

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.314:657

В.Я. Жуйков, д-р. техн. наук, проф.,
І.Ю. Бойко, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ ЛІНЕАРИЗОВАНОЇ ЕЛЕКТРО – ВАРТІСНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ІЗОЛЬОВАНІЙ ГЕНЕРУЮЧІЙ СИСТЕМІ

На основі положень сучасної економічної теорії, приймаючи концепцію «електроенергія – це товар» та враховуючи динамічну зміну електротехнічних параметрів генератора було створено нелінійну динамічну електро-вартісну модель ізольованої електротехнічної системи із дизель-генератором. Однак при незначному відхиленні параметрів від деякого статичного значення можна дослідити перехідні процеси, використовуючи лінеаризовану модель. У статті розглянуто приклад ізольованої системи, що складається із дизельного генератора та споживача. Отримана у результаті лінеаризації математична модель дозволяє досліджувати вплив економічних параметрів на характер перехідного процесу ізольованої системи при зміні рівня потужності генератора.

Ключові слова: Smart Grid; ізольована система; лінеаризована електро-вартісна модель; рівняння Фішера.

Вступ. Інноваційний шлях розвитку електроенергетики провідних країн світу реалізується за рахунок положень концепції Smart Grid, зокрема, сучасних енергетичних та інформаційно-комунікаційних технологій, розосереджених джерел енергії, комплексних систем і сервісів інтелектуальної енергетики, побудованих на відкритій мережевій архітектурі з використанням інформаційно-комунікаційних технологій [1, 2]. Необхідність вироблення концепції Smart Grid розвитку електроенергетики обумовлена як необхідністю економічного зростання, нерозривно пов'язаного зі зростанням обсягів енергоспоживання, підвищенням вимог до якості електроенергії та рівня надійності енергопостачання (якості енергопостачання), так і з істотними обмеженнями технологічного, економічного та екологічного планів.

На сьогодні фахівці визначають два статуси поняття «електроенергії» як базового елемента концепції Smart Grid: електроенергія – це товар (продукт); електроенергія – це одна з складових кінцевого продукту / послуги (світло, тепло, зв'язок тощо) [3]. Вибір того чи іншого трактування поняття «електроенергії» визначає ціннісну складову електроенергії як предмета товарно-ринкових відносин, а також можливі варіанти розвитку цих відносин та технологій, що підтримують ці відносини. Надалі будемо розглядати електроенергію як товар, яким можна торгувати. Цілком закономірним у цьому випадку є розвиток технологій торгівлі, зокрема, біржева торгівля, ф'ючерси, опціони, страховий ринок тощо.

У цьому випадку надійність і ефективність роботи електроенергетичних та електротехнічних систем і ключова роль оперативного-диспетчерського керування не піддається сумніву. При прийнятті концепції «електроенергія – товар» до ключових аспектів розвитку концепції Smart Grid можна віднести [3]:

1) облік електроенергії (як і в будь-яких товарно-грошових відносинах здійснюється облік товару від стадії виробництва до стадії споживання; необхідність врахування кількості, якості, характеру походження товару);

2) зберігання електроенергії (більшість товарів від стадії виробництва до стадії споживання проходять етапи зберігання; електроенергія в цьому плані не має бути виключенням);

3) надійний, гнучкий високошвидкісний зв'язок між споживачем і постачальником;

4) широкий спектр первинних енергоресурсів для виробництва електроенергії, а також методів виробництва (для сталого розвитку ринкових відносин і можливості формування більш гнучких пропозицій як за ціною, так і за характером постачання електроенергії повинні бути доступні широкі можливості щодо використання різних типів джерел генерації);

5) надійна поставка електроенергії (використання всього спектру технологічних рішень: силове обладнання, засоби автоматизації тощо), які сприяють надійному гарантованому постачанню товару – електроенергії;

б) розвинена інфраструктура, сервіси: (продаж, збут, зокрема, біржа, фінансові інструменти); страхування, наприклад, від збоїв у електропостачанні або поганій якості електроенергії; обслуговування.

Впровадження технологій Smart Grid наразі дозволяє у реальному часі оцінювати попит і пропозицію, а також швидко регулювати електротехнічні параметри генеруючої системи [1, 2]. Інтелектуальні сенсорні технології дають можливість постачати електроенергію більш ефективно за допомогою динамічного аналізу попиту і пропозиції на цей вид товару. Використання інтелектуальних систем дає змогу корегувати тарифну ціну відповідно до використання електроенергії в режимі реального часу.

Для локальних генеруючих систем актуальними є розробка та застосування моделей динамічної тарифікації, що включатимуть наявність перехідних процесів при зміні режимів роботи генератора та їх вплив на відхилення реальних значень економічних параметрів системи. Динамічний вплив електротехнічних параметрів генеруючої системи на економічні є визначним фактором для впровадження динамічної тарифікації у режимі реального часу.

Хоча наразі обладнання та можливості програмної реалізації для цього завдання легко доступні, теоретичні моделі досі потребують подальшого розвитку. Тому актуальним є створення динамічної математичної моделі, що дозволить дослідити вплив електротехнічних параметрів системи на економічні, при наявності перехідних процесів.

Мета та завдання дослідження. Враховуючи вплив тривалості та характеру перехідних процесів на відхилення реальних витрат пального та якості виробленої енергії, наступним актуальним завданням є дослідження впливу параметрів генеруючої системи із дизель-генератором на характеристики перехідних процесів. При досить незначному відхиленні параметрів від деякого статичного значення можна дослідити перехідні процеси, використовуючи математичну модель генеруючої системи, створену на основі лінійних диференційних рівнянь.

Динамічна електро-вартісна модель ізольованої енергогенеруючої системи. Систему «виробник – споживач електроенергії» схематично представлено на рис.1 як замкнену макроекономічну систему [3], яка поєднує динамічну та економічну частини ізольованої системи.

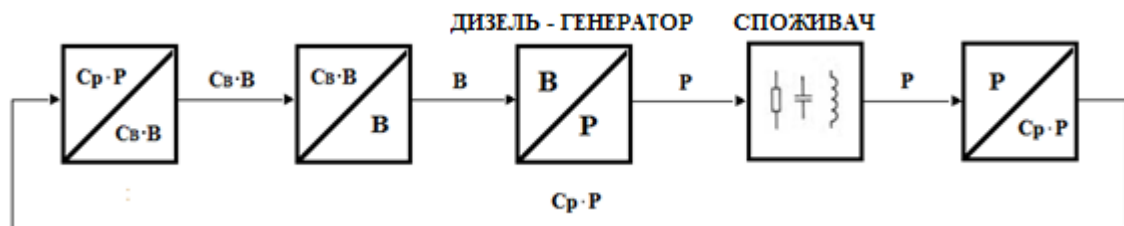


Рисунок 1 – Замкнена макроекономічна система

Споживач отримує певний обсяг електроенергії $P \cdot T$, за яку сплачує її вартість $K_P = C_P \cdot P \cdot T$, де C_P , [грн / Вт · с] – ціна одиниці електроенергії. Певна кількість сплачених коштів $K_B = C_B \cdot B$ витрачається на закупівлю пального у кількості B , де C_B – ціна одиниці пального. Економічну складову наведеної системи доцільно розглядати як замкнену макроекономічну систему, баланс якої описується рівнянням Фішера [4]: $M \cdot V = C \cdot Q$, де M – грошова маса, що робить один оберт за час T_V , [грн], $V = T / T_V$ – швидкість обороту коштів, тобто кількість обертів грошової маси M за певний період часу T , C та Q – ціна одиниці продукції та кількість продукції відповідно. Для генеруючої системи рівняння Фішера матиме вигляд:

$$M \cdot V = K_B + K_P.$$

Швидкість обороту залежить від обсягів економічної активності при заданій грошовій масі. Якщо інтервал часу заявлений, швидкість може бути представлена числом. В іншому випадку показник повинен бути заданий у формі числа за період часу [5]. Для розробки математичної моделі динамічної тарифікації доцільно розглядати інтервал часу T як одну секунду. У такому випадку $K_P = C_P \cdot P \cdot 1c = C_P \cdot P$, з урахуванням того що C_P має нову розмірність [грн/Вт]. Кількість коштів, що витрачається на закупівлю пального, розраховується як певна частина отриманих коштів за вироблену енергію, через коефіцієнт β , обернено пропорційний прибутку системи. У такому разі $M \cdot V = K_P \cdot \beta + K_P$.

Прийнявши зміну тарифної ціни як ΔC_P та враховуючи, що $\Delta C_P = \frac{dC_P}{dt} \cdot \Delta t$ при достатньо малому значенні Δt [6], отримано рівняння:

$$\frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V}{P} - C_P \cdot (1 + \beta) - \Delta B_P \cdot C_B \quad (1),$$

яке описує динамічну зміну C_P в залежності від потужності, що забезпечує посекундну тарифікацію при $\Delta t = 1$ сек. Величина ΔB_P – кількість пального, необхідна для переходу генератора на новий, заданий рівень потужності.

Рівняння, що відображає зміну потужності для дизельного генератора, можна отримати аналогічним чином із виразу для перетворення потужності згораючого пального у вироблену потужність. Із виразу для ККД дизель-генератора отримаємо наступне співвідношення:

$$\frac{P}{\tau} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot P_T,$$

де η_B – ККД генератора; τ – стала часу генератора; P_T – потужність згораючого пального. Приймавши приріст потужності за одну секунду як $\frac{\Delta P}{\Delta t}$ та виразивши потужність згораючого пального через його кількість B , отримаємо:

$$\frac{P}{\tau} + \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B,$$

де γ – коефіцієнт перетворення пального у вироблену потужність. Замінивши різницею вираз на похідну отримаємо рівняння приросту потужності для дизельного генератора:

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B}{\tau} \cdot \gamma \cdot B. \quad (2),$$

Рівняння (1) та (2) складають динамічну електро - вартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи:

$$\begin{cases} \frac{dC_P}{dt} = \frac{M \cdot V}{P} - C_P \cdot (1 + \beta) - \Delta K_B; \\ \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot (\beta \cdot C_P \cdot P)}{\tau \cdot C_B} + \Delta P_\tau, \end{cases} \quad (3),$$

у якій $\Delta K_B = \Delta B_P \cdot C_B$ та $\Delta P_\tau = \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \Delta B}{\tau}$ – відповідно впливи, що задають величину динамічного

приросту тарифної ціни та потужності генератора. Отримана математична модель поєднує електротехнічні та економічні параметри ізольованої енергогенеруючої системи із дизель-генератором та дозволяє розраховувати динамічну зміну тарифної ціни при зміні рівня генерованої потужності [7 – 9].

Перехідні процеси, що виникають під час зміни режимів роботи генератора, мають суттєвий вплив на економічні параметри ізольованої системи. При незначному відхиленні виробленої потужності P від деякого статичного значення можна розглядати перехідні процеси в системі у малому, виконавши перехід від нелінійних диференціальних рівнянь до лінеаризованих у околі певного значення часу. Лінеаризація отриманої раніше системи дозволяє отримати характеристичні рівняння, за допомогою яких можна дослідити вплив ключових параметрів системи на характер перехідних процесів.

Дослідження характеру перехідних процесів у малому. Для спрощення системи була виконана заміна:

$$M \cdot V = A; \quad 1 + \beta = B; \quad \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B} = F; .$$

Тоді система для динамічно-вартісної моделі набуває вигляду:

$$\begin{cases} \frac{dC_P}{dt} = \frac{A}{P} - C_P \cdot B - \Delta K_B \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = -\frac{P}{\tau} + C_P \cdot P \cdot F + \Delta P_\tau. \end{cases} \quad (5)$$

При розкладенні нелінійностей в околі певної точки t_0 у ряд Тейлора, з урахуванням лише лінійних складових ряду, отримано:

$$C_P \cdot P = a \cdot C_P + b \cdot P, \text{ де } a, b - \text{ константи, } \frac{1}{P} = \frac{1}{t_0} - \frac{P - t_0}{t_0^2}.$$

Із рівняння (5) системи, з урахуванням проведених заміни та розкладання нелінійностей, отримаємо:

$$\frac{dP}{dt} = a \cdot F \cdot C_P + b \cdot F \cdot P - \frac{P}{\tau} + \Delta P_\tau,$$

$$\text{звідки } C_P = \frac{\frac{dP}{dt} + \frac{P}{\tau} - \Delta P_\tau - b \cdot F \cdot P}{a \cdot F}. \quad (6)$$

Здійснивши перехід до $\frac{dC_P}{dt} = \frac{d^2P}{dt^2} \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F}\right) + \frac{1}{\tau \cdot a \cdot F} - \frac{b}{a}$ та підставляючи вираз для C_P та

$\frac{dC_P}{dt}$ у рівняння (4), отримаємо лінійне диференційне рівняння другого порядку

$$\frac{d^2Y}{dt^2} \cdot a_1 + \frac{dY}{dt} \cdot a_2 + Y \cdot a_3 + a_4 = 0,$$

розв'язавши яке відносно P , отримаємо корені характеристичного рівняння

$$\lambda_{1,2} = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3}}{2 \cdot a_1} \quad (7)$$

Продиферинціювавши вираз для P та підставивши отримані значення P та $\frac{dP}{dt}$ у рівняння (6), отримаємо:

$$C_P = C_1 \cdot \left(\frac{\lambda_1}{a \cdot F} + \frac{1}{a \cdot \tau \cdot F} - \frac{b}{a}\right) \cdot e^{t \cdot \lambda_1} + C_2 \cdot \left(\frac{\lambda_2}{a \cdot F} + \frac{1}{a \cdot \tau \cdot F} - \frac{b}{a}\right) \cdot e^{t \cdot \lambda_2} - \left(\frac{a_4}{\tau \cdot a_3 \cdot a \cdot F} + \frac{\Delta P_\tau}{a \cdot F} - \frac{b \cdot F \cdot a_4}{a_3 \cdot a \cdot F}\right).$$

Дане рівняння необхідно сприймати як оцінку впливу електротехнічних параметрів системи на можливе відхилення тарифної ціни, що може бути використана власником генеруючої системи для зміни поточного тарифу.

Для порівняння лінеаризованої динамічної моделі та нелінійної було виконано симуляцію перехідних процесів у системі за допомогою нелінійної моделі. Параметри системи наведені у таблиці 1, результати моделювання показано на рис. 2.

Таблиця 1 – Параметри системи

| Параметр | M | V | P_0 | C_{P0} | β | ΔB | C_B | η_B | γ | τ |
|-----------|-------------|-----|-----------|--------------|---------|------------|-------------|----------|----------|--------|
| Випадок 1 | 1000 грн | 10 | 500 Вт | 10 грн/Вт | 1 | 0 л | 50 грн/л | 0,5 | 1 Вт/л | 15 с |

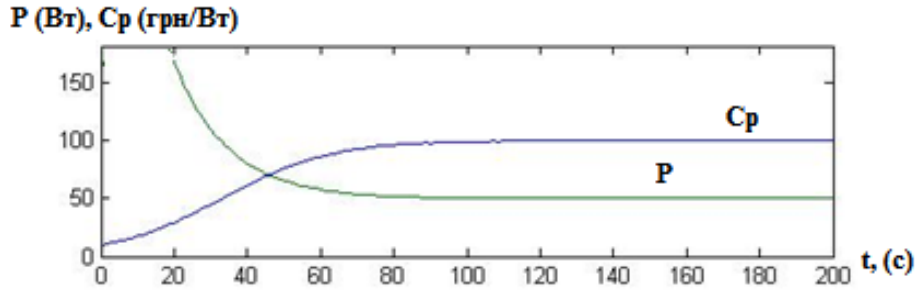


Рисунок 2 – Перехідні процеси у динамічній моделі

Лінеаризація диференціальних рівнянь виконана у околі трьох точок, обраних на початку, середині та після завершення перехідного процесу. У результаті розв'язання рівнянь отримані наступні дійсні корені, що визначають експоненційно затухаючий перехідний процес при відповідних параметрах:

$t_{01} = 20$ с: $\lambda_1 = -0.7840$, $\lambda_2 = -1.2160$; $t_{02} = 80$ с: $\lambda_1 = -0.0901$, $\lambda_2 = -1.9099$; $t_{03} = 140$ с: $\lambda_1 = -0.0710$, $\lambda_2 = -1.9290$.

Результати моделювання, наведені на рис. 2, підтверджують відповідний характер перехідного процесу.

За допомогою отриманих рівнянь визначаються параметри системи, що призводять до виникнення коливань у перехідному процесі. Наявність коливань може призвести до додаткових витрат пального а також відхилення реальних електротехнічних та економічних параметрів системи від прогнозованих. Необхідно правильно оцінити вплив зміни економічних параметрів на коливання у перехідному процесі. Відомо, що комплексно-спряжені корені характеристичного рівняння відповідають експоненційному перехідному процесу із коливальними складовими. Із рівняння (7) видно, що для наявності комплексних коренів дискримінант $D = a_2^2 - 4 \cdot a_1 \cdot a_3$ повинен бути меншим нуля. Повертаючись до попередніх замін:

$$\left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F} \cdot \left(\frac{B}{a \cdot F \cdot \tau} - \frac{b \cdot B}{a} + \frac{A}{t_0^2}\right)\right) < 0 ;$$

$$\left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{1}{a \cdot F} \cdot \left(\frac{B}{a \cdot F \cdot \tau} - \frac{b \cdot B}{a} + \frac{A}{t_0^2}\right)\right) = \left(\frac{B}{a \cdot F}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{B \cdot t_0^2 - b \cdot B \cdot F \cdot \tau \cdot t_0^2 + A \cdot a \cdot F \cdot \tau}{(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2}\right) =$$

$$= \frac{B^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 - 4 \cdot B \cdot t_0 + 4 \cdot b \cdot B \cdot F \cdot \tau \cdot t_0^2 - 4 \cdot A \cdot a \cdot F \cdot \tau}{(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2}$$

Враховуючи, що $(a \cdot F)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 = \left(a \cdot \frac{\eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{\tau \cdot C_B}\right)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 > 0$, маємо:

$$(1 + \beta)^2 \cdot \tau \cdot t_0^2 + \frac{4 \cdot b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta \cdot t_0^2}{C_B} < 4 \cdot (1 + \beta) \cdot t_0 + \frac{4 \cdot M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{C_B} \quad (8)$$

При виконанні зазначеної умови корені характеристичного рівняння є комплексними. Із нерівності (8) отримано вираз для максимальної величини конкретних економічних параметрів системи, перевищення якої призведе до наявності коливань у перехідному процесі.

Одними із суттєвих параметрів, що мають безпосередній вплив на електро-вартісну модель енергогенеруючої системи є грошова маса M та оборотність V . Приймавши M_{\max} як максимально допустиму величину грошової маси, при якій дискримінант $D = 0$ та перехідний процес ще залишається експоненційно затухаючим отримано:

$$M_{\max} = \frac{(1 + \beta) \cdot t_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1 + \beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}$$

Аналогічним чином можна отримати рівняння для граничного значення оборотності коштів V . Так, із нерівності (8) отримано максимально допустиму величину оборотності V_{\max} :

$$V_{\max} = \frac{(1 + \beta) \cdot t_0^2 \cdot (\tau \cdot C_B \cdot (1 + \beta) + 4 \cdot b \cdot \beta \cdot \eta_B \cdot \gamma - 4 \cdot C_B)}{4 \cdot M \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}$$

Для системи із параметрами, наведеними у табл. 1 отримаємо:

$$M_{\max} = 1056 \text{ грн.}, \text{ для випадку лінеаризації у околі точки } t_0 = 20 \text{ с.}$$

При перевищенні цієї величини корені характеристичного рівняння є комплексними. Наприклад, прийнявши грошову масу $M = 2000$ грн., отримано корені характеристичного рівняння $\lambda_1 = -1.0000 + 0.8869i$, $\lambda_2 = -1.0000 - 0.8869i$. Перехідний процес зміни величини P має вигляд, наведений на рис. 3.

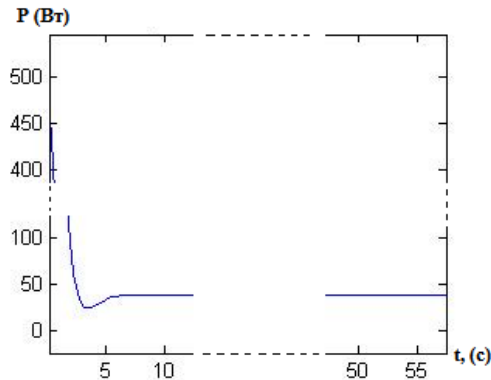


Рисунок 3 – Перехідний процес рівня потужності

Із отриманого результату моделювання випливає, що зростання кількості коливань в системі призводить до незапланованих витрат пального. Це, в свою чергу, погіршує ефективність роботи системи, оскільки тарифна ціна повинна бути скоригована відповідно.

У випадку, коли параметри системи не дозволяють повністю позбутися коливань у перехідному процесі, доцільним є зменшення коливальності. Критерій коливальності μ для випадку двох комплексно спряжених коренів визначається таким чином:

$$\mu = \frac{|\text{Im}(\lambda_1)|}{|\text{Re}(\lambda_1)|}$$

При зростанні величини μ зростає коливальність системи.

$$\lambda_1 = \frac{-(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B) + \sqrt{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1 + \beta) - b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2})}}{2},$$

$$\text{Re}(\lambda_1) = \frac{-(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)}{2},$$

$$\text{Im}(\lambda_1) = \frac{\sqrt{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1 + \beta) - b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2})}}{2}. \quad (9)$$

Вважатимемо параметри β , τ та C_B сталими, позаяк змінювати їх під час роботи системи не має можливості. Із рівняння (9) видно, що зниження економічних параметрів, а саме грошової маси M або оборотності V , викличе зменшення уявної частини комплексного кореня. А це, в свою чергу, призведе до зменшення коливальності перехідного процесу і відповідного зменшення витрат палива.

Для демонстрації впливу збільшення величини грошової маси M на зростання коливань перехідного процесу було проведено моделювання із параметрами $M = 1500$ грн (рис. 4, випадок 1) та $M = 5000$ грн (рис. 4, випадок 2).

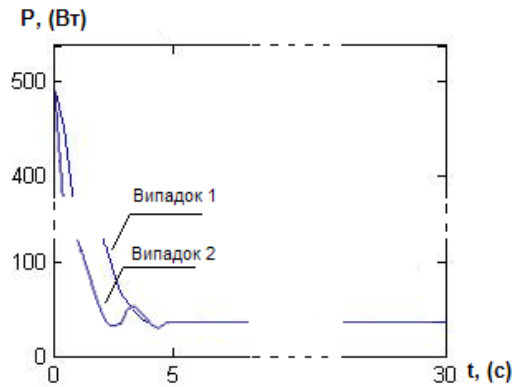


Рисунок 4 – Коливання у перехідному процесі рівня потужності

Отримані графічні результати демонструють залежність коливальності від величини грошової маси, а саме її збільшення при збільшенні величини M .

Вплив економічних параметрів на тривалість перехідного процесу. За допомогою отриманих коренів характеристичних рівнянь можна оцінити вплив економічних параметрів системи із дизель генератором на тривалість перехідного процесу при зміні рівня виробленої енергії. Тривалість перехідних процесів генератора має безпосередній вплив на економічні параметри ізолюваної системи, тобто на відхилення реальної тарифної ціни електроенергії від прийнятого статичного значення, встановленого у існуючій моделі погодинної тарифікації.

Тривалість перехідного процесу t_p обернено пропорційна величині критерія η та визначається за формулою $t_p \leq \frac{1}{\eta} \cdot \ln \frac{1}{\Delta}$ [10], де Δ – половина ширини області, при попаданні в яку перехідний процес вважається завершеним.

За інших рівних умов від системи вимагають збільшення η і зниження μ .

Для випадку дійсних коренів характеристичних рівнянь досліджуваної лінеаризованої системи критерій η чисельно дорівнює найменшому за модулем кореню із пари, тобто $\eta = \lambda_1$. Враховуючи виконані заміни:

$$\eta = \frac{-\left(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B\right) + \sqrt{\left(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B\right)^2 - 4 \cdot \left(1 + \beta\right) - b \cdot \left(1 + \beta\right) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2}}}{2},$$

Із отриманого виразу видно, що збільшення величини економічних параметрів M та V викликає відповідне збільшення критерія η , а отже й зменшення тривалості перехідного процесу. На рис. 5 наведено графік перехідного процесу для потужності P при двох різних значеннях грошової маси M .

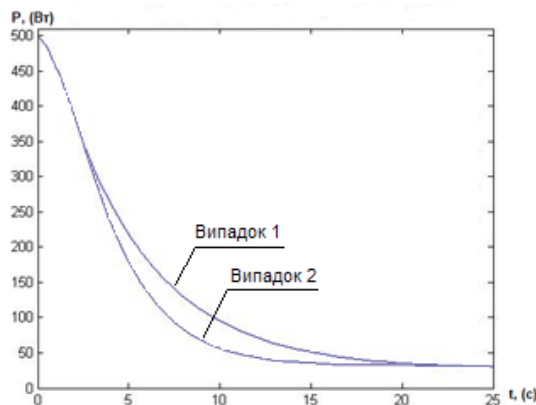


Рисунок 5 – Перехідний процес рівня потужності

У випадку 1 грошова маса $M = 300$ грн, $\eta = 0.2063$. У випадку 2, $M = 1000$ грн, $\eta = 0.7840$. Продемонстровано, що збільшення величини грошової маси, при інших сталих параметрах, призводить до зменшення тривалості перехідного процесу. Аналогічні висновки можна зробити і про залежність тривалості перехідного процесу від оборотності.

У випадку комплексних коренів характеристичного рівняння, критерій η буде дорівнювати реальній складовій комплексної величини λ_1 .

$$\eta = \operatorname{Re} \left(\frac{-(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B) + \sqrt{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)^2 - 4 \cdot ((1 + \beta) - b \cdot (1 + \beta) \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta + \frac{M \cdot V \cdot a \cdot \eta_B \cdot \gamma \cdot \beta}{t_0^2})}}{2} \right) = \frac{(1 + \beta \cdot \tau \cdot C_B)}{2}.$$

У цьому випадку, на тривалість перехідного процесу будуть мати вплив лише такі економічні параметри системи як вартість пального C_B та коефіцієнт, обернений до прибутку системи β .

За результатами розрахунків можна стверджувати, що отримані у попередньому пункті результати демонструють вплив економічних параметрів M та V на характер перехідного процесу.

Висновки.

1. Запропоновано лінеаризовану електро-вартісну модель ізольованої енергогенеруючої системи, що дозволяє оцінювати вплив економічних параметрів системи на характер перехідних процесів.
2. Розраховані максимально допустимі параметри системи, перевищення яких викликає появу коливальних складових у перехідних процесах.
3. Дослідження впливу економічних параметрів системи на тривалість перехідних процесів демонструють, що при зміні економічних параметрів системи необхідно дотримуватися балансу між втратами, що викликані коливальними складовими, та втратами, пов'язаними із тривалістю перехідних процесів.

Список використаної літератури

1. Farideh Doost Mohammadi and Ali Feliachi. Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System. – 014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014.
2. Xiaohui Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin, Xuemin Shen. UDP: Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid. – IEEE Transactions on smart grid, vol. 4, no. 1, march 2013.
3. Ледин С. В. Концепция «электроэнергия – товар» как катализатор развития Smart Grid // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 4. – С. 23–26.
4. Bordo M. D. Equation of exchange // The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–177.
5. Kramer J. S. The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 4, pp. 601–602.
6. Турчак Л.И. Основы численных методов. – М.: «Наука», Главная редакция физико-математической литературы, 1987.
7. Zhuikov V., Petergerya J., Ivanin O. Electro-cost models of sources and loads for Local object power control // 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", At Waplewo, Poland, 2010, Volume: 3.
8. Zhuikov V., Pichkalov I., Boyko I., Blinov I. Price formation in the energy markets of Ukraine // Electronics and Nanotechnology (ELNANO), IEEE 35th International Conference, 2015.
9. Жуйков В.Я., Бойко І.Ю. Динамічна електро-вартісна модель енергогенеруючої системи // Електроніка і зв'язок, 2016, Том 21, № 6 – С. 27 – 33.
10. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Ханаев А.В. Математические основы теории автоматического управления: математическое пособие. – Иваново: ФБОУВПО ИГЭУ, 2010. – 2010. – 320 с.

UDC 621.314:657

V. Zhuikov, Dr. Sc. Sciences, prof.,

I. Boiko, Ph.D. student,

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

USING OF LINEARIZED ELECTRO - COST MODEL FOR A TRANSIENT PROCESSES RESEARCH IN ISOLATED GENERATING SYSTEM

On the basis of modern economic theory, taking the concept of "power as the goods" and taking into account the dynamic change of electrical parameters of the generator was created nonlinear dynamic electro - cost model of the isolated system with a diesel-generator. However, a slight deviation from the parameters of a static value can explore transient processes with using a linearized model. In the article provided the example of an isolated system consisting of a diesel generator and the consumer. In the result of a linearized mathematical model allows to investigate the impact of economic parameters on the nature of transient isolated system by changing the power level of the generator.

Key words: Smart Grid, isolated system, linearized electro – cost model, Fisher equation.

References

1. Farideh Doost Mohammadi and Ali Feliachi, "Adaptive Price Management in Hybrid Microgrid in Presence of PV and Battery Energy Storage System", 014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014.
2. Xiaohui Liang, Xu Li, Rongxing Lu, Xiaodong Lin, Xuemin Shen, "UDP: Usage-Based Dynamic Pricing With Privacy Preservation for Smart Grid", IEEE Transactions on smart grid, vol. 4, no. 1, march 2013
3. S. V. Ledin, "Концепція «Electroenergija - tovar» kak katalizator razvitija Smart Grid", Avtomatizacija v promishlennosti, 2012, 4, 4.
4. M. D. Bordo, "Equation of exchange", The New Palgrave: A Dictionary of Economics, 1987, v. 2, pp. 175–177.
5. J. S. Kramer, "The New Palgrave: A Dictionary of Economics", 1987, v. 4, pp. 601– 602.
6. L. I. Turchak, "Osnovy chiselnix metodov", Moskva «Nauka», Glavnaya Redakciya Fiziko – Matematicheskoy Literatury, 1987, p. 78.
7. V. Zhuikov, J. Petergerya, O. Ivanin, "Electro-cost models of sources and loads for Local object power control", 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering", at Waplewo, Poland, 2010, Volume: 3.
8. V. Zhuikov V, I. Pichkalov, I. Boyko, I. Blinov, "Price formation in the energy markets of Ukraine", Electronics and Nanotechnology (ELNANO), IEEE 35th International Conference, 2015.
9. V. Zhuikov, I. Boyko, "Dunamichna Elektro-Wartisna Model Energogeneryyuchoi Sistemu" // Elektronika i zv'azok, 2016, Tom 21, № 6. – P. 27 – 33.
10. A. Kolganov, S. Lebedev, A. Hanaev, "Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: matematicheskoe posobie. – FBOUVPO IGEU, 2010. – 320 p.

УДК 621.314:657

В.Я. Жуйков, д-р. техн. наук, проф.,

И.Ю. Бойко, асп.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРО - СТОИМОСТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ГЕНЕРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ

На основе положений современной экономической теории, принимая концепцию «электроэнергия как товар» и учитывая динамическое изменение электротехнических параметров генератора была создана нелинейная динамическая электро-стоимостная модель изолированной системы с дизель - генератором. Однако при незначительном отклонении параметров от некоторого статического значения можно исследовать переходные процессы, используя линеаризованную модель. В статье рассмотрен пример изолированной системы, состоящей из дизельного генератора и потребителя. Полученная в результате линеаризаций математическая модель позволяет исследовать влияние экономических параметров на характер переходного процесса изолированной системы при изменении уровня мощности генератора.

Ключевые слова: Smart Grid, изолированная система, линеаризованная электро – стоимостная модель, уравнение Фишера.

Надійшла 18.03.2019

Received 18.03.2019