

О. С. Яндутьський¹
В. С. Гулий¹
А. А. Марченко¹
О. В. Тимохін¹
А. Б. Нестерко¹

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕС ПІД ЧАС РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проведений аналіз роботи об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України під час аварійних ситуацій, зокрема у випадках вимкнення енергоблоку атомної електростанції (АЕС), виявив значні коливання частоти та виникнення надмірних керувальних дій на обладнання регулювання енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС). Такі процеси створюють додаткові навантаження на сервоприводи та механізми управління турбіною, що призводить до зменшення терміну їх експлуатації й підвищення ймовірності відмови під час роботи в режимах регулювання частоти та активної потужності. Дослідження проведено на основі моделювання процесів у програмному середовищі DigSilent PowerFactory з використанням комплексної моделі ОЕС України, яка враховує магістральні мережі, генератори, вузли навантаження та міжсистемні лінії зв'язку. Розглянуто участь енергоблоку ТЕС потужністю 300 МВт у нормованому первинному регулюванні частоти (НПРЧ) у разі аварійного відключення енергоблоку АЕС. Встановлено, що зі зміною частоти в межах відхилень спостерігаються знакозмінні коливання сигналу керувального впливу на серводвигун, які не супроводжуються відповідними змінами потужності турбіни, але викликають підвищений знос регульовального обладнання. Для зменшення амплітуди цих коливань запропоновано використати фільтр Баттерворта першого порядку та фільтр рухомого середнього для згладжування сигналу помилки регулювання. Моделювання показало, що застосування фільтра Баттерворта зменшує амплітуду сигналу керування у 7,8 раза, а фільтра рухомого середнього — у 1,54 раза, забезпечуючи збереження точності регулювання частоти в межах нормативних вимог. Запропонований підхід дозволяє зменшити кількість зайвих керувальних дій серводвигуна енергоблоку ТЕС, що сприяє підвищенню надійності та продовженню строку служби регульовального обладнання. Водночас зберігаються необхідні маневрові характеристики енергоблоку та дотримуються встановлені вимоги щодо регулювання частоти і активної потужності.

Ключові слова: енергосистема, коливання частоти, регулювання частоти, фільтр, моделювання режиму, серводвигун.

Вступ

Якість автоматичного регулювання частоти та активної потужності відіграє важливу роль в ефективній роботі об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. У разі виникнення значного небалансу активної потужності в ОЕС України, до прикладу, з вимкненням енергоблоку атомної електричної станції (АЕС), виникає різка зміна перетоків активної потужності та зниження частоти в ОЕС України за допустимий діапазон. З метою ефективного регулювання частоти в енергосистемі чинними нормативними документами передбачено первинне, вторинне та третинне регулювання частоти та активної потужності [1].

За нормального режиму роботи електричної мережі, енергоблоку теплових електричних станцій (ТЕС) не змінюють вихідну потужність в межах встановленої зони нечутливості по частоті. Для станцій, які беруть участь у нормованому первинному регулюванні частоти та активної потужності, зона нечутливості первинних регуляторів становить 20 мГц. Налаштування регуляторів інших

енергоблоків станцій, які беруть участь лише в загальному первинному регулюванні частоти, повинні забезпечувати зміну вихідної потужності енергоблоків на величину резерву первинної потужності у разі відхилення частоти більше ніж на 200 МГц від номінального значення [1]. Це обумовлено технічними можливостями системи керування, встановленої на цих блоках, а також виконавчим обладнанням енергоблоків та ін. У разі відхилення частоти за зону нечутливості система регулювання швидкості обертання турбіни енергоблоку ТЕС формує керувальний вплив на виконавче обладнання згідно зі встановленим статизмом [2].

Дослідження аварійних режимів в ОЕС України у разі суттєвих небалансах активної потужності виявило коливання частоти. Як приклад, на рис. 1 (крива 1) показано графік зміни частоти в ОЕС України за даними пристрою системи моніторингу перехідних режимів (СМІР), встановленого на підстанції 750 кВ, у разі відключення енергоблоку АЕС, розташованої у південному регіоні України. Враховуючи відхилення рівня частоти за межі мертвої зони енергоблоків ТЕС, що беруть участь у нормованому первинному регулюванні частоти (НІРЧ) система керування енергоблоку станції реагує на зміну частоти, і турбіна змінює вихідну потужність, проте через невелику постійну часу серводвигуна порівняно з турбіною виникають мінімальні знакозмінні коливання керувального сигналу, на які турбіна не реагує. Це призведе до прискореного вичерпання ресурсу регульовального обладнання енергоблоків, які беруть участь у НІРЧ.

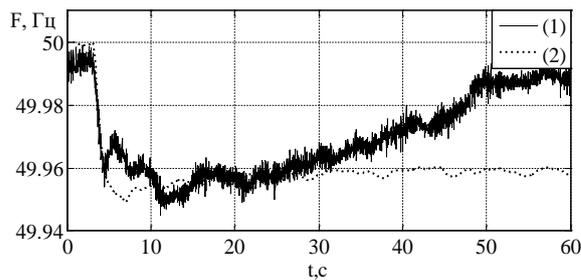


Рис. 1. Графік зміни частоти в ОЕС України (1) та у моделі ЕЕС (2)

Метою роботи є удосконалення автоматичної системи регулювання швидкості обертання турбіни енергоблоку ТЕС, що дозволить зменшити вичерпання ресурсу регульовального обладнання блоків ТЕС, які беруть участь у регулюванні частоти та активної потужності в ОЕС України.

Метою роботи є удосконалення автоматичної системи регулювання швидкості обертання турбіни енергоблоку ТЕС, що дозволить зменшити вичерпання ресурсу регульовального обладнання блоків ТЕС, які беруть участь у регулюванні частоти та активної потужності в ОЕС України.

активної потужності в ОЕС України.

Результати досліджень

У роботі розглянуто моделювання режиму роботи енергосистеми на комплексній моделі енергосистеми при відключенні енергоблоку АЕС, яка розташована у південному регіоні України та дані режиму роботи ОЕС України при відключенні енергоблоку цієї АЕС з пристроїв СМІР.

Для дослідження процесів регулювання частоти в енергосистемі розглянуто енергоблок ТЕС потужністю 300 МВт, структурна схема системи управління якого показана на рис. 2 [2]. Зона нечутливості системи регулювання цього енергоблоку складає 20 МГц.

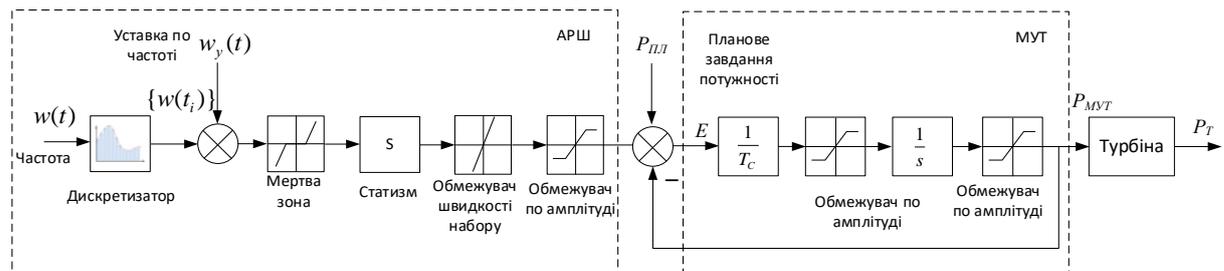


Рис. 2. Структурна схема системи управління енергоблоку ТЕС

Моделювання режиму роботи енергосистеми у разі відключення енергоблоку АЕС виконувалося на комплексній моделі [3] з використанням програмного забезпечення DigSilent PowerFactory. Модель включає всі ЛЕП 330–750 кВ, 284 генераторів, 202 вузли навантаження, п/ст 220–750 кВ, міжсистемні лінії зв'язку з сусідньою енергосистемою. В нормованому первинному регулюванні частоти (НІРЧ) задіяно 11 енергоблоків ТЕС і сумарний резерв активної потужності НІРЧ становить 68,15 МВт. Аналіз отриманих результатів показав, що після виникнення збурення частота енергосистеми знизилась до рівня 49,948 Гц (рис. 1 крива 2).

Під час первинного регулювання частоти спостерігається коливання частоти в межах 10 мГц відносно усталеного значення. Розглянутий енергоблок реагує на зміну частоти, динамічне відхилення якої становить 52 МГц, і збільшує вихідну потужність згідно зі встановленим статизмом. Проте, під час роботи регулятора станції спостерігається поява знакозмінного сигналу E (рис. 2)

помилки регулювання, графік зміни якого показаний на рис. 3а, що формує керувальний вплив на сервопривід зміни положення регулювального клапана. Система автоматичного регулювання швидкості (АРШ) турбіни подає керувальний вплив на механізм управління турбіни, що в свою чергу через сервопривід змінює положення регулювального клапана. В результаті змінюється подача енергоносія на лопатки турбіни. Враховуючи значну інерційність турбіни у порівнянні з постійною часу сервоприводу та характер зміни потужності турбіни (рис. 3б) встановлено, що знакозмінний керувальний вплив на сервоприводи клапанів є надлишковим та призводить до швидкого вичерпання ресурсу регулювального обладнання енергоблоку ТЕС.

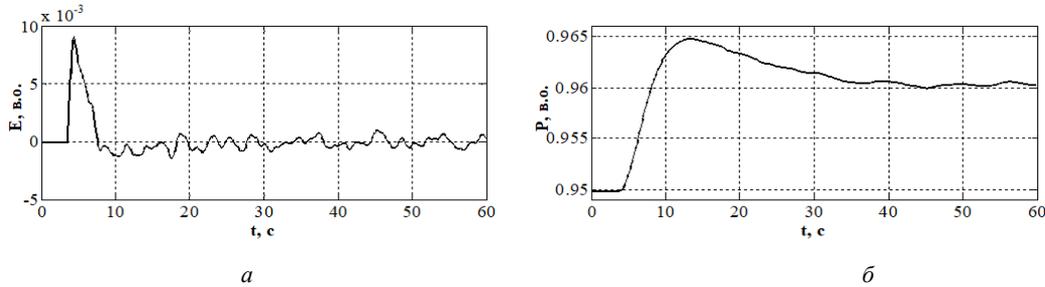


Рис. 3. Графіки зміни: *a* — помилки регулювання положення клапана E (в.о.); *б* — потужності турбіни

Для зменшення впливу коливань частоти на ресурс регулювального обладнання енергоблоку ТЕС запропоновано застосувати та дослідити ефективність фільтрації сигналу помилки регулювання (рис. 2), використовуючи фільтр Баттерворта першого порядку [4] та фільтр рухомого середнього [5] із залученням енергоблоку ТЕС у НІРЧ.

Фільтр нижніх частот Баттерворта першого порядку описується такою передатною функцією:

$$W(p) = \frac{1}{T_f p + 1}. \quad (1)$$

Фільтр рухомого середнього обчислює усереднене значення кожного елемента ряду як середнє арифметичне декількох сусідніх елементів. Сукупність таких усереднених значень формує вікно ковзання. Значення сигналу на виході фільтра визначається за такою формулою:

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} x_{n-k}, \quad (2)$$

де y_n — усереднене значення сигналу на виході фільтра N -го інтервалу відліків вхідного сигналу x .

З урахуванням раніше визначеного усередненого значення y_{n-1} нове усереднене значення сигналу визначається за формулою

$$y_n = y_{n-1} \frac{1}{N} (x_n - x_{n-N}). \quad (3)$$

Аналіз аварії в ОЕС України 20 лютого 2016 року під час відключення енергоблоку АЕС показав наявність коливань потужності за даними пристроєм СМІР, встановленого на підстанції 750 кВ. Динамічне відхилення частоти становило 54 мГц.

Результати моделювання енергоблоку ТЕС з використанням даних зміни частоти в енергосистемі (рис. 1) показали, що система керування реагує на зміну частоти, викликаючи збільшення вихідної потужності турбіни (рис. 4б, крива 1), проте на рис. 4а (крива 1) зафіксовано значні коливання сигналу керування серводвигуном.

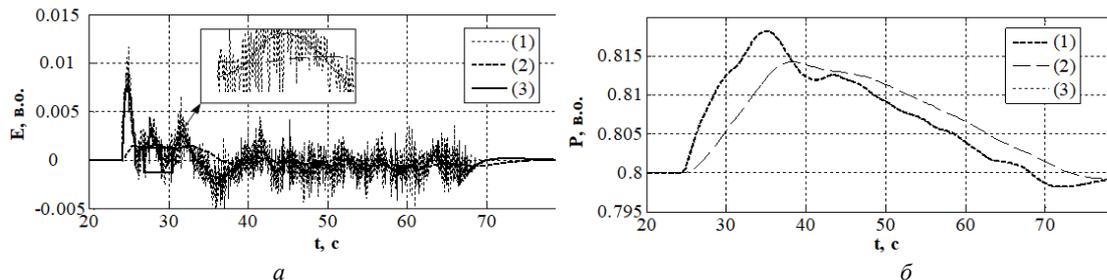


Рис. 4. Графіки зміни: *a* — помилки регулювання положення клапана; *б* — потужності турбіни

Застосування фільтра Батерворта 1-го порядку дозволило зменшити амплітуду сигналу керувального впливу серводвигуна в 7,8 раза (на рис. 4а, крива 2). Динамічне відхилення потужності турбіни (рис. 4б, крива 2) становить 0,8142 в.о.

Додаткова потужність блока в іменованих одиницях (ΔP_G) у разі відхилення частоти на Δf згідно із заданим статизмом ($S_{p.u.}$) розраховується за формулою

$$\Delta P_G = \frac{\Delta f}{S_{p.u.}} \cdot \frac{P_{Gn}}{f_n} \quad (4)$$

З (4) можна отримати вираз для обчислення $\Delta P_{p.u.}$

$$\Delta P_{G p.u.} = \frac{\Delta P_G}{P_{Gn}} = \frac{\Delta f}{S_{p.u.}} \cdot \frac{1}{f_n} = \frac{0,034}{0,04} \cdot \frac{1}{50} = 0,017(\text{p.u.}), \quad (4)$$

де P_{Gn} — номінальна потужність енергоблоку, f_n — номінальна частота в енергосистемі, Δf — відхилення частоти в енергосистемі з урахуванням зони нечутливості регулятора. Оскільки початкова потужність енергоблоку становить 0,8 в.о., то в результаті відхилення частоти на Δf , з урахуванням зони нечутливості регулятора розрахункове значення вихідної потужності енергоблоку становитиме 0,817 в.о.

У разі встановлення фільтра рухомого середнього амплітуда сигналу керувального впливу серводвигуна зменшилася в 1,54 раза (рис. 4а, крива 3), а динамічне відхилення потужності турбіни становило 0,8181 в.о. (рис. 4б, крива 3).

Аналіз отриманих результатів показав, що встановлення фільтра Батерворта першого порядку та фільтра рухомого середнього дозволяє зменшити динамічне відхилення керувального сигналу серводвигунів в 7,8 та 1,54 раза відповідно. Похибка зміни потужності турбіни відносно розрахункового значення в першому випадку становить 0,343 %, в другому — 0,135 %, що не перевищує нормативне значення похибки регулювання згідно з [1] (1 % $P_{ном}$).

Висновки

Наявність надлишкових керувальних впливів на регульовальне обладнання ТЕС, які беруть участь у первинному регулюванні частоти та потужності призводить до зменшення терміну експлуатації енергоблоків ТЕС в режимах регулювання частоти.

Застосування фільтра Баттерворта першого порядку та фільтра рухомого середнього дозволяє зменшити надлишкові керувальні впливи на серводвигун енергоблока ТЕС, зберігаючи його маневрові характеристики та забезпечуючи відповідність чинними вимогам регулювання частоти й активної потужності. Такий підхід сприяє зниженню зносу регулюючого обладнання станції в маневрових режимах роботи під час регулювання частоти та активної потужності в енергосистемі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] *Про затвердження Кодексу системи передачі*, Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) від 14.03.2018 № 309. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>. Дата звернення: 02.10.2025.
- [2] O. Yandulskiy, A. Marchenko, and V. Hulyi, "Analysis of Efficiency of Primary Load-Frequency Control of Integrated Power System of Ukraine," in *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 244-247.
- [3] O. Yandulskiy, et al., "Improving the efficiency of secondary load frequency control in a power system considering internal tie-line power exchanges," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, no. 8 (136), pp. 6-15, 2025. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.336113>.
- [4] M. Shouran, and E. Elgamli, "Design and implementation of Butterworth filter," *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 9, pp. 7975-7983, 2020.
- [5] L. Ely de Lacerda de Oliveira, L. E. B. da Silva, V. F. da Silva, G. L. Torres, and E. L. Bonaldi, "Real-time determination of the best interval of calculation for moving averages used for DC value extraction in active power filter control methods," in *Proc. 28th IEEE IECON*, 2002, vol. 2, pp. 1526-1531.

Рекомендована оргкомітетом міжнародної науково-технічної конференції
«Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)»

Стаття надійшла до редакції 20.01.2026

Яндутьський Олександр Станіславович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: yandu_kpi@ukr.net ;

Гулий Володимир Сергійович — асистент кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net ;

Марченко Анатолій Андрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: marchenko_ae@ukr.net;

Тимохін Олександр Вікторович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: timohin_ae@ukr.net;

Нестерко Артем Борисович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації енергосистем, e-mail: watefir@gmail.com.

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

O. S. Yandulskiy¹

V. S. Hulyi¹

A. A. Marchenko¹

O. V. Tymokhin¹

A. B. Nesterko¹

Study of the Dynamic Operating Modes of Thermal Power Plants Under the Load Frequency Control in Electric Energy System

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

The performance of the Interconnected Power System (IPS) of Ukraine during emergency events was analyzed particularly in the events when the nuclear power plant (NPP) becomes disconnected. Mainly, the analysis revealed significant frequency oscillations and excessive control actions that are applied to the regulating equipment of thermal power plant (TPP) units. Those events impose additional mechanical stress on servo drives and the mechanisms of turbine control, thereby resulting in the reduced service life and an increased probability of failure during load frequency control. Current study was carried out using simulation in the DigSilent PowerFactory software with the usage of the comprehensive model of the Ukrainian IPS that incorporates transmission networks, generators, load nodes, and intersystem transmission lines. The participation of a 300 MW TPP unit in normal primary load frequency control (NPLFC) during an emergency shutdown of an NPP unit was examined. It was established that during frequency deviations, alternating fluctuations are observed in the control signal that is applied to the servomotor, which are not accompanied by corresponding changes in turbine power output but cause increased wear of the regulating equipment. In order to reduce the amplitude of these fluctuations, the authors proposed the usage of a first-order Butterworth filter and a moving average filter for smoothing the regulation error signal. Simulation demonstrated that the application of the Butterworth filter reduces the amplitude of the control signal by a factor of 7,8, while the moving average filter reduces it a factor of 1,54 thereby maintaining frequency regulation accuracy within the required standards. Proposed approach minimizes redundant control actions of the TPP unit servomotor, thereby improving the reliability and extending the lifetime of the regulating equipment, while preserving the unit's maneuverability and compliance with the established frequency and active power control requirements.

Keywords: load frequency control, power system, signal filtering, dynamic mode simulation, frequency fluctuations, servomotor.

Yandulskiy Oleksandr S. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: yandu_kpi@ukr.net ;

Hulyi Volodymyr S. — Assistant of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net ;

Marchenko Anatoliy A. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: marchenko_ae@ukr.net ;

Tymokhin Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: timohin_ae@ukr.net ;

Nesterko Artem B. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Power Systems Automation, e-mail: watefir@gmail.com