delta W \cdot \sqrt{\Delta t} \leq C_w^*. \quad (5)$$

Наявність множника $\sqrt{\Delta t}$ у (5) вказує на те, що описаний процес зміни енергії у системі розосередженої генерації є випадковим блуканням [5]. Оскільки у подальшому досліджується не тренд процесу, а лише його відхилення, то процес вважатимемо Вінеровським з математичним сподіванням рівним нулю та дисперсією рівною одиниці

$$W = \varepsilon \cdot \sqrt{t}, \quad (6)$$

де ε – незалежні нормально розподілені випадкові величини (рис. 2), такі, що $W_1 = f(W_0, t_0, t_1, \varepsilon_1)$, $W_2 = f(W_1, t_1, t_2, \varepsilon_2)$, $W_3 = f(W_2, t_2, t_3, \varepsilon_3)$, ..., де інтервали часу $t_i - t_{i+1}$ є довільними [6].

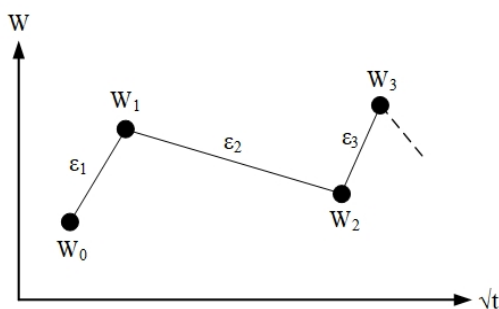


Рис. 2

Оскільки Вінеровський процес є масштабно інваріантним та самоподібним, то для дослідження поведінки системи розосередженої генерації у точці рівноваги A розіб'ємо інтервал спостереження Δt на $n = \lceil \Delta t / \Delta t_{\min} \rceil$ інтервалів, де $\lceil \cdot \rceil$ – ціла частина від ділення, Δt_{\min} – мінімальна тривалість інтервалу спостереження. Від величини ΔW перейдемо до безрозмірної величини $\Delta_w = \Delta W / W_{\max}$, де W_{\max} – максимальне значення енергії в системі розосередженої генерації

ції. Запишемо вирази для величини енергії на n -му та $n+1$ -му інтервалах відповідно до (5)

$$\Delta_w(n) = C_w / \sqrt{n}, \quad \Delta_w(n+1) = C_w / \sqrt{n+1}.$$

Знайдемо першу різницю між цими виразами

$$\Delta(\Delta_w) = \Delta_w(n+1) - \Delta_w(n) = C_w \left(1/\sqrt{n+1} - 1/\sqrt{n} \right).$$

Додавши першу різницю $\Delta(\Delta_w)$ до $\Delta_w(n)$ отримаємо $\Delta_w(n+1) = \Delta_w(n) / \sqrt{n+1}$, тобто загальний вигляд (5) відповідає Вінеровському процесу, представленою у дискретній формі запису.

Для дослідження процесу коливання точки рівноваги системи за наявності Вінеровського процесу скористаємося діаграмою Ламерея [7] та побудуємо його дискретне відображення (рис. 3). На рис. 3 крива 1 відповідає процесу, що описується рівнянням $\Delta_w(n+1) = \Delta_w(n) / \sqrt{n+1}$, а крива 2 –

пропорційній зміні енергії при зміні тривалості інтервалу спостереження.

Як видно з рис. 3, процес зміни енергії є стійким зліва від точки А (переходи В-С-D-E-F-G-H-I-J-K-A, позначені суцільною лінією), і нестійким справа від точки А (переходи В'-С'-D'-E'-F', позначені штриховою лінією). Умова стійкості залежить від знаку похідної у точці А процесу зміни енергії, який є Вінеровським, і викликає коливання системи в околі цієї точки, що може виводити систему із зони стійкої роботи. Враховуючи втрати енергії за рахунок її дисипації, точка А перетворюється в деяку область O_A , і система може не набувати властивостей нестійкості, якщо коливання, обумовлені Вінеровським процесом, не

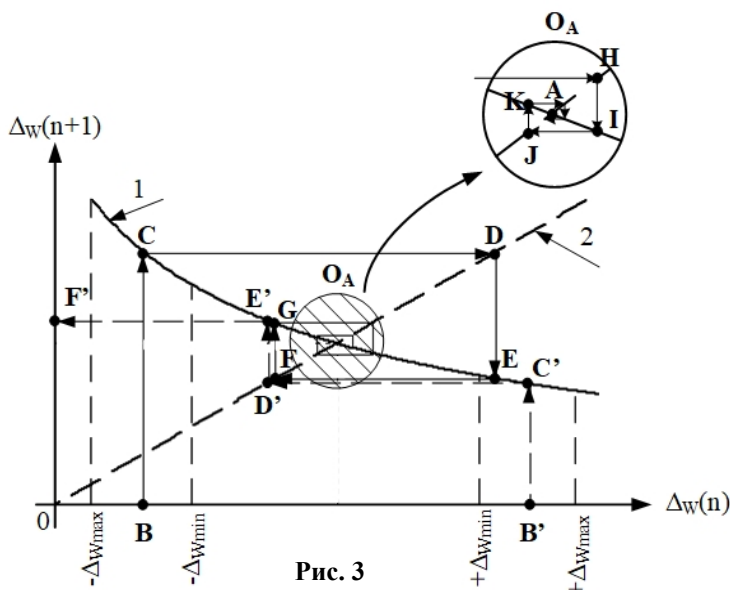


Рис. 3

виходять за область O_A .

Оцінка похідної процесу зміни енергії. Для оцінки стійкості системи розосередженої генерації необхідно оцінити похідну процесу зміни енергії у системі. Для цього скористаємося правилом диференціювання стохастичних процесів. Оскільки цей процес вважаємо Вінеровським, то для його диференціювання використовуємо формулу Іто [8]

$$dF = \left[\frac{\partial F}{\partial t} + a(\Delta_w, t) \frac{\partial F}{\partial \Delta_w} + \frac{1}{2} b^2(\Delta_w, t) \frac{\partial^2 F}{\partial \Delta_w^2} \right] dt + b(\Delta_w, t) \frac{\partial F}{\partial \Delta_w} dw_t, \quad (7)$$

де $F(\Delta_w, t)$ – деяка стохастична функція зміни енергії; Δ_w – випадковий процес зміни енергії; $dw_t = \varepsilon \sqrt{dt}$ – нескінченно малий Вінеровський шум; функція $a(\Delta_w, t)$ – коефіцієнт зносу, що характеризує відхилення центру розподілу процесу; функція $b(\Delta_w, t)$ – коефіцієнт волатильності, квадрат якого $b^2(\Delta_w, t)$ називають дифузією, що характеризує швидкість зміни дисперсії процесу.

За відсутності стохастики диференціал функції $F(\Delta_w, t)$, в яку підставили рішення $\Delta_w = \Delta_w(t)$ рівняння $d\Delta_w = a(\Delta_w, t) dt$, має вигляд

$$dF = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial \Delta_w} d\Delta_w = \left(\frac{\partial F}{\partial t} + a(\Delta_w, t) \frac{\partial F}{\partial \Delta_w} \right) dt. \quad (8)$$

На відміну від цього співвідношення, в детерміновану частину рівняння (7) входить функція дифузії та друга похідна по Δ_w . Ці доданки впливають на нерівномірність рішення, тим самим збільшуючи імовірність виходу системи із зони стійкої роботи. Тобто, зміна середньоквадратичного відхилення та амплітуди коливань Вінеровського процесу у часі впливає на стійкість системи.

Оцінка величини відхилення системи. Оскільки похідна процесу зміни енергії в точці A залежить від змінних Вінеровського процесу, то доцільно оцінити величину мінімального та максимального відхилення системи від точки спокою. За властивістю Вінеровського процесу він є недиференційованим, але для опису його геометричних властивостей можна застосувати закон повторного логарифму і визначити верхню F_1 та нижню F_2 границі для траєкторій процесу [9]

$$F_1 = (1 + \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln \Delta_t)^{-1/2}, \quad F_2 = (1 - \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln \Delta_t)^{-1/2}. \quad (9, 10)$$

Траєкторія Вінеровського процесу, починаючи з деякого моменту часу на деякому інтервалі Δt , майже напевно, з імовірністю, що дорівнює одиниці, знаходиться у області, яка обмежена кривими $(F_1, -F_1)$, і в той же час виходить за межі області $(F_2, -F_2)$. В околі нуля Вінеровський процес веде себе схожим чином за локальним законом повторного логарифму, що призводить до розміщення його траєкторій з зонах $(F'_1, -F'_1)$ та $(F'_2, -F'_2)$ та переходу до змінної $(\Delta_t)^{-1}$

$$F'_1 = (1 + \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln(1/\Delta_t))^{-1/2}, \quad F'_2 = (1 - \xi) w_t (2\Delta_t \ln \ln(1/\Delta_t))^{-1/2}.$$

Отже, на інтервалі спостереження Δt максимальне та мінімальне відхилення коливаний Вінеровського процесу описується прямими $F'_1, -F'_1$ та $F'_2, -F'_2$ (рис. 4).

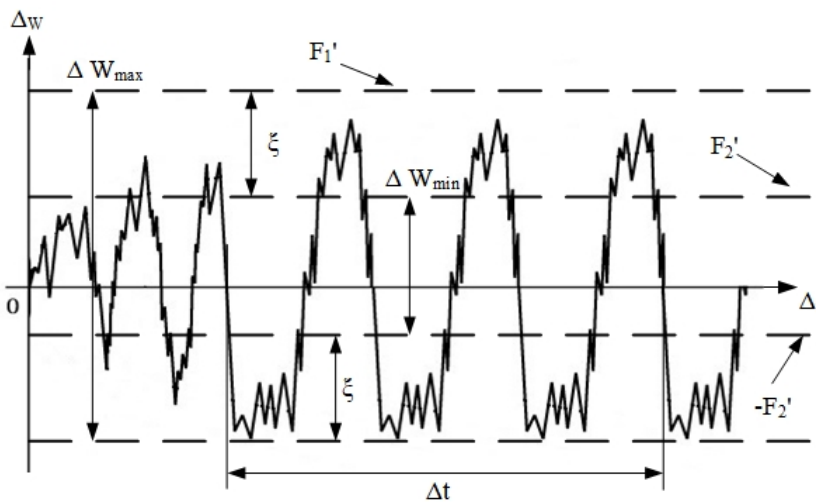


Рис. 4

стійкого стану у нестійкий хаотичним чином.

Застосовуючи описані міркування до даних зміни енергії на виході сонячних панелей, отриманих з лабораторії LARES [10] (Загребський університет, м. Загреб, Хорватія), бачимо, що 67% даних більше нуля знаходяться в межах $(4 \div 7)$ відносних одиниць енергії і 53% даних менше нуля знаходяться у межах $(-2 \div -5)$ відносних одиниць енергії (рис. 5), що підтверджує знаходження траєкторій Вінеровського процесу з імовірністю близькою до одиниці у певних зонах.

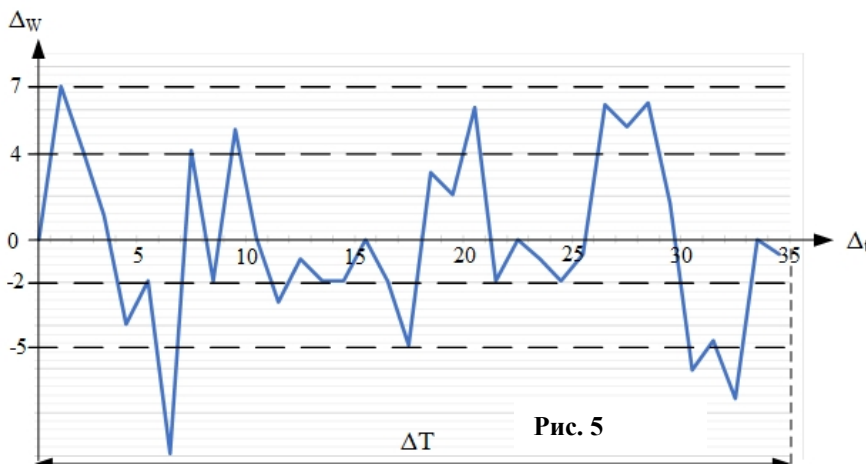


Рис. 5

З імовірністю, що дорівнює одиниці, коливання енергії в системі перевищують рівень $\pm \Delta W_{\min}$, але не перевищують рівень $\pm \Delta W_{\max}$. При відхиленні більше ніж на $+\Delta W_{\max}$, $+\Delta W_{\min}$ система стає нестійкою (рис. 3). Параметр ξ трактується як довірчий інтервал зміни рівня енергії, наприклад 3σ при нормальному законі розподілу. З рис. 3 видно, що процес зміни енергії у системах розосередженої генерації на всьому інтервалі спостереження є нестійким, абсолютного балансу енергії в системі немає, а система може переходити зі

Оскільки в останні десятиліття знижуються втрати енергії у системах розосередженої генерації та підвищується їхня ефективність, що зменшує радіус області O_A , зростає імовірність виходу таких систем з зони стійкої роботи та виникнення аварійних режимів. Для зниження впливу флуктуацій процесу зміни енергії, що пов'язані зі зміною навантаження або рівня енергії,

що генерується відновлюваними джерелами, необхідно у системах розосередженої генерації встановлювати накопичувачі енергії, які б компенсували зміну енергії в діапазоні $\Delta W_{\min} \div \Delta W_{\max}$ до величини, меншої ніж радіус області O_A (рис. 3).

У цьому разі швидкість спрацьовування системи керування накопичувачем повинна бути хоча б на один порядок вище, ніж частота флуктуацій. Нехтування необхідністю зменшення флуктуацій випадкових процесів генерації та споживання енергії у системах розосередженої генерації призводить до того, що у системах керування заздалегідь присутній нестійкий блок, що, як правило, не враховується при розрахунку стійкості загальної замкненої системи.

Схеми включення накопичувачів у системах розосередженої генерації є різноманітними та загальновідомими [11], однак на етапі проектування системи при розрахунку ємності накопичувача необхідно враховувати, що він має бути недозаряджений на величину $\xi \cdot p_\varepsilon$, де p_ε – імовірність знаходження значень енергії в системі в межах $\pm(\Delta W_{\max} - \Delta W_{\min})$.

Моделювання процесів у системі розосередженої генерації. Для підтвердження теоретичних викладок досліджено електромагнітні процеси у системі розосередженої генерації, що складається з сонячної батареї, яка представлена еквівалентним джерелом напруги з внутрішнім опором (рис. 6), та широтно-імпульсного перетворювача (ШІП), що включений на її виході для забезпечення роботи у режимі відбору максимальної енергії за умови підключення випадковим чином додаткового активного навантаження. Дослідження проведено за допомогою програмного пакету Matlab R2017a Simulink[®] у точці, близькій до точки рівноваги, в якій $R_{вн} \approx R_n = 0,975$ Ом. Зазначимо, що за відсутності додаткового навантаження система є стійкою та автоколивання відсутні.

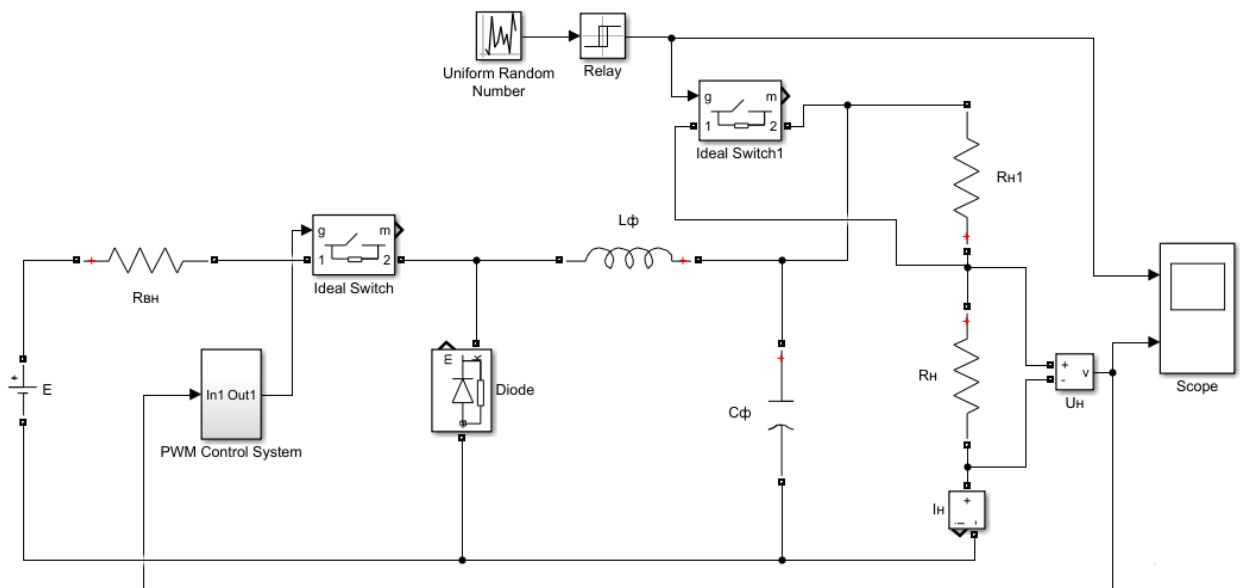


Рис. 6

Модель, зображена на рис. 6, містить наступні елементи: $E = 10$ В – еквівалентне джерело напруги з внутрішнім опором $R_{вн} = 1$ Ом; Ideal Switch – ключ ШІП; $R_n = 0,975$ Ом – активне навантаження; Ideal Switch1 – ключ, що підключає додаткове активне навантаження $R_{н1} = 0,05$ Ом випадковим чином; Diode – напівпровідниковий діод; $L_\phi = 1$ мГн, $C_\phi = 1$ мФ – індуктивність та ємність фільтра; PWM Control System – система керування широтно-імпульсним перетворювачем зі стабілізацією вихідної напруги, схему моделі якої наведено на рис. 7; Uniform Random Number – генератор випадкової послідовності; Relay – релейний блок; I_n , U_n – вимірювачі миттєвих значень струму та напруги на навантаженні відповідно; Scope – блок для спостереження зміни напруги на навантаженні та імпульсів керування ключем додаткового навантаження.

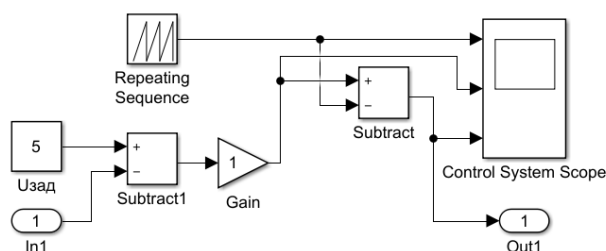


Рис. 7

Модель реалізує ШІМ II роду з опорною пилкоподібною напругою. На рис. 7 позначено:

Модель реалізує ШІМ II роду з опорною пилкоподібною напругою. На рис. 7 позначено:

$U_{зад} = 5$ – задаюче значення напруги; In1 – сигнал зворотнього зв'язку; Out1 – керуючий сигнал; Subtract – елемент віднімання; Gain – ланка підсилення; Repeating Sequence – генератор пилоподібною напруги з амплітудним значенням $U_{ГПН}=2,5$ В та періодом $T=10$ мкс; Control System Scope – блок для спостереження зміни напруги ГПН, сигналу похибки та результату порівняння.

Часові залежності напруги та струму на навантаженні із значенням коефіцієнта підсилення у колі зворотнього зв'язку $K = 1$, отримані в результаті моделювання, та імпульси керування ключем додаткового навантаження наведено на рис. 8.

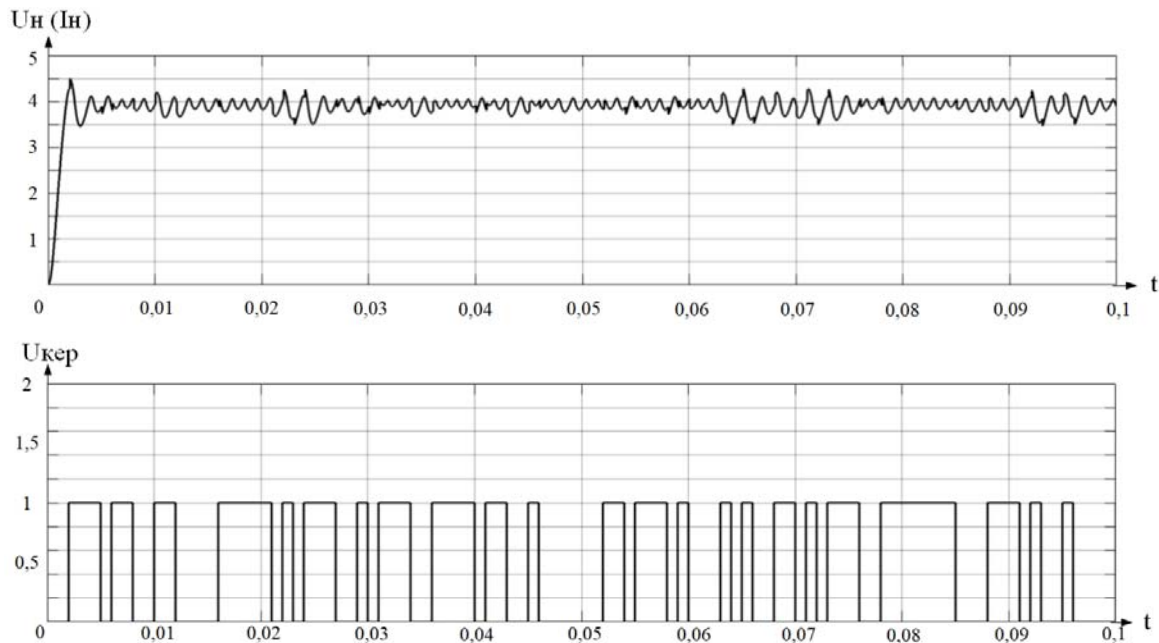


Рис. 8

Видно, що з підключенням випадковим чином додаткового активного навантаження, система переходить до режиму нестійкої роботи. Переведення системи у режим стійкої роботи можливе шляхом підключення паралельно навантаженню накопичувача з перетворювачем заряд/розряд.

Висновок. У разі випадкового характеру підключення навантаження або зміни потужності джерела енергії на інтервалі спостереження флуктуації електромагнітних процесів у системі розосередженої генерації відповідають Вінеровському процесу, що переводить систему до режиму нестійкої роботи. Для підтримання стійкої роботи таких систем необхідно мати деякий заздалегідь відомий додатковий запас величини енергії, що визначається відповідно до закону повторного логарифму і використовується у разі підключення навантаження або зміни потужності вхідного джерела енергії. Відмітимо, що встановлення будь-якого накопичувача повністю не компенсує процес зміни енергії, що відповідає Вінеровському, але суттєво зменшує його вплив, що дозволяє більш ефективно використовувати енергію відновлюваних джерел.

1. Жуйков В.Я., Лук'яненко Л.М., Миколаєць Д.А., Осипенко К.С., Стелюк А.О., Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С. Підвищення ефективності систем з відновлюваними джерелами енергії. К.: Кафедра, 2018. 368 с.

2. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних енергетичних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 50-52.

3. Жуйков В.Я., Осипенко К.С. Принцип невизначеності Гейзенберга при оцінці рівня енергії, що генерується відновлюваними джерелами. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 1. С. 10-16.

DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.01.010>

4. Жуйков В.Я., Осипенко К.С. Оцінка фрактальної розмірності та передавальної функції хмар. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2017. Том 22. № 5. С. 13-19.

5. Бородин А.Н., Салминен Пааво. Справочник по броуновскому движению: факты и формулы. Санкт-Петербург: Лань, 2000. 639 с.

6. Измерения с помощью анализаторов качества электроэнергии.

URL: <http://khomovelectro.ru/articles/izmereniya-s-pomoshchyu-analizatorov-kachestva-elektroenergii.html> (дата звернення: 18.10.2019).

7. Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. М.: Янус-К, 2002. 284 с.

8. Кузнецов Д.Ф. Некоторые вопросы теории численного решения стохастических дифференциальных уравнений. URL: <http://diffjournal.spbu.ru/pdf/j011.pdf> (дата звернення: 18.10.2019).
9. Булинский А.В., Ширяев А.Н. Теория случайных процессов. М.: Физматлит, 2005. 408 с.
10. Лабораторія відновлюваних джерел енергії. URL: <https://www.lares.fer.hr/> (дата звернення: 18.10.2019).
11. Marcelo G. Molina. Distributed energy storage systems for applications in future smart grids. Sixth IEEE/PES *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*. Montevideo, Uruguay, September 3-5, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319051>

УДК 621.314

ВЛИЯНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ

Е.С. Клён, канд. техн. наук, В.Я. Жуйков, докт. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина e-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

Приведены формулы для расчета процесса изменения энергии в системах распределенной генерации с учетом его случайного характера в пространстве двух и трех переменных. Представлены график дискретного отображения процесса изменения энергии и диаграмма Ламерея для исследования устойчивости этого процесса. Отмечено, что из-за случайного характера процесса изменения энергии система может выходить из зоны устойчивой работы. Приведена методика нахождения дифференциала случайного процесса с Винеровской составляющей по формуле Ито. Представлена методика применения закона повторного логарифма к Винеровскому процессу и приведены графики его типичных траекторий как на всем интервале наблюдения, так и в окрестности нуля. Обоснована необходимость применения в системах распределенной генерации накопителей энергии для обеспечения их устойчивой работы. Библ. 11, рис. 8.

Ключевые слова: системы распределенной генерации, принцип неопределенности Гейзенберга, накопитель, случайные процессы

THE INFLUENCE OF STOCHASTIC ENERGY CHARACTER IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS ON THEIR STABILITY

K.S. Klen, V.Ya. Zhuikov

National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Ave. 37, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: ekateryna.osypenko@gmail.com

Formulas for calculating the process of energy change, taking into account its random nature, in the space of two and three variables in distributed systems are given. A graph of a discrete mapping of the energy change process and a Lameri diagram are presented to investigate the stability of this process. It is noted that due to the stochastic nature of the energy change process, the system can leave the steady-state zone. The method of finding the differential of a random process with the Wiener component according to the Ito formula is presented. The technique of applying the law of the iterated logarithm to the Wiener process is presented, and graphs of its typical trajectories are shown both at the entire observation interval and around zero. The necessity of application in distributed generation systems the energy storage for ensuring their stable operation is substantiated. References 11, figures 8.

Key-words: distributed generation systems, Heisenberg's uncertainty principle, storage battery, stochastic processes

1. Zhuikov V.Ya., Lukyanenko L.M., Mikolajets D.A., Osypenko K.S., Stelyuk A.O., Tereshenko T.O., Yamnenko Yu.S. Improving the efficiency of renewable energy systems. Kyiv: Kafedra, 2018. 368 p. (Ukr)
2. Stognij B.S., Kyrylenko O.V., Prahovnyk A.V., Denisyuk S.P. The evolution of smart grids and their prospects in Ukraine. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 5. Pp. 50-52. (Ukr)
3. Zhuikov V.Ya., Osypenko K.S. Heisenberg uncertainty principle in estimating energy levels generated by renewable energy sources. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 1. Pp. 10-16. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.01.010>
4. Zhuikov V.Ya., Osypenko K.S. Estimation of fractal dimension and transfer function of clouds. *Mikrosistemy, elektronika ta akustyka*. 2017. Vol. 22. No 5. Pp. 13-19. (Ukr)
5. Borodin A.N., Salminen Paavo. The Brownian Movement Handbook: Facts and Formulas. Saint-Petersburg: Lan, 2000. 639 p. (Rus)
6. Measurements using power quality analyzers. URL: <http://khomovelectro.ru/articles/izmereniya-s-pomoshchyu-analizatorov-kachestva-elektroenergii.html> (accessed: 18.10.2019). (Rus)
7. Klymontovych Yu.L. Introduction to Open Systems Physics. Moskva: Yanus-K, 2002. 284 p. (Rus)
8. Kuznetsov D.F. Some questions of the theory of numerical solution of stochastic Ito differential equations. URL: <http://diffjournal.spbu.ru/pdf/j011.pdf> (accessed: 18.10.2019). (Rus)
9. Bulynskiy A.V., Shyryaev A.N. Theory of random processes. Moskva: Fizmatlit, 2005. 408 p. (Rus)
10. Laboratory of renewable energy sources. URL: <https://www.lares.fer.hr/> (Accessed 18.10.2019).
11. Marcelo G. Molina. Distributed energy storage systems for applications in future smart grids. Sixth IEEE/PES *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*. Montevideo, Uruguay, September 3-5, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319051>

Надійшла 17.10.2019
Остаточний варіант 17.02.2020