

УДК 621.311.07

О.С. Яндульський, д-р техн. наук**А.А. Марченко**, канд. техн. наук**О.В. Хоменко**, канд. техн. наук**В.В. Мацейко**, аспірант

НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА САРЧП ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ЧАСТОТИ ТА ПЕРЕТОКІВ ПОТУЖНОСТІ В ОЕС УКРАЇНИ

А.С. Яндульський, д-р техн. наук**А.А. Марченко**, канд. техн. наук**О.В. Хоменко**, канд. техн. наук**В.В. Мацейко**, аспірант

НТУУ «КПІ», г. Киев, Украина

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА САРЧП ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ ЧАСТОТЫ И ПЕРЕТОКОВ МОЩНОСТИ В ОЭС УКРАИНЫ

O.S. Yandulskyi, Doctor of Technical Sciences**A.A. Marchenko**, PhD in Technical Sciences**O.V. Khomenko**, PhD in Technical Sciences**V.V. Matseyko**, PhD student

NTUU «KPI», Kyiv, Ukraine

INCREASE OF EFFICIENCY OF WORK OF THE CENTRAL REGULATOR SARCP IN REGULATING THE FREQUENCY OF THE POWER FLOWS IN THE OES OF UKRAINE

Розглянуто структуру та типи регулювання частоти й активної потужності. Наведено результати моделювання роботи системного пропорційно-інтегрального регулятора. Розроблена комп'ютерна модель системи автоматичного регулювання частоти та активної потужності (САРЧП) у середовищі Matlab, яка, базуючись на бібліотеці нелінійних систем, дозволяє знайти параметри регулятора, що відповідають критерію оптимальності.

Ключові слова: регулювання, оптимізація, енергосистема, баланс активних потужностей, моделювання.

Рассмотрены структура и типы регулирования частоты и активной мощности. Приведены результаты моделирования работы системного пропорционально-интегрального регулятора. Разработана компьютерная модель системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (САРЧМ) в среде Matlab, которая, базируясь на библиотеке нелинейных систем, позволяет найти параметры регулятора, которые отвечают критерию оптимальности.

Ключевые слова: регулирование, оптимизация, энергосистема, баланс активных мощностей, моделирование.

Considered the structure and types of regulation of frequency and active power. Presents the results of simulation of the operation of the system is proportional-integral controller. Developed a computer model of the system of automatic regulation of frequency and active power in Matlab, which is based on the library of nonlinear systems, allows you to find the controller parameters meet the criteria for optimality.

Key words: control, optimization of power system, the balance of active capacity, the simulation.

Постановка проблеми. Відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» передбачається введення в експлуатацію близько 21 ГВт додаткових потужностей на атомних електростанціях (АЕС). Це збільшить потужність генерації в базисній частині графіка навантаження та ускладнить задачу регулювання частоти і виконання узгоджених графіків міждержавних перетоків. У той же час вимкнення одиначної потужності блока АЕС призводить до різкої зміни режиму ОЕС (частоти і перетоків). На сьогодні в ОЕС України у вторинному регулюванні частоти бере участь лише одна гідроелектростанція (ГЕС) – Дніпровська ГЕС-1, регулювальний діапазон або резерв якої за активною потужністю становить 432 МВт, що є недостатнім. Запланована паралельна робота ОЕС України з енергооб'єднанням країн Західної Європи ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity – Європейська спілка операторів магістральних мереж у галузі електроенергетики) посилює вимоги до якості регулювання частоти відпо-

відно до правил регулювання частоти, які діють в ENTSO-E [1]. Забезпечення високої якості регулювання частоти системою автоматичного регулювання частоти та активної потужності (САРЧП) об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню САРЧП присвячено багато робіт, в яких або докладно розглядаються характеристики окремої електростанції, яка бере участь у регулюванні частоти [2; 3] при спрощеному аналізі окремої частини енергосистеми, або розглядається режим регулювання частоти та перетікань активної потужності в електроенергетичному об'єднанні, до складу якого входять дві енергосистеми [4], при спрощеному аналізі окремих енергосистем.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Удосконалення існуючих систем регулювання частоти та активної потужності потребує дослідження особливостей їх роботи в різних режимах проведення параметричної оптимізації. Найкращою основою цих досліджень є математичне моделювання, яке неможливе без моделей, які адекватно відображають процеси в елементах ОЕС [2]. Незважаючи на те, що сучасні розробки систем автоматичного керування виконуються на цифровій основі, що дозволяє реалізувати складні закони регулювання, регулювання частоти та активної потужності здійснюється з використанням типового ПІ-закону. Структура САРЧП суттєво нелінійна і викликана, з одного боку, дискретністю сигналів керування системного регулятора (SCADA), а з іншого – нелінійністю характеристик первинних регуляторів, які мають обмеження по відкриванню клапанів та механічній потужності турбіни. Тому проводити параметричну оптимізацію таких систем із застосуванням класичних методів (методу штрафних функцій, градієнтного спуску й ін.) неможливо, а перевага надається дослідженню імітаційних моделей.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є дослідження роботи системної частини САРЧП з типовим ПІ-регулятором у середовищі Simulink програмного пакета Matlab з використанням інструменту оптимізації.

Виклад основного матеріалу. Оскільки висока якість регулювання, в першу чергу, залежить від системного регулятора, розглянемо структуру (рис. 1) та режими роботи САРЧП на системному рівні [5]. Системна частина САРЧП призначена для підтримання балансу активних потужностей генерації та споживання, впливаючи на регульовальні станції, які задіяні у вторинному регулюванні частоти. Системний регулятор САРЧП представлений пропорційно-інтегральною ланкою, де k_{II} , k_i – коефіцієнти підсилення відповідних каналів.

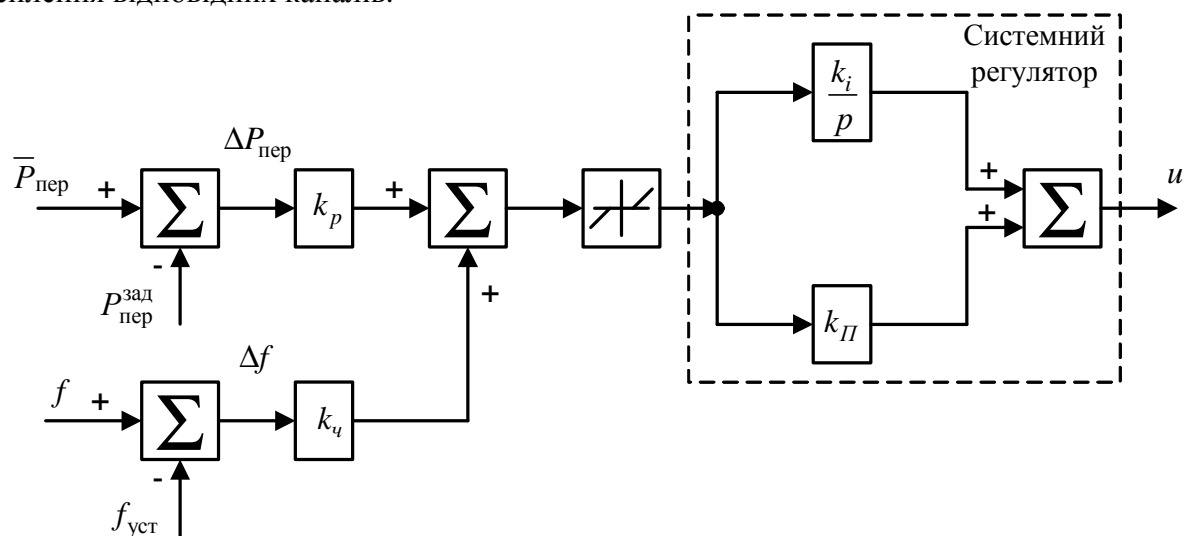


Рис. 1. Структурна схема САРЧП енергосистеми

Вхідними сигналами САРЧП є поточні значення перетоків активної потужності міжсистемних ліній електропередач $\Delta \bar{P}_{\text{пер}}$ та фактичної частоти f . На основі поточних значень $\Delta \bar{P}_{\text{пер}}$ визначається сальдо перетоків та його відхилення $\Delta \bar{P}_{\text{пер}}$ відносно уставки $P_{\text{пер}}^{\text{зад}}$, а також відхилення частоти Δf відносно заданого значення $f_{\text{уст}}$.

Регулювання частоти та активної потужності системним регулятором САРЧП здійснюється за таким критерієм:

$$ACE = a_1 k_p \left(\sum_{i=1}^n P_{\text{пер},i} - P_{\text{пер}}^{\text{зад}} \right) + a_2 k_f (f - f_{\text{уст}}), \quad (1)$$

де ACE – помилка регулювання області (Area Control Error) k_p , k_f – коефіцієнти регулювання за перетоком активної потужності та частотою відповідно; α_1 та α_2 – коефіцієнти, які визначають вид регулювання частоти та потужності САРЧП ($\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 1$ – автоматичне регулювання частоти $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$ – автоматичне регулювання перетоку; $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 1$ – автоматичне регулювання перетоку з коригуванням за частотою).

Запишемо (1) через відхилення частоти Δf та перетік активної потужності $\Delta P_{\text{пер}}$:

$$ACE = a_1 \Delta P_{\text{пер}} + a_2 k_f \Delta f. \quad (2)$$

Застосування системного ПІ-регулятора дає можливість забезпечити задані показники регулювання: пропорційна ланка забезпечує бажану швидкість, а інтегральна – задану точність регулювання. Внаслідок наявності інтегральної ланки вторинне регулювання частоти є астатичним, тобто в усталеному режимі ACE=0.

У загальному вигляді розрізняють три типи регулювання частоти та потужності:

- автоматичне регулювання частоти (АРЧ);
- автоматичне регулювання перетоку (АРП);
- автоматичне регулювання перетоку з коригуванням за частотою (АРПЧ).

Автоматичне регулювання частоти є найбільш простим, оскільки контролюється лише частота. Енергосистема, в якій системний регулятор функціонує в режимі АЧР, повинна мати достатню пропускну спроможність ліній зв'язку і достатній регулювальний діапазон на електростанціях, які беруть участь у вторинному регулюванні частоти, для компенсації небалансу в будь-якій енергосистемі енергооб'єднання. В цьому разі системний параметр визначається як:

$$ACE = k_f \Delta f. \quad (3)$$

Якщо коефіцієнт коригування перетоку за частотою k_f буде чисельно дорівнювати сумарній крутизні с.ч.х. енергосистеми, то в цьому випадку значення помилки регулювання області ACE буде близьким до небалансу активної потужності, який призвів до відхилення частоти Δf в ЕЕС.

Автоматичне регулювання перетоку (АРП) призначене для регулювання перетоку міжсистемними лініями зв'язку. Системні регулятори двох енергосистем не можуть працювати в режимі АРП, оскільки кожний регулятор буде підтримувати сальдо перетоків потужності на заданій уставці. Це може спричинити виникнення качань і, як наслідок, порушення стійкої роботи енергосистем. Системний параметр у цьому випадку визначається:

$$ACE = k_p \Delta P. \quad (4)$$

У цьому разі величина ACE визначає відхилення сальдо перетоків активної потужності міжсистемними перетинами, яке викликане небалансом активної потужності.

Автоматичне регулювання перетоку з коригуванням за частотою здійснює комплексне регулювання частоти та перетоків активної потужності. АРПЧ дозволяє

забезпечити селективність в компенсації збурення, тобто небаланс компенсує лише та енергосистема, в якій він виник. Системний параметр визначається як:

$$ACE = k_1 \Delta P + k_q \Delta f . \quad (5)$$

Отже, такий режим являє собою поєднання режимів АРЧ та АРП. Якщо в цьому випадку коефіцієнт коригування перетоку за частотою k_q буде чисельно дорівнювати сумарній крутизні с.ч.х. енергосистеми, то ACE буде визначати небаланс активної потужності, який призвів до відхилення частоти Δf і сальдо перетоків активної потужності $\Delta P_{пер}$. Оскільки системний ПІ-регулятор є астатичним, то критерієм регулювання частоти та перетоків активної потужності буде $ACE = 0$, оскільки лише в цьому випадку системний регулятор не діє.

Модель САРЧП в ОЕС наведена в [6], моделі окремих елементів – у [2; 7]. Під час розроблення моделі припустили, що: регулювальні станції представлені одним еквівалентним генератором; навантаження прикладене безпосередньо до валу генератора; і не враховуються втрати у мережі [2; 6]. У системі САРЧП також враховується зона нечутливості, яка визначається нормативними документами по регулюванню частоти та активної потужності в енергосистемі.

Для встановлення узагальненого критерію якості процесу регулювання без визначення його окремих показників застосовують інтегральні оцінки. Інтегральна оцінка являє собою означений інтеграл від деякої функції перехідної складової динамічної похибки. В астатичних системах усталена похибка для стрибкоподібного збурення дорівнює нулеві, а перехідна складова динамічної похибки дорівнює похибці $\varepsilon(t)$ системи. Для нашого випадку

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= \Delta f \\ \text{або} & \\ \varepsilon(t) &= \Delta P_{пер} , \end{aligned} \quad (6)$$

тоді для оцінювання як коливних, так і монотонних процесів застосуємо квадратичне інтегральне оцінювання

$$I = \int_0^{\infty} \varepsilon^2 dt \rightarrow \min , \quad (7)$$

яке не залежить від знаку похибки і від характеру кривої перехідного процесу системи. Величина інтеграла (7) буде тим меншою, чим ближче крива перехідного процесу до усталеного режиму.

Також застосуємо нелінійні обмеження, що враховують наступне.

Відхилення частоти не більше ± 20 мГц (сума похибки місцевого виміру частоти (± 10 мГц) та нечутливості регулятора (± 10 мГц)). Час введення в дію резерву первинного регулювання становить 30 с, зокрема: 50 % – максимум 15 с, а в подальшому від 50 % до 100 % – зростає лінійно.

Максимальне квазістаціонарне відхилення частоти через спад (статизм) генераторів пропорційної дії не повинно перевищувати ± 180 мГц після відновлення балансу, як результат первинного регулювання.

У моделі використовується інструмент оптимізації NCD Outport (Nonlinear Control Design) [8], мета якого – пошук оптимального параметра системи регулювання, який відповідатиме критерію оптимізації. На вході вказаного блоку реалізовано підінтегральну функцію, що відповідає відхиленню частоти Δf , або сальдо перетоків активної потужності $\Delta P_{пер}$.

У меню цього блока вказується змінна (коефіцієнти k_i та k_p системного регулятора), що відповідає шуканому оптимальному параметру системи регулювання, а також нелінійні обмеження, за якими проводиться пошук відповідності критерію оптимізації.

Дослідження процесів регулювання частоти та активної потужності на моделі САРЧП виконано для режиму паралельної роботи двох ОЕС, до складу якого входять ЄЕС Росії (ОЕС2) та ОЕС України (ОЕС1). В ОЕС України системний регулятор САРЧП працює в режимі АРПЧ, а в ЄЕС Росії – в режимі АРЧ. Моделювання виконано для випадку, що в ОЕС у вторинному регулюванні частоти беруть участь ГЕС. Як небаланс потужності в ОЕС1 розглядалось стрибкоподібне збільшення потужності навантаження на 360 МВт. При цьому відхилення перетоку активної потужності міжсистемного перетину буде обумовлене небалансом активної потужності в ОЕС1.

Процес пошуку оптимальних параметрів системного ПІ-регулятора відображається графічно за допомогою побудови. Першим виводиться графік, що відповідає початковим умовам оптимізації (рис. 2, рис. 3), далі виводиться графік, який частково задовольняє вимоги критерію оптимізації. Якщо у ході обчислень отримано таке значення змінної, що повністю відповідає критерію оптимізації, то процес розрахунку автоматично припиняється (рис. 2, рис. 3, лінія 1). Для випадку небалансу потужності в ОЕС України при стрибкоподібному збільшенні потужності навантаження на 360 МВт отримано оптимальні значення коефіцієнтів підсилення пропорційного та інтегрального каналів відповідно – $K_p = 3,8484$, $K_i = 1,6930$. Величина АСЕ, як видно з рис. 2, рис. 3 (лінія 1), залишившись у зоні нелінійних обмежень, вийшла в нульове значення.

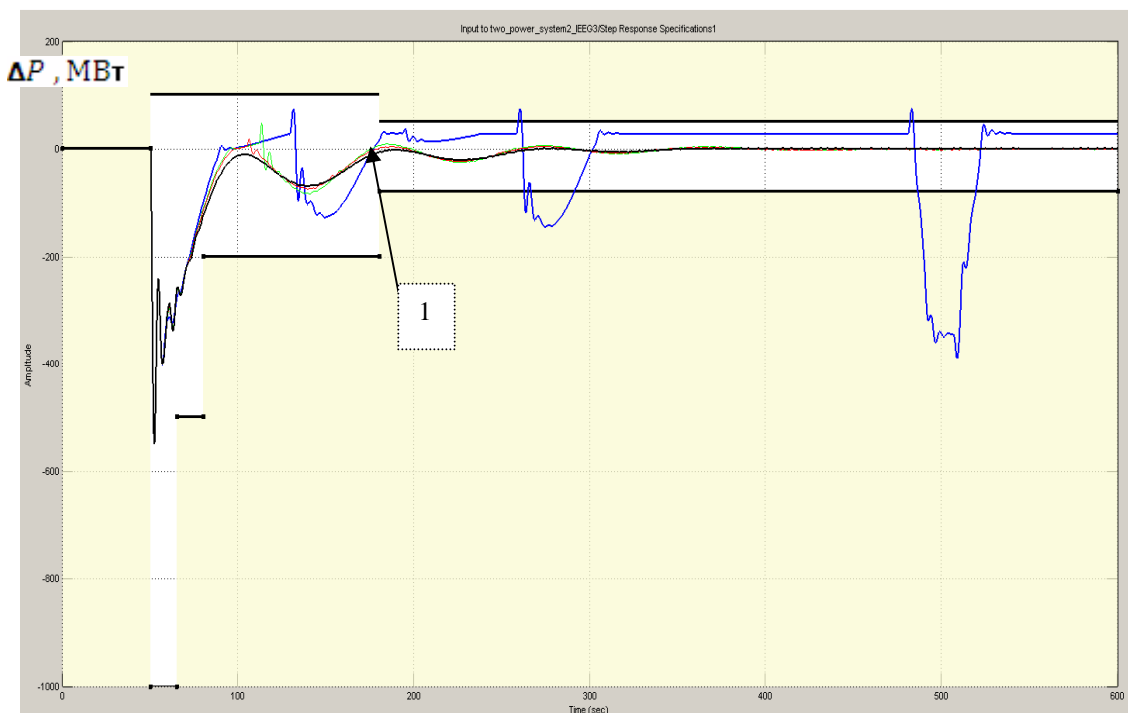


Рис. 2. Зміна активної потужності на міжсистемному перетині при збуренні в системі (ітерації оптимізації)

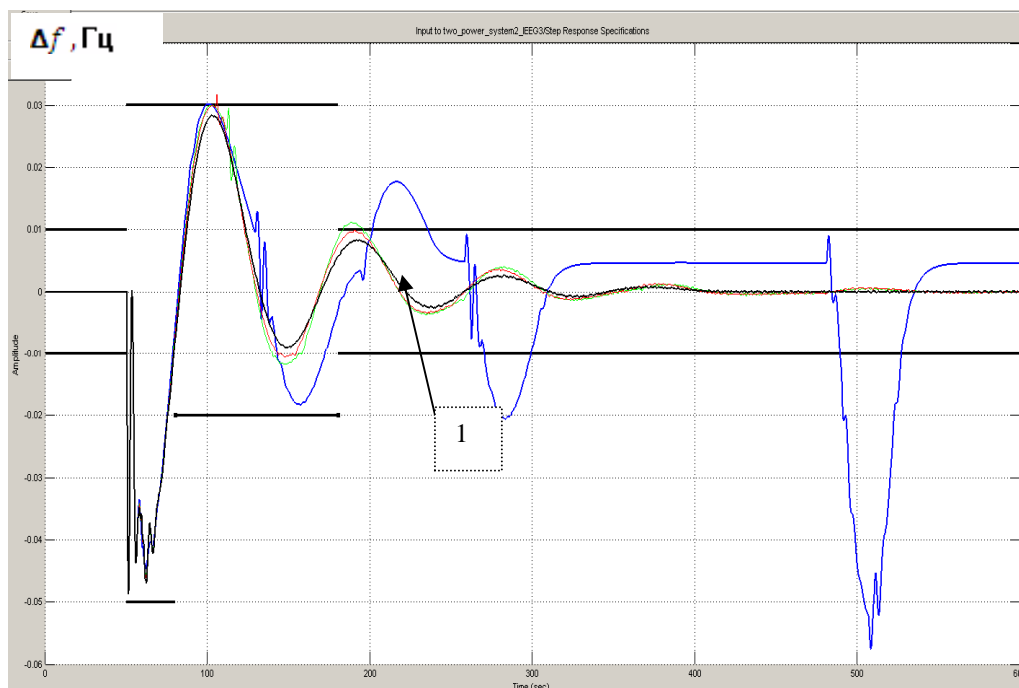


Рис. 3. Відхилення частоти в ОЕС України при збудженні системи (ітерації оптимізації)

Висновки. Використання параметричної оптимізації системного ПІ-регулятора САРЧП дозволяє отримати показники якості перехідних процесів регулювання частоти та активної потужності в енергосистемі з урахуванням заданих нелінійних обмежень.

Список використаних джерел

1. *Правила* первичного и вторичного регулирования частоты и мощности в УСТЕ. – К., 1998. – 37 с.
2. *Алексеев С. В.* Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности / С. В. Алексеев, И. Б. Копылов, А. М. Машанский // *Электричество*. – 1980. – № 12. – С. 23-30.
3. *Стернинсон Л. Д.* Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах / Л. Д. Стернинсон. – М. : Энергия, 1975. – 216 с.
4. *Автоматизация* электростанций, энергосистем и АСУ реализацией энергии // *Труды ВНИИЭ*. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 72 с.
5. *Яндульський О. С.* Автоматичне регулювання частоти та перетоків активної потужності в енергосистемах / О. С. Яндульський, А. О. Стелюк, М. П. Лукаш. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – 88 с.
6. *Яндульський А. С.* Моделирование системы АРЧМ ОЭС Украины при регулировании перетока / А. С. Яндульський, А. О. Стелюк, Ю. Н. Бондаренко // *Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. Тем. вип.* – 2002. – Ч. 7. – С. 76-79.
7. *Кириленко А. В.* Моделирование системы автоматического регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме Украины / А. В. Кириленко, А. С. Яндульський, Е. В. Небрат // *Технічна електродинаміка*. – 2000. – № 1. – С. 99-102.
8. *Веремей Е. И.* Пособие "Nonlinear Control DesignBlockset" [Электронный ресурс] / Е. И. Веремей, С. В. Погожев. – Режим доступа : <http://matlab.exponenta.ru/nonlinecondes/book1/preface.php>.