

**Новіков П. В.**

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

**Тесленко О. І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Бельдій В. І.**

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

**Бунке О. С.**

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

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ ЕЛЕКТРОДНОГО КОТЛА ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗАНУРЕНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

*В Україні використання електродних котлів як споживачів-регуляторів на практиці є новітньою технологією для регулювання графіків електричного навантаження в енергосистемі. Промислові електродні котли мають велику потужність, вимірювану мегаватами або десятками мегават. Вони можуть суттєво впливати на рівень споживання енергії, навіть на рівні регіональних енергосистем. Зниження маневрових потужностей теплових і гідроелектростанцій покладає основну частку виробництва електроенергії на атомні електростанції, які не можуть швидко адаптуватися до графіків енергоспоживання. Внаслідок цього в енергосистемі присутні періоди з профіцитом електроенергії. В сучасних умовах технологічного розвитку в енергетиці з'явилась можливість побудови систем автоматичного регулювання частоти і потужності на принципово іншій основі, яку доцільно реалізувати в енергосистемі України. Побудова такої системи автоматичного регулювання частоти і потужності ґрунтується на зменшенні енергоспоживання спеціальною групою споживачів-регуляторів. Електродні котли дозволяють в короткий проміжок часу змінювати свою електричну потужність, здійснюючи перетворення електричної енергії в теплову. Разом з тим важливо дослідити динаміку змін температури вихідного теплоносія такого котла. У статті розглядаються динамічні процеси виробництва теплової енергії та забезпечення уставки теплоносія на виході з котла при різних змінах споживання електричної енергії. Детально досліджено будову та фізичний процес нагрівання води в електродному котлі з зануреним електродом шведської компанії Zeta моделі ZVP 2840. Отримано математичні моделі динаміки для секції нагріву та секції змішування. Проведено моделювання перехідних процесів при різних змінах уставки теплоносія на виході з котла. Моделювання показало, що чим більша зміна уставки теплоносія, тим довший перехідний процес. При цьому величина зміни уставки в системі керування є пропорційною до динамічного відхилення.*

**Ключові слова:** електродний котел, занурений електрод, споживач-регулятор, динамічна модель, теплообмінник, балансування енергосистеми.

**Постановка проблеми.** Потужні промислові електродні котли є електричними теплогенераторами (ЕТГ), які можуть швидко змінювати своє навантаження залежно від потреб споживача або енергосистеми, в яку вони підключені. Їх можна використовувати як споживачі-регулятори для стабілізації енергетичної системи. Залучення потужних ЕТГ в систему автоматичного регулювання частоти і потужності (САРЧП), на відміну

від традиційного підходу, ґрунтується не на введенні додаткових регулюючих потужностей при виникненні в об'єднаній енергосистемі України (ОЕС) дефіциту активної потужності, а на зменшенні енергоспоживання спеціальною групою споживачів-регуляторів [1]. Це дозволяє використовувати їх для компенсації коливань виробництва електроенергії з інших джерел, зокрема відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [2, 3], або

при надлишку електроенергії, яка генерується атомними електростанціями (АЕС). З їх допомогою можливо регулювати частоту в енергосистемі, змінюючи їх потужність в реальному часі. Таким чином електродні котли можуть надавати системні послуги для енергосистеми щодо забезпечення стабільності та підтримки частоти на необхідному рівні [4, 5].

У періоди низького навантаження електродні котли можуть використовувати надлишкову електроенергію [6–8] для виробництва тепла, що зменшує втрати енергії та допомагає збалансувати систему.

Впровадження цієї технології, за даними [9], може позитивно вплинути на галузь, сприятиме ефективному використанню ресурсів та зменшить негативний вплив на навколишнє середовище [10, 11].

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Електродні котли реалізують концепцію Power-to-Heat [12]. Їх перевагою, в порівнянні, з іншими типами споживачів-регуляторів, є великий діапазоном регулювання [13], так як вони перетворюють в теплову енергію від 95 до 99.5 % споживаної електроенергії. Електродні котли використовуються в Європі більше 70 років. Вони набули широкого розповсюдження у 1960-х роках, особливо в країнах із значними гідроенергетичними ресурсами (наприклад, Норвегія) [14]. Приблизно в 2010 році, з'явився новий ринок електродних котлів: регулювання мереж зі зростаючою часткою генерації переривчастого вітру. Перші запити надійшли від датських муніципальних когенераційних установок, від яких датський регулятор електромережі вимагав встановити тепловий накопичувач, щоб запобігти потенційній нестабільності мережі, що виникає через значну потужність вітрової енергетики в мережі. У цьому випадку вся потужність котла використовується для, так званого, негативного регулювання (negative regulation) [10] мережі.

В Україні Інститутом загальної енергетики НАН України проводилися дослідження [15] з ущільнення добових графіків електронавантаження (ДГЕН) з використанням електродних котлів. В роботі [16] проведені еколого-енергетичні розрахунки результатів впровадження комплексу електродних котлів з метою зменшення значень нічного провалу ДГЕН і, як наслідок, збільшення ефективності виробництва електроенергії існуючими вугільними ТЕС. В роботі [13] визначені акумуляційні можливості централізованих систем опалення великих міст, що дозволяє використовувати

електродні котли в парадигмі Power-to-Heat навіть в літній період для потреб ГВП.

В роботі [17] здійснений аналіз існуючих технологій генерації теплової енергії з використанням електродних котлів з метою визначення динамічних характеристик цих котлів при зміні електронавантаження в контексті можливості їх застосування в системі автоматичного регулювання частоти і потужності (АРЧП) енергосистеми України.

Але у згаданих вище роботах не проводився аналіз динамічних характеристик котла з теплової частини. Актуальною задачею є визначення якості роботи системи регулювання для забезпечення уставки теплоносія на виході з котла при різких змінах споживання електричної енергії.

**Постановка завдання.** Метою статті є отримання кількісних результатів функціонування системи керування процесом нагрівання теплоносія в електродному котлі великої потужності із зануреним електродом. В даній статті увагу зосереджено на динамічних процесах нагрівання води в електродному котлі шведської компанії Zeta моделі ZVP 2840.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити будову та фізичний процес нагрівання води в електродному котлі з зануреним електродом.
2. Отримати динамічну математичну модель процесу нагріву води в електродному котлі.
3. На основі математичних моделей розробити систему керування.
4. Провести моделювання системи керування для отримання перехідних процесів.

У роботі використовуються математичні методи дослідження, такі як опис фізичного процесу за допомогою диференціальних рівнянь, перетворення Лапласа, рівняння теплового та енергетичного балансу, а також методи комп'ютерного моделювання.

#### **Виклад основного матеріалу. Динамічна модель секції нагрівання теплоносія.**

Розглянемо конструкцію електродного котла Zeta моделі ZVPI/ZHPI [18]. Детально схема і принцип роботи даного типу описані в [17, 18].

Котел можна умовно розділити на три секції (рис. 1). Вода надходить в бак по трубі знизу, а виходить зверху, тобто вода рухається знизу вгору.

Перша секція – нижня (1). Тут передача теплової енергії відсутня, тобто теплоносії фактично не контактує з електродами і не нагрівається. Вода в баку розширюється, швидкість потоку зменшується.

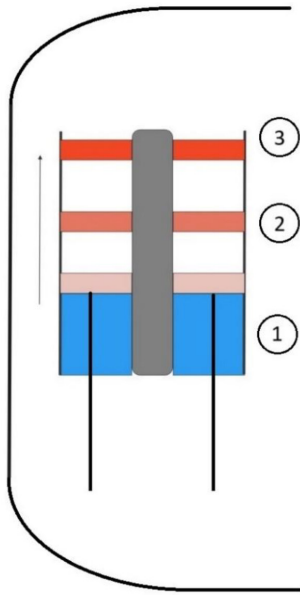


Рис. 1. Схематичне зображення основних зон в баку котла та їх меж

В наступній секції теплоносій потрапляє в зону протікання струму від електрода до протиелектроду і, відповідно, починається нагрів (2). Цей процес є лінійним. Далі теплоносій поступово піднімається вгору і покидає ділянку контакту з електродом. В цей момент нагрів завершується.

У верхній частині бака котла (3) нагрітий теплоносій змішується з холодною водою, яка потрапляє туди оминувши зону нагрівання, наприклад через ділянку між стінкою котла та протиелектом.

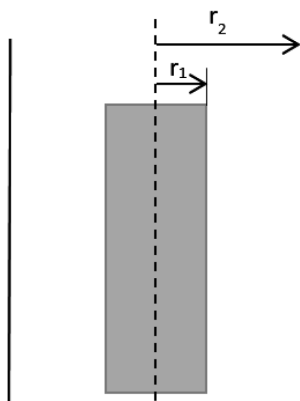


Рис. 2. Схематичне зображення положення електрода та протиелектрода

Струм який протікає по концентричним провідникам можна розрахувати використавши наступну формулу [19]:

$$I = \frac{2\pi L \sigma V_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (1)$$

де  $L$  – довжина оголеного електрода, см,  $\sigma$  – електропровідність води, См/см,  $V_0$  – напруга, В,  $r_1$ ,  $r_2$  – радіуси електрода та протиелектрода відповідно, см

Потужність обчислюється за формулою:

$$P = UI. \quad (2)$$

Підставивши (1) в (2) можна визначити електричну потужність котла:

$$P = UI = \frac{2\pi L \sigma U^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi \sigma U^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} L. \quad (3)$$

В формулі (3) можна виділити вираз для розрахунку значення, яке не залежитиме від довжини оголеного електрода  $L$ :

$$\lambda = \frac{2\pi \sigma U^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}. \quad (4)$$

Підставивши (4) в (3) формула для визначення електричної потужності набуде вигляду:

$$P = \lambda L. \quad (5)$$

Кількість теплоти віддана будь-яким джерелом (нагрівачем) розраховується за формулою:

$$Q = P\tau, \quad (6)$$

де  $P$  – потужність джерела,  $\tau$  – час протягом якого джерело віддавало тепло.

Підставивши (5) в (6) отримаємо:

$$Q = \lambda L\tau. \quad (7)$$

Запишемо рівняння теплового балансу:

$$Q(t) = Q_{out}(t) - Q_{in}(t), \quad (8)$$

де  $Q(t)$  – теплова енергія передана теплоносію від електродів,  $Q_{in}(t)$  – кількість теплоти, яку має теплоносій на вході в котел,  $Q_{out}(t)$  – кількість теплоти, яку має теплоносій на виході з котла.

Відповідно до формули визначення кількості теплоти:

$$Q_{out} = cmT_{out} = cgtT_{out}; \quad (9)$$

$$Q_{in} = cmT_{in} = cgtT_{in}, \quad (10)$$

де  $g$  – масова витрата теплоносія, кг/с,  $c$  – питома теплоємність речовини, Дж/(кг · °C);  $T_{in}$ ,  $T_{out}$  – температури на вході та виході з зони нагріву, °C

Теплова енергія, що передається протягом проміжку часу  $\tilde{t}$ :

$$Q(t) = \lambda \int_0^{\tilde{t}} L(t - \tau(g, L)) dt, \quad (11)$$

де  $\tau(g, L)$  – часова затримка що залежить від масової витрати теплоносія та довжини оголеного електрода,  $\tilde{t}$  – час, протягом якого теплоносіє проходить оголену частину електродів  $L$ .

Кількість теплоти після зони нагріву дорівнюватиме:

$$Q_{out}(t) = cg \int_0^{\tilde{t}} T_{out}(t) dt. \quad (12)$$

Кількість теплоти теплоносія який омине зону нагріву, в початковій точці змішування:

$$Q_{in}(t) = cg \int_0^{\tilde{t}} T_{in}(t - \tau(g)) dt, \quad (13)$$

$\tau(g)$  – час який знадобиться холодній воді щоб пройти повз зону нагрівання.

Підставивши (11)–(13) у (8) отримаємо рівняння динаміки зміни температури на виході з зони нагріву:

$$\lambda \int_0^{\tilde{t}} L(t - \tau(g, L)) dt = cg \int_0^{\tilde{t}} (T_{out}(t) - T_{in}(t - \tau(g))) dt, \quad (14)$$

$$\frac{\lambda}{cg} L(t - \tau(g, L)) + T_{in}(t - \tau(g)) = T_{out}(t). \quad (15)$$

#### Динамічна модель секції змішування

У верхній частині баку котла нагрітий теплоносіє змішується з холодною водою, яка потрапляє туди оминувши зону нагрівання, наприклад через тонку ділянку між стінкою котла та протиелектомом.

Процес змішування в у зоні змішування описується наступним рівнянням [20]:

$$m \frac{dh_{sum}}{dt} = M_{zap} h_{zap} + M_{хол} h_{хол} - M_{sum} h_{sum}, \quad (16)$$

де  $m$  – маса води в зоні змішування;  $h_{хол}$ ,  $h_{zap}$ ,  $h_{sum}$  – ентальпії гарячого, холодного теплоносіїв і суміші відповідно;  $M_{хол}$ ,  $M_{zap}$ ,  $M_{sum}$  – масова витрата гарячого, холодного теплоносіїв і суміші відповідно.

Згрупуємо ентальпії суміші в лівій частині диференційного рівняння:

$$m \frac{dh_{sum}}{dt} + M_{sum} h_{sum} = M_{zap} h_{zap} + M_{хол} h_{хол} \quad (17)$$

або

$$\frac{m}{M_{sum}} \frac{dh_{sum}}{dt} + h_{sum} = \frac{M_{zap} h_{zap} + M_{хол} h_{хол}}{M_{sum}}; \quad (18)$$

$$\frac{m}{M_{sum}} = T_{sum}; \quad (19)$$

$$M_{sum} = M_{zap} + M_{хол}; \quad (20)$$

$$\frac{dh_{sum}}{dt} + h_{sum} = \frac{M_{zap} h_{zap} + M_{хол} h_{хол}}{M_{zap} + M_{хол}}, \quad (21)$$

де  $T_{sum}$  – постійна часу, с;

Детальне виведення рівняння динаміки зони змішування, перехід від ентальпій до температури теплоносія і кількісний розрахунок коефіцієнтів диференційного рівняння наведений в статті [16].

Диференційне рівняння по температурі теплоносія за зоною змішування має вигляд:

$$22 \frac{dt_{sum}}{dt} + t_{sum} = 0.6 t_{zap} + 0.4 t_{хол}, \quad (22)$$

де  $t_{sum}$  – функція часу по температурі суміші гарячої і холодної води;  $t_{zap}$  – функція часу по температурі гарячої води після зони нагрівання;  $t_{хол}$  – функція часу по температурі холодної води.

#### Моделювання системи керування

Структурна схема системи керування температурою на виході із котла наведена на рис. 3. Моделювання роботи системи керування проводилось за допомогою програмного забезпечення Matlab. Модель складається з двох основних секцій: нагрівання і змішування. Сигнал керування  $u(t)$  подається на виконавчий механізм, яким є електропривод постійної швидкості. Привод двигуна з'єднаний з тросом, який опускає або піднімає ізоляційні екрани на заданий рівень. Привод описується як функція передачі інтегратора з коефіцієнтом підсилення  $1/1,8$ , що означає, що час відкриття на 100 % здійснюється за 180 секунд. Система

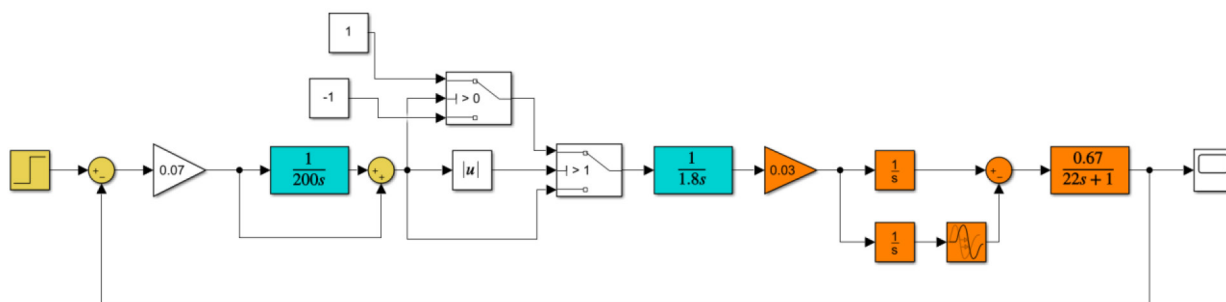


Рис. 3. Структурна схема системи керування котлом

керування на основі ПІ-регулятора з пропорційним параметром налаштування  $K_p = 0,07$  та інтегральним параметром налаштування  $K_i = 1/200 = 0,005$ . Коли екрани максимально закривають електрод, котел працює на мінімальній потужності, а при повністю відкритих екранах досягається максимальна потужність.

На рис. 4 показано, як змінюється температура теплоносія на виході при зміні уставки теплової води на виході на 5 °C, 10 °C, 20 °C і 30 °C:

Змінюючи задане значення, отримані результати моделювання відрізняються один від одного. Зокрема, час, коли температура охолоджуючої рідини досягає свого пікового значення, збільшується залежно від збільшення уставки.

З результатів аналізу видно, що чим більше змінюється положення екранів, тим довше триває процес нагріву теплоносія. Іншими словами, тривалість процесу нагрівання залежить від швидкості зміни положення екранів. Змінюючи задане значення, отримані результати моделювання відрізняються один від одного. Зокрема, час, коли температура охолоджуючої рідини досягає свого пікового значення, збільшується залежно від збільшення уставки. Для зміни уставки до 5 °C процес переходу триває 350 секунд, для зміни уставки до 10 °C процес переходу триває 400 секунд, для 20 °C – 500 секунд і для максимальної зміни уставки до 30 °C – 600 секунд. Тривалість розгінних характеристик для цього об'єкта залежить від його режиму роботи, тобто такий об'єкт характеризується нестационарністю динамічних характеристик.

**Висновки.** Незважаючи на швидкісні динамічні властивості з електричної частини, зокрема для котла ZVP 2840 швидкість зміни навантаження від мінімального до максимального становить 180 секунд, теплові процеси в цьому котлі є повільнішими. Для зміни уставки на 5 °C перехідний процес по температурі на виході з котла становить 350 секунд, при зміні уставки на 10 °C перехідний процес триває 400 секунд, для 20 °C – 500 секунд і для максимальної зміни уставки на 30 °C – 600 секунд. При цьому чим більше значення зміни уставки, тим більшою є динамічна похибка в процесі регулювання. При зміні уставки на 5 °C вона складає 1,5 °C, на 10 °C – 3 °C, а при зміні уставки 30 °C динамічна похибка досягає 14 °C. Результати моделювання підтверджуються технологічним регламентом експлуатації цього котла, в якому дозволяється змінювати уставку за один перехідний процес на 10 °C. Таким чином, застосування електродного котла із зануреним електродом як високоманевреного споживача-регулятора може бути ускладнене у випадку, коли до температури вихідного теплоносія висуваються жорсткі вимоги до точності підтримання температури. У випадку, коли такі вимоги відсутні, або між котлом і споживачем теплової енергії встановлена буферна ємність, то котли даного типу можуть успішно застосовуватися як споживачі-регулятори з динамічними характеристиками, які визначаються технічними засобами керування цим котлом. У випадку з котлом марки ZVP 2840 швидкість зміни електричної потужності напряму пов'язана з швидкістю

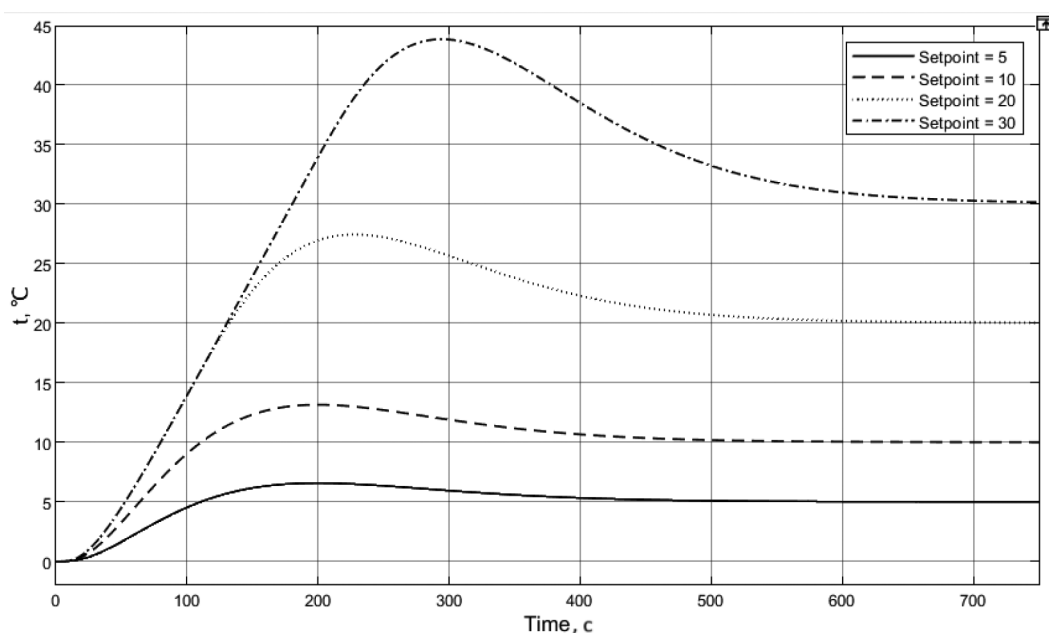


Рис. 4. Перехідні процеси в системі керування котла із зануреним електродом

ходу електропривода ізолюючих екранів електродів. Усі вище зазначені характеристики необхідно враховувати при проектуванні та налагодженні

системи керування електричним котлом в режимі споживач-регулятор для балансування енергетичної системи.

### Список літератури:

1. Кулик М. М. Техніко-економічні аспекти використання споживачів-регуляторів у системах автоматичного регулювання частотою і потужністю. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Том 1. № 40. С. 20–28. DOI: 10.15407/pge2015.01.020
2. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mathiesen B. V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*. 2014. V. 68, P. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089
3. Revesz A., Jones P., Dunham C., Davies G., Marques C., Matabuena R., Scott J., Maidment G. Developing novel 5th generation district energy networks. *Energy*. 2020. V. 201, 117389. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117389
4. Buffa S., Cozzini M., D'Antoni M., Baratieri M., Fedrizzi R. 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 104, P. 504–522. DOI: 10.1016/j.rser.2018.12.059
5. Wirtz M., Heleno M., Moreira A., Schreiber T., Müller D. 5th generation district heating and cooling network planning: A Dantzig–Wolfe decomposition approach. *Energy Conversion and Management*. 2023. V. 276, 116593. DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116593
6. Derii V., Teslenko O., Lenchevsky E., Denisov V., Maistrenko N. Prospects and energy-economic indicators of heat energy production through direct use of electricity from renewable sources in modern heat generators. *Systems, Decision and Control in Energy IV*. 2023. V. I. P. 451–463. DOI: 10.1007/978-3-031-22464-5\_27
7. Babak V., Kulyk M. Possibilities and perspectives of the consumers-regulators application in systems of frequency and power automatic regulation. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2023. № 4. P. 72–80. DOI: 10.15407/techne2023.04.072
8. Hotra O., Kulyk M., Babak V., Kovtun S., Zgurovets O., Mroczka J., Kisała P. Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. *Energies*. 2024. 17 (1). 27. DOI: 10.3390/en17010027
9. Пантелєєва І. В., Шматько Н. М., Глушко А. В. Види інновацій в енергетиці, що розвиваються. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34(73). № 4. С. 129–134. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.4/21
10. Witkowski K., Haering P., Seidelt S., Pini N. Role of thermal technologies for enhancing flexibility in multi-energy systems through sector coupling: technical suitability and expected developments. *IET Energy Syst. Integr.* 2020. 2. P. 69–79. DOI: 10.1049/iet-esi.2019.0061
11. Liu D., Zhang G., Huang B., Liu W. Optimum Electric Boiler Capacity Configuration in a Regional Power Grid for a Wind Power Accommodation Scenario. *Energies*, 2016. 9(3):144. DOI: 10.3390/en9030144
12. Power-to-X / Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Power-to-X> (дата звернення 25.03.2025).
13. Дерій В. О., Левчук А. П. Реальний потенціал маневреної потужності ТЕЦ України з впровадженнями електротепловими регуляторами. *Проблеми загальної енергетик*. 2016. Том 3. № 46. С. 19–27. DOI: 10.15407/pge2016.03.019
14. Electrode boilers and the energy transition. *Modern Power Systems*. URL: <https://www.modernpowersystems.com/features/featureelectrode-boilers-and-the-energy-transition-6229858> (дата звернення 27.03.2025).
15. Ленчевський Є. А., Тесленко О. І. Перспективні можливості збільшення загального потенціалу маневрених потужностей об'єднаної енергетичної системи України. *Вчені записки ТНУ імені Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32(71). № 3. С. 194–202. DOI: 10.32838/2663-5941/2021.3/30
16. Новіков П. В., Тесленко О. І., Ленчевський Є. А. Еколого-енергетичні показники технології управління режимами об'єднаної енергосистеми України із використанням електричних теплогенераторів. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 1. С. 4–16. DOI: 10.33070/etars.1.2022.01
17. Novikov P., Teslenko O., Beldii V., Lenchevsky E., Bunke O. Review of Technologies of Thermal Energy Generation Using High Voltage Electrode Boilers in the Context of Their Application as Energy Load Regulator. In: Zaporozhets, A. (editor). *Systems, Decision and Control in Energy V. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. V. 481. P. 355–370. DOI: 10.1007/978-3-031-35088-7\_18
18. Introducing the world's best hot water and steam boilers. *Zander & Ingeström AB*. URL: [https://www.zeta.se/siteassets/zander--ingestrom/elpannor/dokument-elpannor/hot-water-and-steam-boilers\\_en.pdf](https://www.zeta.se/siteassets/zander--ingestrom/elpannor/dokument-elpannor/hot-water-and-steam-boilers_en.pdf) (дата звернення 27.03.2025).

19. Purcell E.M. Solutions Manual to Accompany Electricity and Magnetism: Berkeley Physics Course, Volume 2. First Edition. McGraw-Hill, 1966.

20. Novikov P., Teslenko O., Beldii V., Lenchevsky E., Shtifzon O. Dynamic Model of a High-Capacity Electric Boiler with an Immersed Electrode. In: Babak V., Zaporozhets A. (eds). *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. V. 552. P. 243–260. DOI: 10.1007/978-3-031-67091-6\_11

**Novikov P.V., Teslenko O.I., Beldii V.I., Bunke O.S. MODELING  
OF THE WATER TEMPERATURE AUTOMATION SYSTEM  
OF A HIGH-POWER ELECTRODE BOILER WITH AN IMMERSED ELECTRODE**

*In Ukraine, the use of electrode boilers as consumers-regulators is in practice the modern technology for regulating electrical load schedules in the power system. Industrial electrode boilers have a large capacity, measured in megawatts or tens of megawatts. They can significantly affect the level of energy consumption, even at the level of regional power systems. The reduction in the shunting capacities of thermal and hydroelectric power plants places the main share of electricity production on nuclear power plants, which cannot quickly adapt to energy consumption schedules. As a result, there are periods of electricity surplus in the power system. In modern conditions of technological development in the power industry, it has become possible to build automatic frequency and power control systems on a fundamentally different basis, which is advisable to implement in the power system of Ukraine. The scheme of such an automatic frequency and power control system is based on reducing energy consumption by a special group of consumers-regulators. Electrode boilers allow changing their electric power in a short period of time, converting electrical energy into thermal energy. At the same time, it is important to study the dynamics of changing the temperature of the output coolant of such a boiler. The article considers the dynamic processes of thermal energy production and ensuring the coolant setpoint at the boiler outlet during sharp changes in electrical energy consumption. The structure and physical process of heating water in an electrode boiler with an immersed electrode of the Swedish company Zeta model ZVP 2840 are studied in detail. Mathematical models of dynamics for the heating section and the mixing section are obtained. Transient processes are simulated with various changes in the coolant setpoint at the boiler outlet. The modeling showed that the greater the change in the coolant setpoint, the longer the transient process. In this case, the magnitude of the change in the setpoint in the control system is proportional to the dynamic deviation.*

**Key words:** electrode boiler; control system; consumer-regulator; dynamic model; heat exchanger; power system balancing.