



- [10] V. Alcantaraa, J. A. Duro, "Inequality of energy intensities across OECD countries: A note", *Energy Policy*, vol.32(11), 2004, pp.1257-1260.
- [11] IEC 60034-30-1 ed1.0:2014 "Rotating Electrical Machines - Part 30-1: Efficiency Classes Of Line Operated AC Motors" (IE Code)
- [12] IEC 60050 (Publication date: 1990-10). Section 411-31: "Rotation Machinery – General, IEV ref. 411-31-10: "Induction Machine – an asynchronous machine of which only one winding is energized".
- [13] Y. Baidak, "Single-phase motor of hermetic compressor drive with improved performance characteristics", *Refrigeration Engineering and Technology*, vol.118, no.2, 2009, pp. 12 – 19,.
- [14] Y. Baidak, "Mathematical model of the electric motor of the hermetic compressor of the refrigerating appliance with a single-phase winding", *Refrigeration Engineering and Technology*, vol.122, no.6, 2009, pp. 06 – 15.
- [15] Y. Baidak, V. Smyk, "Numerical investigation of refrigeration machine compressor operation considering single-phase electric motor dynamic characteristics". *10th International Conference on Compressors and their Systems. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 232, 2017, doi:10.1088/1757-899X/232/1/012081
- [16] B.A. Behrend, "The Induction Motor: A Short Treatise on its Theory and Design, With Numerous Experimental Data and Diagrams". McGraw Publishing Company / *Electrical World and Engineer*, 1901.
- [17] Bobrow, L.S. (1996). "Fundamentals of Electrical Engineering", Oxford University Press, 1996. ISBN 978-0-19-510509-4.
- [18] A.Guzda, N.Szmlke, "Compressors in Heat Pumps", *Machine Dynamic Research*, vol. 39, №26, 2015, pp.71-83.
- [19] Y.J Bae, J.B.Kim, J. K. Kim, Y. J.Chang, "Mode change design for capacity modulation in reciprocating compressor", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 2008, pp.1391-1399.
- [20] Yu. Baydak et.al., "Energy Efficient Single-Phase Electric Motor of Domestic Refrigeration Devices Motor-Compressor Aggregate". *Proceedings of the 8th International Conference on Compressors and Coolants*, Papernicka – Smolenice, Slovak Republic, 2013.

Отримана в редакції 26.04.2023. Прийнята до друку 25.05.2023. Received 26 April 2023. Approved 25 May 2023. Available in Internet 19 June 2023.

УДК 621.181.1:681.5

ОГЛЯД СУЧАСНИХ СХЕМ РЕГУЛЮВАННЯ КОНТУРАМИ ПИЛОВУГІЛЬНИХ КОТЛОАГРЕГАТІВ ТЕС ПРИ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ ЇХ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

¹Новіков П.В., ²Штіфзон О.Й., ³Бунке О.С., ⁴Баган Т.Г., ⁵Плескач О.А.

^{1,2,3,4,5}Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"; м.Київ, пр. Перемоги, 37

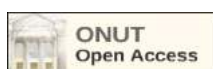
ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-2790-5809>, ²<http://orcid.org/0000-0003-0011-4617>, ³<https://orcid.org/0000-0002-7945-7040>, ⁴<http://orcid.org/0000-0002-0146-577X>, ⁵<https://orcid.org/0009-0008-5851-0800>

E-mail: ¹p.novikov@kpi.ua, ²oshtifzon@gmail.com, ⁴mtbagan@ukr.net, ³als.bunke@gmail.com, ⁵pleskach9@gmail.com

Copyright © 2021 by author and the journal "Automation of technological and business – processes".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: 10.15673/atbp.v15i2.2529

Анотація: В структурі генеруючих потужностей Об'єднаної енергосистеми України енергоблоки теплоелектростанцій (ТЕС) потужністю 200 і 300 МВт несуть основне навантаження для забезпечення балансу добового графіка електронавантаження в напівпіковому режимі. В 2022 році ці енергоблоки були однією з основних цілей ракетних атак з метою розбалансування енергосистеми. Аварійне відключення одних енергоблоків має компенсуватися потужністю інших, в протилежному випадку впроваджуються аварійні відключення електропостачання споживачів. Питання підвищення маневрових можливостей існуючих енергоблоків сьогодні стоїть вкрай гостро. Котлоагрегатам ТЕС притаманні зміни динамічних характеристик при зміні режиму їх роботи. Тому до систем регулювання висуваються підвищені вимоги до якості функціонування і запасів стійкості. Стаття містить аналіз сучасних розробок в області синтезу робастних і адаптивних систем регулювання інерційними контурами котлоагрегатів ТЕС. Розглянуті схеми регулювання з



табличним підлаштуванням параметрів ПІ-регулятора, кусково-лінійною адаптацією, а також схеми з внутрішньою моделлю та з динамічним коректором. В якості об'єкта керування розглядається водопаровий тракт пилувугільного прямооточного котлоагрегату ТЕС потужністю 300 МВт. Параметри налаштування розглянутих схем розраховані за відомими методиками. Побудовані комп'ютерні моделі схем регулювання, на основі яких проведено моделювання їх роботи. Здійснений порівняльний аналіз показників якості їх функціонування. Розраховано запаси стійкості систем регулювання в усьому діапазоні робочих навантажень енергоблоку. Побудовані графіки залежності запасів стійкості за підсиленням і за фазою залежно від навантаження енергоблоку. Отримані результати зведені в підсумкову таблицю із зазначенням переваг і недоліків кожної з розглянутих схем.

Abstract: In the structure of the generating capacities of the Integrated Power System of Ukraine, the power units of thermal power plants (TPP) with a capacity of 200 and 300 MW carry the main load to ensure the balance of the daily power demand curve in semi-peak mode. In 2022, these power units were one of the main targets of missile attacks aimed at unbalancing the energy system. The emergency shutdown of some power units must be compensated by the capacity of others, otherwise emergency shutdowns of power supply to consumers are introduced. The issue of increasing the maneuverability of existing power units is extremely acute today. Boiler units of TPP are characterized by changes in dynamic characteristics when their operation mode is changed. That is why control systems are subject to increased requirements for the quality of functioning and stability margins. The article contains an analysis of modern developments in the field of synthesis of robust and adaptive control systems by inertial circuits of TPP boiler units. Control schemes with tabular adjustment of PI controller parameters, piecewise-linear adaptation, as well as schemes with an internal model control and with a dynamic corrector are considered. The water-steam flow path of the pulverized coal direct-flow boiler unit of the TPP with a capacity of 300 MW is considered as a control object. The setting parameters of the considered circuits are calculated according to known methods. Computer models of regulation schemes were built, based on which simulations of their operation were carried out. A comparative analysis of quality indicators of their functioning was carried out. Stability margins of control systems in the entire range of operating loads of the power unit are calculated. Graphs of the dependence of the stability reserves on the gain and on the phase depending on the load of the power unit are constructed. The obtained results are summarized in a final table indicating the advantages and disadvantages of each of the considered schemes.

Ключові слова: система керування, котлоагрегат, ПІ регулятор, нестационарність, адаптація, підлаштування, запас стійкості.

Вступ

В 2022 році енергетика України зазнала безпрецедентного удару під час вторгнення російських військ. Частина генеруючих потужностей опинилася на окупованій території, включно з найбільшою в Європі Запорізькою АЕС і значною частиною відновлювальних джерел енергії на півдні країни. Деякі теплоелектроцентралі і теплоелектростанції (ТЕС) були повністю або частково зруйновані внаслідок терористичних ракетних атак. Однією з основних цілей цих атак є трансформатори енергоблоків ТЕС, як найбільш вразлива ланка з точки зору відмежування генератора енергоблоку ТЕС від енергосистеми. Виведення з ладу станцій розподілу електроенергії було додатковим чинником розбалансування енергосистеми. Ці фактори призвели до обмеження електропостачання, віялових відключень і навіть в окремих випадках часткових «блекаутів» [[1]].

Ці безпрецедентні події підкреслили важливість ролі ТЕС в структурі генерації електроенергії, а саме балансуванні графіків електронавантаження. Навіть до військових дій частка маневрових потужностей енергосистеми була недостатньою. Зараз ця ситуація ще погіршилася. Як маневрені використовуються енергоблоки ТЕС, які спроектовані для роботи в базових режимах, значна частина яких працює в непроектованих пікових і напівпікових режимах. За таких умов основними потужностями регулювання добового графіка електронавантаження є енергоблоки ТЕС 150, 200 і 300 МВт [[2]]. В цьому розрізі питання забезпечення стабільного, надійного і ефективного функціонування систем регулювання енергоблоків пилувугільних ТЕС в усьому діапазоні зміни навантаження залишається актуальним. В даній статті розглянуті сучасні схеми і методи регулювання інерційними контурами енергоблоків ТЕС в умовах нестационарності параметрів об'єкта керування. Проведений аналіз перехідних процесів та запасів стійкості систем регулювання у всьому діапазоні зміни навантаження енергоблоку.

Аналіз літературних джерел

Дослідження з метою підвищення ефективності функціонування енергоблоків ТЕС потужністю 200 і 300 МВт в маневрених режимах проводяться з кінця 1990-х років. В статті [[3]] розглядається система регулювання навантаження енергоблоку та температурного режиму. Авторами описано фізичні процеси водопарового тракту, які спричиняють зміни динамічних властивостей об'єкта керування. Сигналом, за яким здійснюється регулювання в описаній системі, є сигнал по температурі за підстельовим пароперегрівачем (ППП). Цьому параметру властиві інерційність і велика часова затримка. Тому використовують випереджальний сигнал і схему регулювання з диференціатором. Класично для цього використовується сигнал по температурі за верхньою радіаційною частиною (ВРЧ). Додатково авторами використаний сигнал по температурі пари за нижньою радіаційною частиною (НРЧ). Таким чином в даній схемі утворилося два диференціатора, при цьому час перехідних процесів зменшився на 25-30%. Іншою важливою задачею є забезпечення стійкості системи регулювання. У всьому діапазоні навантажень передбачено три пари налаштувань ПІ-регулятора. Цей спосіб є



простим, але має відомі недоліки [[5]]. В роботах Степанця О.В. [[4]] розглядалися методи адаптації параметрів налаштування ПІ-регулятора. Інший підхід використовували Бунке О.С. і Баган Т.Г. [[6], [7], [8]]. В них сконцентрувалися на синтезі робастних систем регулювання. В роботах Бунке О.С. [[6], [9]] запропонована двоканальна схема регулювання. В ній паралельно до ПІ-регулятора вмикається блок динамічної корекції. Правильно підібравши структуру і параметри блока корекції можна отримати регулятор, який забезпечить заданий запас стійкості на всьому діапазоні навантажень. В роботах [[7], [8], [10]] було запропоновано застосувати регулятор з внутрішньою моделлю (*IMC – Internal Model Control*). За допомогою розробленого програмного забезпечення можна отримати параметри регулятора для заданої структури об'єкта керування. Даний підхід дозволяє забезпечити виконання непрямих показників якості функціонування, таких як H_2 -норма чи H_∞ норма. В статті [[11]] авторами запропоновано алгоритм підлаштування параметрів ПІ-регулятора на основі кусково-лінійних функцій. Фактично за основу беруться налаштування згідно табличного методу. Параметри ПІ-регулятора для проміжних значень навантаження енергоблоку розраховуються за методом інтерполяції.

Згадані вище схеми і методи регулювання розглядалися окремо і порівнювалися звичайною системою регулювання без адаптації [[6], [7]]. Комплексного порівняння сучасних методів проведено не було.

Постановка задачі

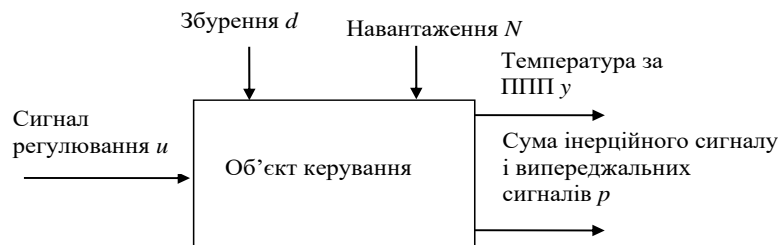
Метою даної статті є аналіз і порівняння результатів моделювання систем регулювання з різними схемами і методами розрахунку параметрів ПІ-регулятора для моделі температурного режиму водопарового тракту прямооточного котлоагрегату. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

- розрахувати налаштування ПІ-регулятора за обраним критерієм якості для схем з табличним підлаштуванням, кусково-лінійною адаптацією, динамічним коректором і регулятором з внутрішньою моделлю;
- розробити комп'ютерні моделі розрахованих вище систем регулювання і здійснити моделювання їх роботи на всьому діапазоні зміни навантаження об'єкта регулювання від мінімального до максимального значення, включаючи проміжні точки;
- визначити показники якості перехідних процесів для кількісної оцінки систем регулювання;
- оцінити запаси стійкості систем регулювання на всьому діапазоні зміни навантаження.

Виклад основного матеріалу

Опис моделі об'єкта керування

Об'єктом керування є ділянка водопарового тракту пилувугільного прямооточного котлоагрегату ТПП-210А від НРЧ до проміжної точки за ППП. Динамічна модель об'єкта детально описана в [[12]]. Спрощена схема представлена на рис. 1. Особливістю даної моделі є те, що вона враховує зміни динамічних характеристик ділянок водопарового тракту котла (НРЧ, ВРЧ, ППП) залежно від навантаження енергоблоку.



u – сигнал регулювання, що надходить від ПІ-регулятора

N – навантаження енергоблоку

d – зовнішні непередбачувані збурення

y – інерційний сигнал по температурі пари за ППП

p – випереджальний сигнал по відношенню до y , враховує швидкість зміни температури водопарової суміші за зонами НРЧ і ВРЧ.

Рис. 1 – Схема сигналів об'єкта керування

Fig. 1 – Control object signal scheme

Табличне підлаштування

Для трьох значень навантаження N розраховані налаштування ПІ-регулятора (рис. 2). Критерієм розрахунку була мінімізація динамічної похибки перехідного процесу за відсутності перерегулювання технологічного параметра.

Таблиця 1 – Налаштування ПІ-регулятора залежно від навантаження енергоблоку

Навантаження, МВт	Навантаження, %	K_p	T_i
225	75	0,15	90
260	87	0,24	160
300	100	0,29	190

Функція передачі об'єкта керування з двома диференціаторами для навантаження 225 МВт:



$$W_{об}^{225}(s) = \frac{4.54}{(74s + 1)(37s + 1)(25s + 1)(18s + 1)} e^{-94s} + \frac{3.14}{(79s + 1)(39s + 1)(26s + 1)} e^{-20s} \frac{145.6s}{70s + 1} + \frac{0.55}{(55s + 1)(28s + 1)} e^{-10s} \frac{64.5s}{25.2s + 1}$$

Функція передачі об'єкта керування з двома диференціаторами для навантаження 300 МВт:

$$W_{об}^{300}(s) = \frac{2.67}{(146s + 1)(77s + 1)(49s + 1)(37s + 1)} e^{-85s} + \frac{1.56}{(173s + 1)(86s + 1)(58s + 1)} e^{-15s} \frac{145.6s}{70s + 1} + \frac{0.46}{(193s + 1)(96s + 1)} e^{-20s} \frac{64.5s}{25.2s + 1}$$

При табличному підлаштуванні система регулювання має три пари налаштувань для різних діапазонів навантаження.

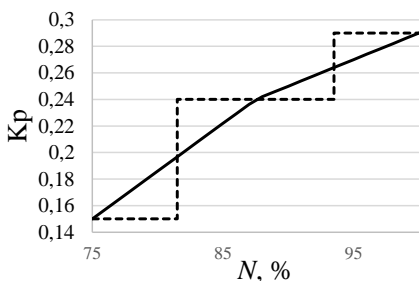
$$f_{PI}(Kp, Ti) = \begin{cases} N \in [75\%, 81\%), Kp = 0.15, Ti = 90 \\ N \in [82\%, 93\%), Kp = 0.24, Ti = 160 \\ N \in [94\%, 100\%), Kp = 0.29, Ti = 190 \end{cases}$$

Перемикання відбуваються на межі значень навантажень 81-82% і 93-94%.

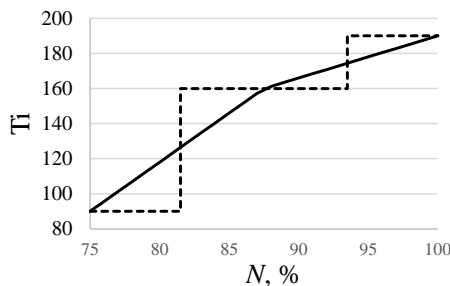
Кусково-лінійна адаптація

При кусково-лінійній адаптації функціональні залежності параметрів ПІ-регулятора ґрунтуються на значеннях з таблиці підлаштувань, отриманої попереднім методом:

$$f_{PI}^{Linear}(Kp, Ti) = \begin{cases} N \in [75\%, 87.5\%), \\ Kp = 0.15 + (N - 75) * 0,0072, \\ Ti = 90 + (N - 75) * 5,6; \\ N \in [87.5\%, 100\%), \\ Kp = 0.24 + (N - 87.5) * 0,004, \\ Ti = 160 + (N - 87.5) * 2,4. \end{cases}$$



----- Табличний — К.-лінійний



----- Табличний — К.-лінійний

а) налаштування Kp

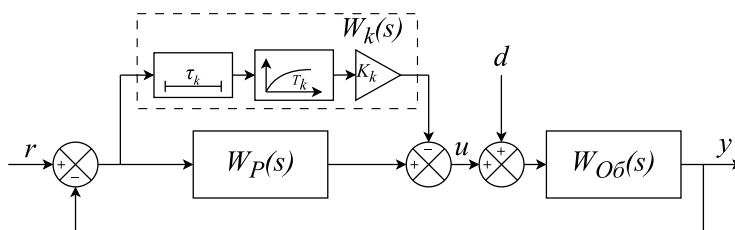
б) налаштування Ti

Рис. 2 – Порівняння методів адаптації налаштувань регулятора

Fig. 2 – Comparison of methods of adaptation of regulator settings

Розрахунок системи з динамічним коректором

Структурну схему регулювання з введенням динамічного коректора (ПІ-К) продемонстровано на рис. 3:



W_p – функція передачі ПІ-регулятора

W_k – функція передачі динамічного коректора



$W_{об}$ – функція передачі об'єкту керування

Рис. 3 – Структурна схема системи регулювання з динамічним коректором

Fig. 3 – Structural control scheme with a dynamic corrector

Функція передачі динамічного коректора складається з аперіодичної ланки 1-го порядку з транспортною затримкою:

$$W_k(s) = \frac{K_k}{T_k s + 1} e^{-\tau_k s} \quad (5)$$

K_k – коефіцієнт підсилення;

T_k – стала часу;

τ_k – часова затримка.

Згідно методики [[9]] функція передачі динамічного коректора для моделі об'єкту керування буде мати вигляд:

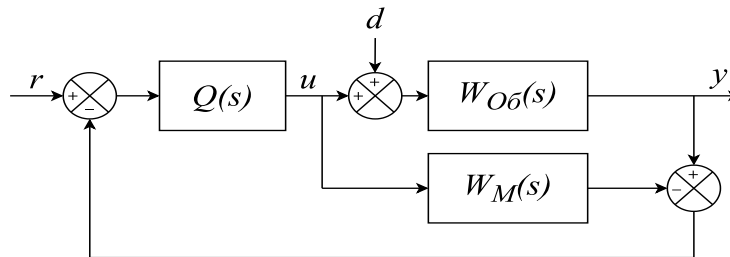
$$W_k(s) = \frac{0.18}{200s + 1} e^{-75s} \quad (6)$$

Функція передачі ПІ-регулятора матиме вигляд:

$$W_p(s) = 0.29 \left(1 + \frac{1}{190s} \right) \quad (7)$$

Розрахунок регулятора з внутрішньою моделлю

Структурна схема з ІМС продемонстрована на рис. 4:



$W_{об}(s)$ – номінальний об'єкт, $W_M(s)$ – модель об'єкту керування, $Q(s)$ – регулятор системи з внутрішньою моделлю

Рис. 4 – Структурна схема системи регулювання ІМС

Fig. 4 – Structural control scheme IMC

Для застосування методики [[10]] налаштування регулятора з внутрішньою моделлю необхідно апроксимувати об'єкт керування (1) аперіодичною ланкою 2-го порядку з затримкою.

За методом додаткових членів [[13], [14]] апроксимована модель об'єкту керування матиме вигляд:

$$W_{об}(s) = \frac{4.54}{(99s + 1)(50s + 1)} e^{-10s} \quad (8)$$

Використовуючи замість експоненціальної функції перші члени розкладання в ряд Тейлора і виконавши відповідні перетворення запишемо модель (8) у вигляді:

$$W_{об}(s) = \frac{4.54(1 - 10s)}{(99s + 1)(50s + 1)} \quad (9)$$

На рис. 4 регулятором є функція передачі $Q(s)$. Правильно визначеним регулятором для об'єкту керування у вигляді АП 2-го порядку з запізненням є вираз:

$$Q(s) = \frac{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}{k_{об}(\lambda s + 1)^2} \quad (10)$$

Параметр λ розрахуємо за методикою [[10]]:

$$T_i = T_1 + T_2 - T_f \quad (11)$$

$$T_f = \frac{\lambda^2}{2\lambda + \tau} \quad (12)$$

T_i – стала часу інтегрування ПІ-регулятора при навантаженні 225 МВт. В нашому випадку $T_i=90$. Отримуємо $\lambda=121.6$.

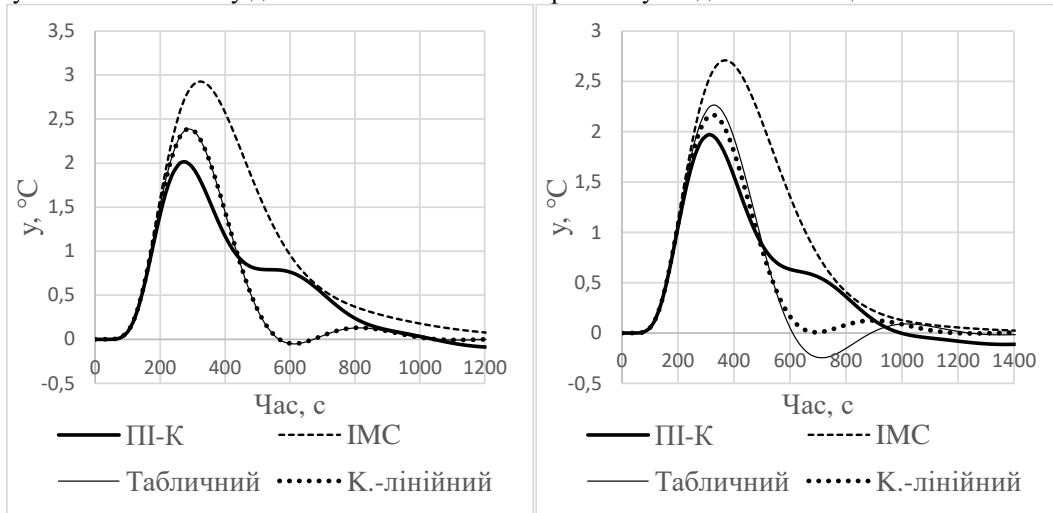
Остаточно функція передачі $Q(s)$ набуває вигляду:



$$Q(s) = \frac{\frac{\text{http://www.atbp.ontu.edu.ua/}}{(99s + 1)(50s + 1)}}{4.54(121.6s + 1)^2} \quad (13)$$

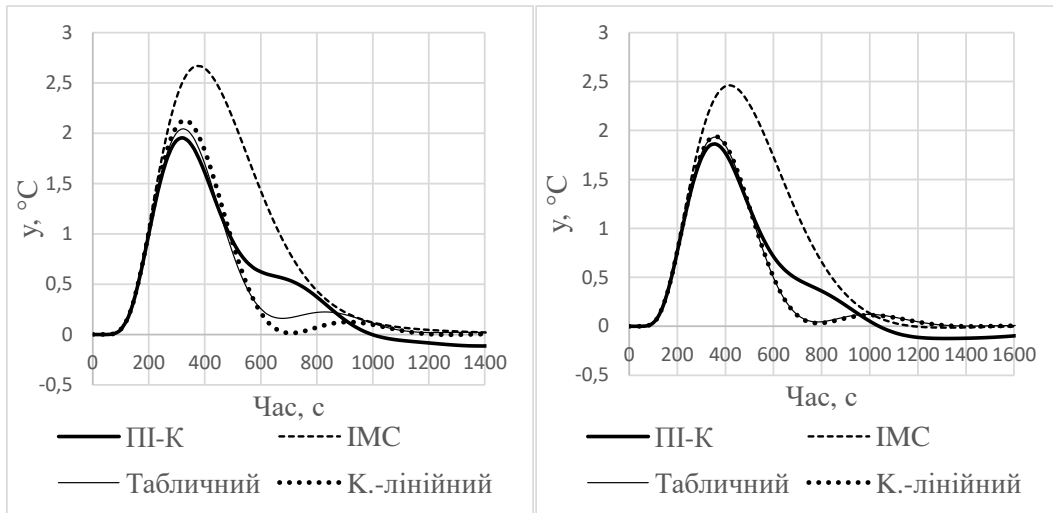
Результати дослідження

На рис. 5 представлені графіки перехідних процесів для різних значень навантаження. Порівняння роботи систем регулювання на всьому діапазоні навантажень енергоблоку зведене в таблиці 2.



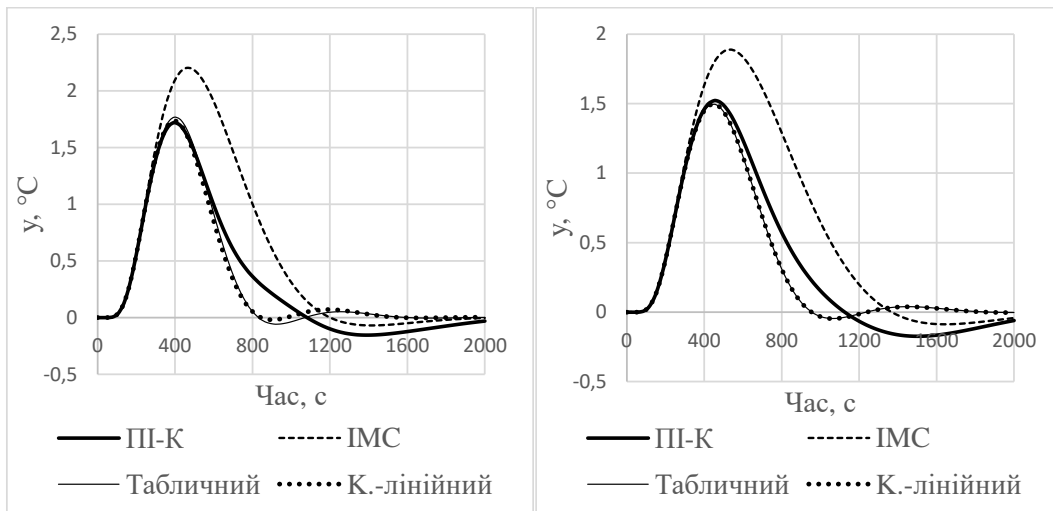
a

б



в

г



д

е

**Рис. 5 – Порівняння перехідних процесів схем регулювання при різних значеннях навантаження N :***a* – 75%, *b* – 81%, *в* – 82%, *г* – 87%, *д* – 93%, *e* – 100%**Fig. 5 – Comparison of transient processes of regulation schemes at different load values N :***a* – 75%, *b* – 81%, *в* – 82%, *г* – 87%, *д* – 93%, *e* – 100%**Таблиця 2 – Показники якості систем регулювання**

Показник	Схема	$N, \%$						
		75	81	82	87.5	93	94	100
Динамічна похибка	ПІ-К	2.03	1.98	1.96	1.87	1.72	1.69	1.52
	ІМС	2.96	2.71	2.67	2.46	2.2	2.16	1.89
	Табличний	2.39	2.26	2.04	1.91	1.77	1.67	1.50
	К.-лінійний	2.39	2.17	2.13	1.90	1.74	1.70	1.50
Час регулювання, с	ПІ-К	915	1510	1600	1630	1765	1820	1950
	ІМС	1220	1070	1080	1130	1530	1600	1920
	Табличний	955	1130	1085	1212	1292	1345	914
	К.-лінійний	955	1060	1080	1212	1321	1340	914
Перерегулювання, %	ПІ-К	4.7	5.5	5.7	6.6	8.7	9.1	10.7
	ІМС	-	-	-	-	3.2	3.4	4.7
	Табличний	2.0	10.9	-	-	3.3	-	3.0
	К.-лінійний	2.0	-	-	-	1.1	1.5	3.0
IAE	ПІ-К	776	799	804	823	843	848	876
	ІМС	8361	8235	8211	8078	7877	7838	7562
	Табличний	659	749	666	672	702	658	681
	К.-лінійний	659	664	665	672	676	677	681

Відзначимо на графіках рис. 5 поступове зменшення динамічної похибки і збільшення часу регулювання при збільшенні навантаження енергоблоку. Це пояснюється зміною динамічних характеристик об'єкта керування. При збільшенні навантаження коефіцієнт передачі зменшується, а інерційність збільшується. В системі з табличним підлаштуванням на межі переключень 81-82% N відбувається якісна зміна характеру перехідного процесу в порівнянні з системою з кусково-лінійною адаптацією (Рис. 5 б, в). При переключенні на налаштування для середнього рівня навантаження в перехідному процесі в системі з табличним підлаштуванням зникає перерегулювання, а час регулювання стає навіть меншим. Система регулювання з динамічним коректором має на низьких і середніх значеннях навантаження найменшу динамічну похибку. Система ІМС на середніх значеннях навантаження має кращий час регулювання. В інших випадках вона поступається системам з адаптацією і динамічному коректору. Система регулювання з кусково-лінійною адаптацією має в більшості випадків кращий абсолютний інтегральний показник IAE , а також менший час регулювання в порівнянні з іншими схемами. Варто зауважити, що при навантаженні більше 90% зміна параметрів об'єкта все менше впливає на характер і показники якості перехідних процесів. Це можна пояснити виходом енергоблоку на проектну потужність, якій характерний режим насичення. Чутливість до змін налаштувань ПІ-регулятора при цьому зменшується.

Дослідженні стійкості відображає якість функціонування систем з зовсім іншого боку (Рис. 6).

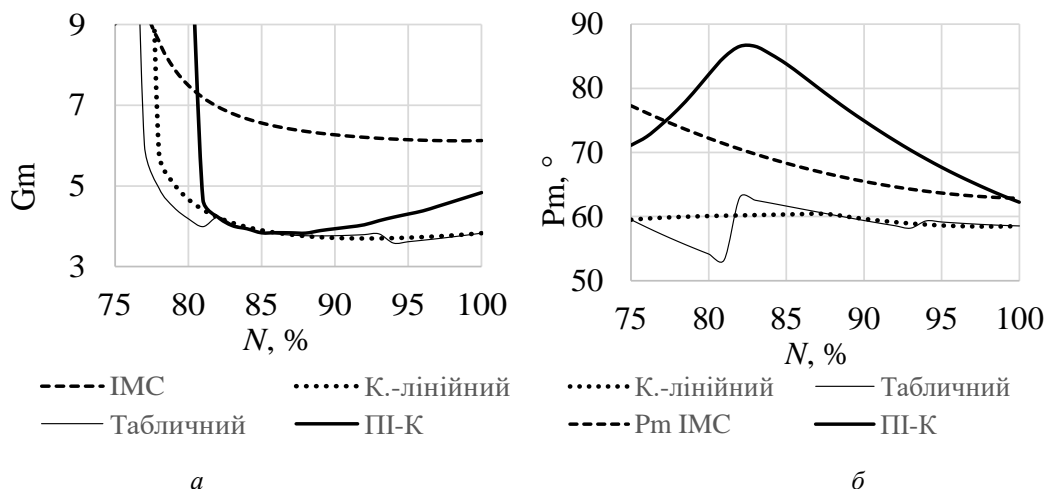


Рис. 6 – Порівняння запасів стійкості систем регулювання:
a – запас стійкості за підсиленням, *б* – запас стійкості за фазою
Fig. 6 – Comparison of stability margins of control systems:
a – for gain, *b* – for phase



Системи з табличним підлаштуванням і куско-лінійною адаптацією мають близькі запаси G_m на всьому діапазоні навантажень. Для схеми з табличним підлаштуванням характерні стрибкоподібні зміни запасу G_m в моменти зміни налаштування при навантаженнях $N=81-82\%$ і $93-94\%$. Система *ІМС* має суттєво більші запаси стійкості за підсиленням G_m в діапазоні $80-100\%$. Це зокрема пояснює значно більшу динамічну похибку перехідних процесів в схемі *ІМС*. Цікавий графік запасу стійкості G_m і для системи з динамічним коректором. До значення навантаження 81% запас G_m в ній є найбільшим, після цього різко зменшується до рівня систем з адаптацією налаштувань, після чого починає зростати при збільшенні навантаження.

На рис. 6б наведені запаси стійкості за фазою P_m на всьому діапазоні навантажень. Графік для схеми з табличним підлаштуванням має різкі зміни значень запасу P_m . В системі з кусково-лінійною адаптацією запас P_m майже не змінюється. Для системи *ІМС* найбільше значення запасу стійкості відповідає мінімальному навантаженню і поступово зменшується по мірі збільшення навантаження, але на всьому діапазоні запас P_m є більшим, ніж в системах з адаптацією. Найцікавішим є графік зміни P_m для системи з динамічним коректором. При збільшенні навантаження від мінімального значення запас за фазою P_m поступово збільшується, досягає свого максимуму при значенні $N=82\%$, після чого починає зменшуватися аж до досягнення максимуму навантаження.

Обговорення результатів

Схема з *ІМС* при порівнянні перехідних процесів має найгірші показники серед інших систем. Але це можна пояснити найкращими запасами стійкості, зокрема запасом за підсиленням G_m . В свою чергу такі показники якості і стійкості є результатом налаштування регулятора згідно методики [[10]]. Дана методика в першу чергу покликана забезпечити робастність і стійкість системи в умовах нестационарності параметрів об'єкта керування. Так як фактично схему *ІМС* можна звести до схеми з ПД-регулятором, то іншого способу, як "загрубити" налаштування регулятора, в даній схемі застосувати не можна.

Дослідження стійкості яскраво демонструє як таблична зміна налаштувань регулятора стрибкоподібно повертає запаси стійкості за підсиленням і за фазою до прийнятних значень при поступовому збільшенні навантаження. Система з кусково-лінійною адаптацією характеризується плавністю зміни запасу G_m і практично забезпечує сталість запасу за фазою P_m .

Система з динамічним коректором повністю виконує задачу, для якої було розроблена і спроектована. При найменших значеннях динамічної похибки в діапазоні навантажень $75-93\%$ дана система забезпечує суттєво кращі запаси стійкості, ніж системи з адаптацією і підлаштуванням. Тобто за рахунок своєї двоканальної структури вирішується протиріччя між забезпеченням більших запасів стійкості і більш швидкою реакцією системи регулювання. При цьому дані якості забезпечуються при сталих значеннях блоку регулювання на всьому діапазоні навантажень об'єкта. Це дозволяє говорити про всережимність застосування системи з динамічним коректором. В той же час це стосується і схеми з *ІМС*.

Таблиця 3 – Порівняння схем регулювання

Схема	Переваги	Недоліки
Табличне підлаштування	1. Простота методики розрахунку налаштувань регулятора і реалізації схеми. 2. Висока якість функціонування при розрахункових значеннях навантаження.	1. Необхідність проведення процедури ідентифікації для всіх розрахункових значень навантаження. 2. Погіршення показників якості на межі переключення між режимами. 3. Низькі запаси стійкості.
Кусково-лінійна адаптація	1. Відносна простота. 2. Висока якість функціонування на всьому діапазоні роботи енергоблоку. 3. Забезпечує необхідні запаси стійкості.	1. Ускладнена реалізації схеми на практиці.
ІМС	1. Простота методики розрахунку налаштувань регулятора. 2. Відсутність потреби в ідентифікації всіх режимів роботи об'єкта. 3. Високі запаси стійкості. 4. Всережимність застосування схеми.	1. Низькі прямі показники якості. 2. Обмеженість застосування для складних моделей об'єктів. Потреба в процедурі апроксимації більш простими моделями.



Динамічний коректор	<ol style="list-style-type: none"> 1. Відносна простота реалізації схеми на практиці. 2. Високі запаси стійкості. 3. Високі прямі показники якості. 4. Можливість застосування методики налаштування для складних нетипових моделей об'єкта. 5. Всережимність застосування схеми. 	1. Складність методики налаштування динамічного коректора.
---------------------	--	--

Висновки

Розглянуті сучасні схеми регулювання інерційними процесами в умовах нестаціонарності параметрів об'єкта керування. Серед розглянутих схем наявні *ИМС*, схема з динамічним коректором і схема з кусково-лінійною адаптацією параметрів ПІ-регулятора. Порівняння роботи систем регулювання проводилося за аналізом показників якості перехідних процесів і показників стійкості систем регулювання. Системи порівнювалися між собою, а також з системою з табличним підлаштуванням, як класичним способом при автоматизації нестаціонарних об'єктів.

Методика налаштування системи *ИМС* має складнощі застосування через обмеженість структур об'єктів регулювання, для яких вона розроблена. Хоча при відповідній моделі об'єкта задача налаштування зводиться до визначення лише одного параметра регулятора – сталої фільтра. Іншою перевагою є відсутність необхідності розрахунку налаштувань регулятора для інших режимів роботи обладнання. Недоліком методики налаштування є значний ухил в бік збільшення запасів стійкості, від чого страждають перехідні процеси.

Система з кусково-лінійною адаптацією характеризується простотою налаштування, стабільністю перехідних процесів, а також кращими запасами стійкості на межі між режимами, що не притаманно системі з табличним підлаштуванням.

Система з динамічним коректором забезпечує хороші як показники якості перехідних процесів, так і запаси стійкості. При цьому використовуються сталі налаштування регулятора і динамічного коректора на всьому діапазоні навантажень енергоблоку. Ще однією перевагою є можливість застосування методики налаштування для будь-якого реального об'єкта керування, так як вона є графо-аналітичною. В свою чергу це може бути і в деякому сенсі недоліком через її відносну складність і потребу в спеціальному програмному забезпеченні.

Список літератури:

- [1] Україна пережила перший блекаут в історії: чому зупинилися атомні енергоблоки та чим це загрожує. Українська правда [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.epravda.com.ua/publications/2022/11/28/694331/> (дата звернення: 16.03.2023).
- [2] Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2021 році. URL <https://ua.energy/wp-content/uploads/2021/11/ERAA-UA-2021-v6.pdf> (дата звернення: 18.02.2022 р.)
- [3] Свириденко, В.П., Попутников, А.Б. (2001) Опыт модернизации схемы регулятора тепловой нагрузки котла ТПП-210А при работе на угольной пыли. *Энергетика и электрофикация*, 4, 20-23.
- [4] Степанець, О. В., Моторина, Д. А. (2014). Adaptive automatic control system with PI-controller frequency tuning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9(68)), 45–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23340>
- [5] Rania A. Fahmy, Ragia I. Badr & Farouk A. Rahman. (2014). Adaptive PID Controller Using RLS for SISO Stable and Unstable Systems. *Advances in Power Electronics*, vol. 2014, Article ID 507142, 5 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/507142>
- [6] Kovrigo, Y.M., Kononov, M.A. & Bunke, A.S. (2012). Modernizing the heat load control system of a once-through boiler unit at a thermal power station using a dynamic corrector. *Thermal Engineering*, 59, 772–778. <https://doi.org/10.1134/S0040601512100072>
- [7] Kovrigo, Y.M., Vagan, T.G. & Bunke, A.S. (2014). Securing robust control in systems for closed-loop control of inertial thermal power facilities. *Thermal Engineering*, 61, 183–188. <https://doi.org/10.1134/S0040601514030057>
- [8] Bahan, T. (2017). Synthesis of robust controller with an internal model for objects without self-alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2 (88)), 27–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108531>
- [9] Ковриго Ю.М. Применение метода динамической коррекции в системах регулирования инерционными технологическими объектами [Текст] / Ю.М. Ковриго, А.С.Бунке, П.В. Новиков // Scientific Science Rise. – №1/2 (18) 2016.– С. 21-27.
- [10] Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Ю. М. Ковриго, О. В. Степанець, Т. Г. Баган, О. С. Бунке ; КНІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КНІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 155 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23117>
- [11] Novikov, P., Shtifzon, O., Bunke, O., Batiuk, S. (2022). Selecting a method for the parametric adaptation of PI-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters. *Eastern-*



European Journal of Enterprise Technologies, 2 (2 (116)), 61–68. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116>

- [12] Новіков, П.В., Бунке, О.С. (2020) Моделирование работы системы автоматического регулирования температурного режима проточного котлоагрегата на базе двоканального нечеткого контроллера. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. Серія «Технічні науки»*, 31(2(70)), 132-139. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/21>
- [13] Radtke, M.: Zur Approximation linearer aperiodischer Übergangs-funktionen. *Zeitschrift messen, steuern, regeln* 9 (1966), S. 192–196.
- [14] R. Isermann, M. Münchhof (2011) *Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-540-78879-9.

References:

- [1] Україна пережила першу блек-аут в історії: чому зупинялися атомні енергоблоку та чим це загрожує. *Українська правда* [Electronic resource] – Resource access mode: <https://www.epravda.com.ua/publications/2022/11/28/694331/> (Application date: 16.03.2023).
- [2] [2021 Report on compliance assessment (sufficiency) of the generating facilities]. *Natsionalna enerhetychna kompaniia UKRENERHO* [National power company UKRENERGO]. URL <https://ua.energy/wp-content/uploads/2021/11/ERAA-UA-2021-v6.pdf> (Request date: 18.02.2022) (Ukr.)
- [3] Sviridenko, V., Poputnikov, A. (2001). Opyt modernizatsii skhemy regulyatora teplovoy nagruzki kotla TPP-210A pri rabote na ugolnoy pyli. *Energetika i elektrofikatsiya*, 4, 20-23.
- [4] Степанець, О. В., Моторина, Д. А. (2014). Adaptive automatic control system with PI-controller frequency tuning. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(9(68)), 45–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23340>
- [5] Rania A. Fahmy, Ragia I. Badr & Farouk A. Rahman. (2014). Adaptive PID Controller Using RLS for SISO Stable and Unstable Systems. *Advances in Power Electronics*, vol. 2014, Article ID 507142, 5 pages. <https://doi.org/10.1155/2014/507142>
- [6] Kovrigo, Y.M., Konovalov, M.A. & Bunke, A.S. (2012). Modernizing the heat load control system of a once-through boiler unit at a thermal power station using a dynamic corrector. *Thermal Engineering*, 59, 772–778. <https://doi.org/10.1134/S0040601512100072>
- [7] Kovrigo, Y.M., Bagan, T.G. & Bunke, A.S. (2014). Securing robust control in systems for closed-loop control of inertial thermal power facilities. *Thermal Engineering*, 61, 183–188. <https://doi.org/10.1134/S0040601514030057>
- [8] Bahan, T. (2017). Synthesis of robust controller with an internal model for objects without self-alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2 (88)), 27–33. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108531>
- [9] Kovrigo, Y.M., Bunke, A.S., Novikov, P.V. (2016). Application of the method of dynamic correction in control systems of inertial technological objects. *Scientific Science Rise*, №1/2(18), 21–27.
- [10] Suchasna teoriya upravlinnya. Chastyna 2. Prykladni aspekty suchasnoyi teorii upravlinnya [Electronic resource] : pidruchnyk dlya stud. spetsial'nosti 151 «Avtomatyzatsiya ta komp'yuterno-intehrovani tekhnolohiyi» / Kovrigo, Y.M., Stepanets O. V., Bahan T.G., Bunke O.S. ; KPI im. Ihorya Sikors'koho. – Kyiv : KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2018. – 155 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/23117> (Request date: 20.03.2023) (Ukr.)
- [11] Novikov, P., Shtifzon, O., Bunke, O., Batiuk, S. (2022). Selecting a method for the parametric adaptation of PI-controller in the control systems of boiler assemblies at thermal power stations with supercritical parameters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (116)), 61–68. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254116>
- [12] Novikov, P.V. & Bunke, A.S (2020) Modeling of control system of temperature mode of direct-flow steam boiler based on two-channel fuzzy controller. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series “Technical sciences”*, (31(2(70)), 132-139. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/21>
- [13] Radtke, M.: Zur Approximation linearer aperiodischer Übergangs-funktionen. *Zeitschrift messen, steuern, regeln* 9 (1966), S. 192–196.
- [14] R. Isermann, M. Münchhof (2011) *Identification of Dynamic Systems. An Introduction with Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-540-78879-9.

Отримана в редакції 30.05.2023. Прийнята до друку 15.06.2023. Received 30 May 2023. Approved 15 June 2023. Available in Internet 19 June 2023.