УДК 62-533.66
DOI https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/11

Батюк С.Г.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лобзов Н.С.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАРАБАНОВОГО КОТЛА

Функціональне моделювання системи автоматичного регулювання – моделювання статичних і динамічних функцій системи автоматичного регулювання функціональними блок-схемами в системі комп'ютерної математики Matlab (пакет Simulink). Розроблені й протестовані функціональні моделі автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла. Змодельована система автоматичного регулювання теплового навантаження барабанового котла. Змодельована система автоматичного регулювання рівня в барабані котла з урахуванням ефекту «набрякання рівня». Змодельована комплексна робота системи автоматичного регулювання навантаження та системи автоматичного регулювання рівня в їх взаємодії за збуренням зі сторони регулюючого клапану турбіни в складі енергоблоку. Розроблені й протестовані функціональні моделі систем автоматичного регулювання барабанового котла можуть бути використані як в навчальному процесі, так і під час проєктування та експлуатації для налагодження систем автоматичного регулювання котла.

Унікальність барабанового котла як технологічного об'єкта управління (наявність системи автоматичного регулювання рівня з триімпульсним регулятором для парирування ефекту «набрякання рівня») робить моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла актуальною задачею.

Ефективність функціонального моделювання технологічних об'єктів управління функціональними блок-схемами дозволяє рекомендувати такі функціональні моделі як для імітаційного моделювання систем автоматичного регулювання безпосередньо в програмованих логічних контролерах, так і для імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів (кібер-фізичних систем) програмним комплексом «система комп'ютерної математики (моделювання технологічних об'єктів управління) – симулятор програмованого логічного контролера (реалізація контролерної функціональності автоматизованих систем управління) – промислова система людино-машинного інтерфейсу (реалізація супервізорної функціональності автоматизованих систем управління)».

Ключові слова: *функціональне моделювання, математичне моделювання, система комп'ютерної математики, Matlab Simulink, технологічний об'єкт управління, теплова електростанція, енергоблок, барабановий котел, автоматизований технологічний комплекс, система автоматичного регулювання, САР теплового навантаження, САР рівня, набрякання рівня.*

Постановка проблеми. Функціональне моделювання динамічної системи – моделювання статичних і динамічних функцій системи. Функціональне моделювання системи автоматичного регулювання (далі – САР) – моделювання статичних і динамічних функцій САР функціональними блок-схемами в середовищі комп'ютерної математики (далі – СКМ). Найчастіше використовується пакет Simulink СКМ Matlab, в якому блок-схеми розроблюються потужною та ефективною графічною мовою CFC (Continuous Functional Chart – неперервна функціональна діаграма).

Автоматизований технологічний комплекс (далі – АТК) – це технологічний об'єкт управління (далі – ТОУ), оснащений автоматизованою системою управління технологічними процесами (далі – АСУТП). ТОУ є сукупністю окремих об'єктів управління (далі – ОУ) – каналів передачі дії «регулюючий орган – регульований режимний параметр». АТК є сукупністю САР. Кожна САР – це ОУ, який оснащений автоматичною системою регулювання (далі – АСР). АСР у лінійній САР переважно реалізуються ПІД-регуляторами (практично завжди ПІ-регуляторами, тому що

Д-частина тільки «підкреслює» стохастичні перешкоди й не покращує якість регулювання).

Функціональне моделювання АТК – функціональне моделювання всіх САР, які входять до складу АТК, в їх взаємодії за типовими збуреннями: збуреннями зі сторони регулюючого органу; збуреннями за навантаженням; збуреннями зміною завдань (уставок) регульованих режимних параметрів САР.

Функціональне моделювання АТК – перший крок до імітаційного моделювання динамічних систем із використанням промислового програмного забезпечення [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моделі САР в АТК повинні бути виключно лінійними, що забезпечує реалізацію принципу суперпозиції, який гарантує відтворення результатів моделювання як за самого моделювання, так і в промислових умовах функціонування (тобто незалежності реакції замкненої САР на збурення від амплітуди збурення). Використання нелінійних елементів категорично забороняється. Вимушені виключення: моделювання нелінійності регулюючого органу (якщо використаний регулюючий орган нелінійний) із метою визначення лінійної ділянки витратної характеристики регулюючого органу; реалізація релейного двопозиційного регулювання (яке вводить САР в режим автоколивань, які є сталим режимом роботи нелінійної САР). Головна відмінність функціонального моделювання АТК від функціонального моделювання автономних САР – саме моделювання динамічної взаємодії всіх САР у складі АТК за типовими збуреннями (які самі також моделюються). У моделі АТК моделюються типові збурення та досліджується функціонування комплексу САР у складі АТК у взаємодії їх реакцій на змодельовані збурення.

Постановка завдання. Модель АТК барабанового котла розроблюється:

1) з навчальною метою для використання в лабораторних роботах з автоматизації;

2) з метою використання під час проєктування та експлуатації для налагодження САР котла. Енергетичний барабановий котел – типовий об'єкт промислової автоматизації (в енергетиці).

Водночас потужний паровий барабановий котел має специфічний унікальний ефект «набрякання рівня», необхідність урахування якого приводить до використання унікальної одноконтурної САР рівня з триімпульсним регулятором. Саме вказане поєднання типовості й унікальності барабанового котла як ТОУ робить моделювання АТК енергетичного барабанового котла актуальною (цікавою та корисною) задачею як для начального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК у процесі проєктування та експлуатації.

САР барабанового котла – невід'ємна САР у складі АСУТП енергоблоків теплових електростанцій. Модель АТК барабанового котла проєктується в середовищі Matlab Simulink. ОУ являє собою чотири аперіодичні ланки першого порядку, з'єднані послідовно. Під час моделювання слід передбачити контроль основних параметрів барабанового котла, найвагомішим з яких є рівень у барабані. У моделі АТК можна виділити дві основні САР:

1) каскадна САР теплового навантаження котла;

2) одноконтурна САР рівня в барабані котла з триімпульсним регулятором.

На рис. 1 наведена структурна схема системи автоматичного управління (далі – САУ) енергоблоком.

САУ енергоблоком містить САР електричної потужності електрогенератору, САР теплового навантаження котла й САР живлення водою котла. Усі САР є САР матеріального балансу.

САР електричної потужності електрогенератора – САР матеріального балансу виробленої енергоблоком і потрібної користувачам електроенергії. САР теплового навантаження – САР матеріального балансу підведеного до топки котла й потрібного тепла (підведеної та потрібної витрати палива) для випаровування води в барабані котла. САР живлення водою котла – САР матеріального балансу підведеної до барабану котла і виробленої пари для подавання в паровий колектор турбіни.

Абревіатури рис. 1: ТА – турбоагрегат; РК – регулюючі клапани турбіни; ВТ – відбір тиску; ММ – манометр; ДМ – дифманометр; ДФ – діафрагма; РО – регулюючий орган; ВТМ – трифазний ватметр; КНД – конденсатор турбіни; ЕГ – електрогенератор; ВЦО – відцентровий вимірювач частоти обертів вала турбіни; РТБ – регулятор частоти обертів вала турбіни (поставляється комплектно з ВЦО як обладнання ТА); ПВРУ – перемикач вибору режиму роботи котла; РБР – регулятор базового режиму роботи котла (стабілізація витрати перегрітої пари); РТ – регулятор тиску пари; РП – регулятор витрати палива; РЧС – регулятор частоти системний ($f^* = 50$ Гц); ГДЦ – головний диспетчерський центр енергосистеми; РПБ – регулятор електричної потужності енергоблоку; КБ – командний блок для формування заданих потужностей.

Примітка. САУ енергоблоку містить також САР економічності згоряння палива. САР підтримує співвідношення паливо / повітря на рівні, що

забезпечує повне згоряння палива в топці котла й виділення в топці всього тепла відповідно до теплотворної здатності палива. У статті ця САР не розглядається.

Усі САР використовують режимний параметр як індикатор матеріального балансу. САР електричної потужності енергоблоку є каскадною САР частоти змінного струму в енергосистемі (індикатор балансу / небалансу – частота струму). САР теплового навантаження є каскадною САР тиску в паровому колекторі (індикатор балансу / небалансу – тиск в паровому колекторі). САР живлення котла водою є триімпульсною САР рівня в барабані котла (індикатор балансу / небалансу – рівень води в барабані котла).

Частота змінного струму 50 Гц в енергосистемі є сталою, якщо енергосистема виробляє стільки струму, тобто потужності (за заданої ерс 220 / 380 В), скільки потрібно користувачам. Під час, наприклад, підключення додаткових користувачів, тобто за збільшення навантаження енергосистеми струм в енергосистемі збільшується, але не достатньо, тобто його не вистачає всім користувачам; напруга ж зменшується. Водночас указане збільшення струму відповідно до закону електромагнітної індукції призводить до падіння частоти обертання ротору електрогенератора, тобто до падіння частоти струму в енергосистемі. Ротор турбіни, з'єднаний із ротором електрогенератора, також обертається повільніше. У результаті відцентровий регулятор РТБ частоти обертів вала турбіни привідкриває клапан РК паропроводу на турбіну, тим самим збільшуючи витрату пари на турбіну, і ротор турбіни й електрогенератора обертається швидше, відновлюючи частоту струму в енергосистемі. РТБ є П-регулятором, тому завжди є статична похибка стабілізації частоти обертів. Задана частота обертів коригується каскадною САР частоти змінного струму (РЧС у ГДЦ і станційний РПБ). У результаті енергосистема виробляє більше струму й саме стільки, скільки потрібно всім споживачам. Перемикач ПВРУ слугує для вибору регулюючого (основний) і базового (резервний) режимів роботи котла.

Таким чином, турбіна споживає більше пари. Відповідно, в котел треба подати більше води (відновити матеріальний баланс), а для того, щоб більша кількість води випарувалась, у топку потрібно подати більше палива.

У разі збільшення витрати пари на турбіну в барабані зменшується рівень води (порушений матеріальний баланс). САР рівня збільшує подавання живильної води в барабан, відновлюючи матеріальний баланс.

У разі збільшення витрати пари на турбіну в паропроводі зменшується тиск (порушений матеріальний баланс). Каскадна САР тиску збільшує витрату палива в топці котла (САР співвідношення паливо / повітря пропорційно збільшить витрату повітря в топці), відповідно, в топці виділиться більше тепла для нагрівання більшої кількості води, поданої САР рівня, і більшого пароутворення. З більшої кількості води внаслідок більшої кількості підведеного тепла виробляється більше пари. Матеріальний баланс вода – тепло – пара відновлюється, відповідно, тиск пари в паропроводі стабілізується на заданому значенні.

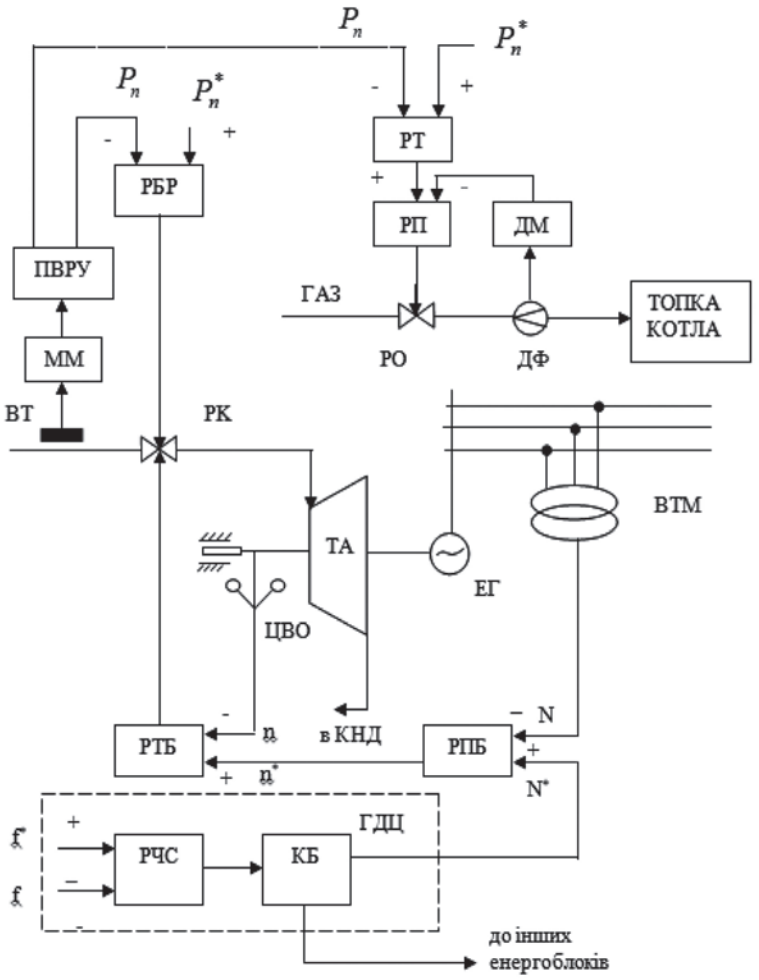

Рис. 1. Схема структурна САУ енергоблоком

Аналогічно працює САУ енергоблоком при відключенні користувачів, тобто при зменшенні навантаження енергосистеми.

На рис. 2 наведена схема структурна триімпульсної САР рівня в барабані парового котла.

Абревіатури рис. 2: Н*, Н – заданий рівень (уставка рівня) і поточний рівень; РРВ – регулятор рівня; ВР – відбір рівня; РМ – рівнемір; ДФ – діафрагма; ДМ – дифманометр; Джв – витрата живильної води; Дпп – витрата перегрітої пари; РО – регулюючий орган.

Рівень пароводяної суміші в барабані вимірюється рівнеміром. Через те, що пароводяна суміш уже є неньютоновою рідиною (змінює об'єм від тиску), відбувається так зване «набрякання рівня»: за зменшення тиску в барабані пароводяна суміш збільшується в об'ємі, що витратомір сприймає як збільшення рівня, хоча насправді рівень води зменшується (зменшення тиску в барабані означає, що на турбіну витрачається більше пари, тобто більше води випаровується, відповідно, води в барабані менше та її рівень падає). У разі збільшення тиску в барабані відбувається протилежне хибне спрацювання – рівнемір дає зменшення рівня, хоча насправді рівень води збільшується.

Хибне протилежне спрацювання рівнеміра перетворює зворотний зв'язок за рівнем у САР рівня з від'ємного на додатній, у результаті чого перехідний процес розходиться та відбувається аварія – упуск рівня (барабан без води) або переживлення рівня (мікрокраплі води попадають на лопатки турбіни, руйнуючи їх). Для запобігання цьому катастрофічному явищу на регулятор рівня РРВ подаються два додаткові імпульси (перший імпульс – поточний рівень; уставка імпульсом не вважається): виміряні витрата живильної води в барабан (котел) і витрата пари з котла (на турбіну), причому з протилежними знаками. У результаті додатний імпульс витрати пари в перший момент забезпечує спрацювання РРВ у правильному напрямі, а далі (коли РРВ змінює витрату води в правильному напрямі) врівноважується від'ємним імпульсом витрати живильної води (спочатку завжди Дпп > Джв або Дпп < Джв, а потім завжди Джв = Дпп).

Наприкінці перехідного процесу завжди відбувається нульова статична похибка, тому що із часом завжди Джв = Дпп, у результаті в кінці перехідного процесу – Н = Н*.

Виклад основного матеріалу дослідження. На рис. 3 наведена модель АТК барабанового котла (параметри приближені до реальних), верхня САР – каскадна САР теплового навантаження котла, нижня САР – одноконтурна САР рівня в барабані котла.

На рис. 4 наведена модель каскадної САР теплового навантаження котла. Для каскадної САР випереджаючий та інерційний об'єкти змодельовані послідовним з'єднанням двох аперіодичних ланок

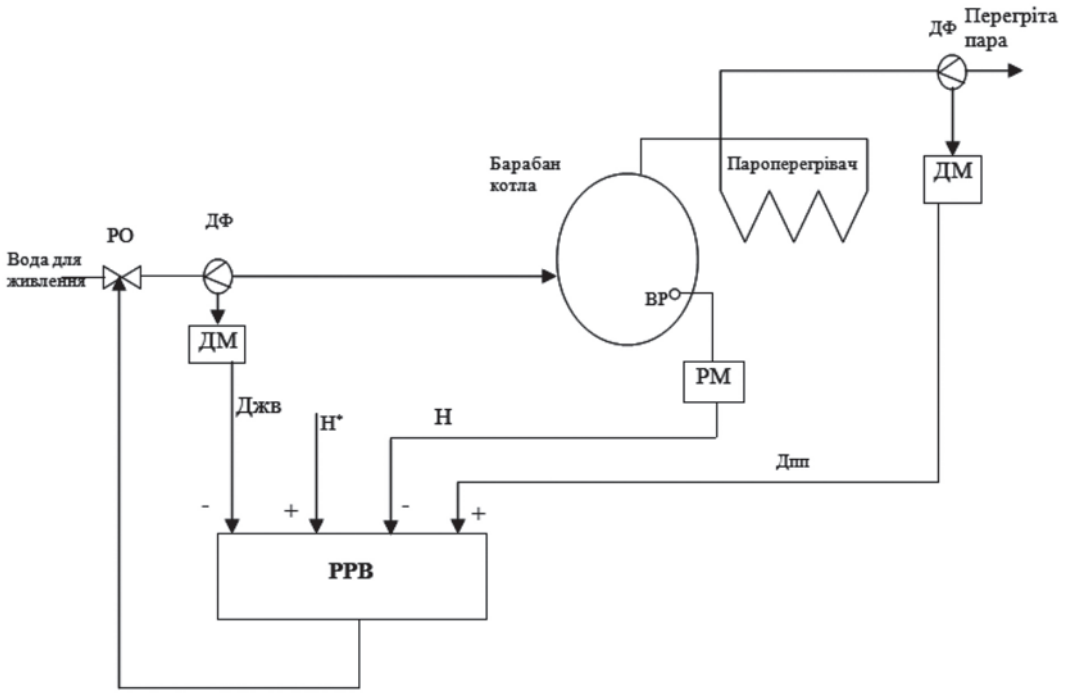

Рис. 2. Схема структурна триімпульсної САР рівня в барабані парового котла

кожний. Основне збурення – збурення за навантаженням – збурення зміною витрати пари на турбіну (переміщення регулюючого клапану турбіни).

На рис. 5 наведена модель одноконтурної САР рівня в барабані котла. Одноконтурна САР рівня в барабані є найважливішою САР в моделі АТК барабанового котла. Основне збурення – збурення за навантаженням – збурення зміною витрати пари на турбіну.

Відхилення рівня за допустимі межі призводить до аварійних режимів роботи котла: за занадто низького рівня порушується режим циркуляції води у випарній системі й можливий перепал деяких підйомних труб, а за «переживлення» котлів (надмірного підвищення рівня) можливий закид води в пароперегрівач, що може вивести його з ладу . Тому до точності підтримки рівня висуваються жорсткі вимоги.

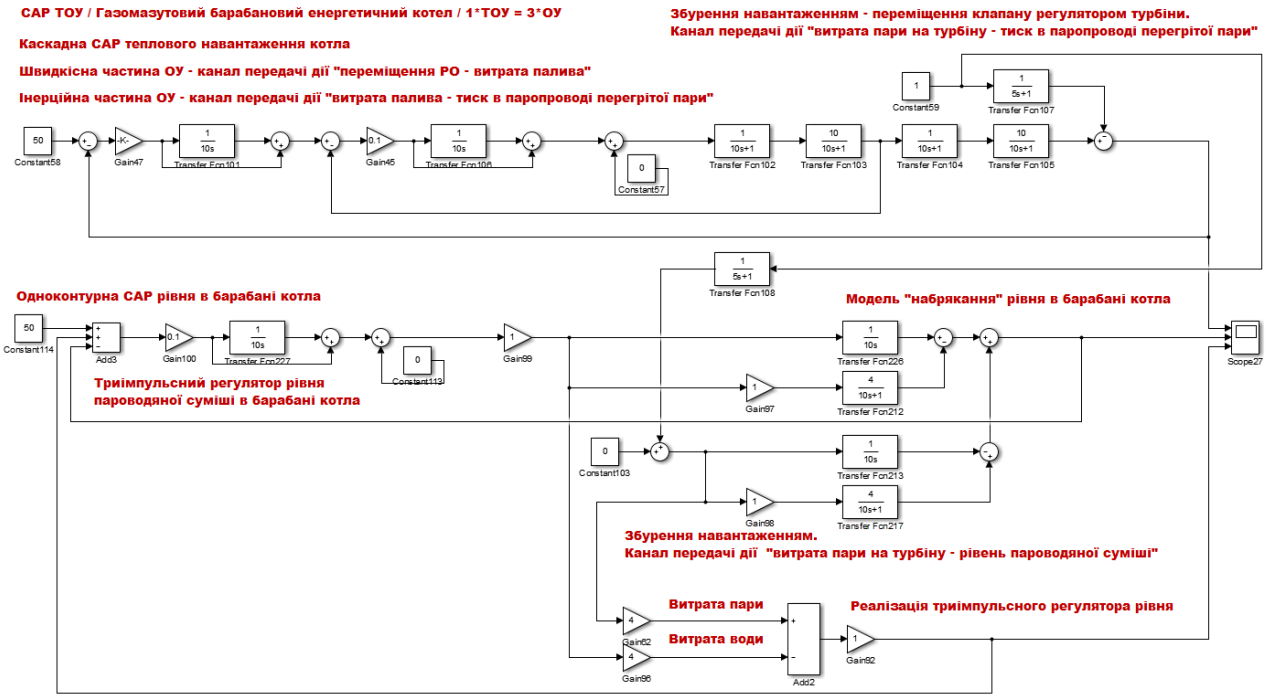

Рис. 3. Модель АТК барабанового котла в Matlab Simulink

Рис. 4. Модель каскадної САР теплового навантаження барабанового котла в Matlab Simulink

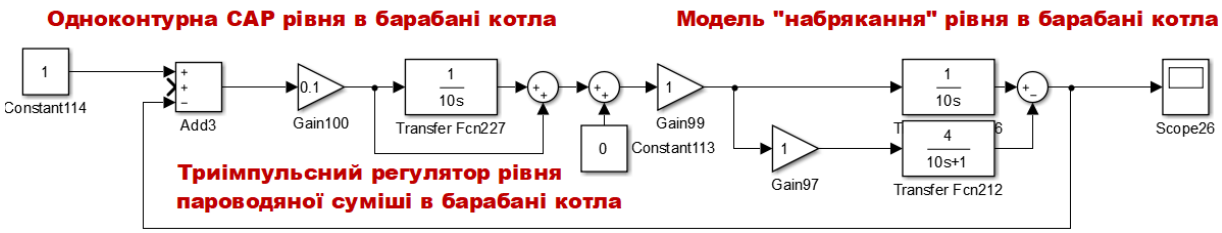

Рис. 5. Модель САР рівня в барабані котла в Matlab Simulink

На рис. 6 наведена перехідна характеристика моделі ОУ теплового навантаження за одиничним ступеневим збуренням завданням.

На рис. 7 наведено перехідну характеристику моделі каскадної САР теплового навантаження.

У барабані котла над «дзеркалом випаровування» знаходиться пароводяна суміш. Кількість бульбашок пари залежить від тиску в барабані котла (і розподілу його у випарній системі). У разі збільшення витрати пари тиск у випарній системі зменшується, вода стає перегрітою щодо нового тиску, надлишок теплоти витрачається на її випаровування, що приводить до появи додаткових бульбашок пари під «дзеркалом випаровування». Обсяг бульбашок збільшується, що призводить до підвищення видимого рівня води в барабані (явище «набрякання»). У разі зменшення витрати пари це проявляється у зворотну сторону

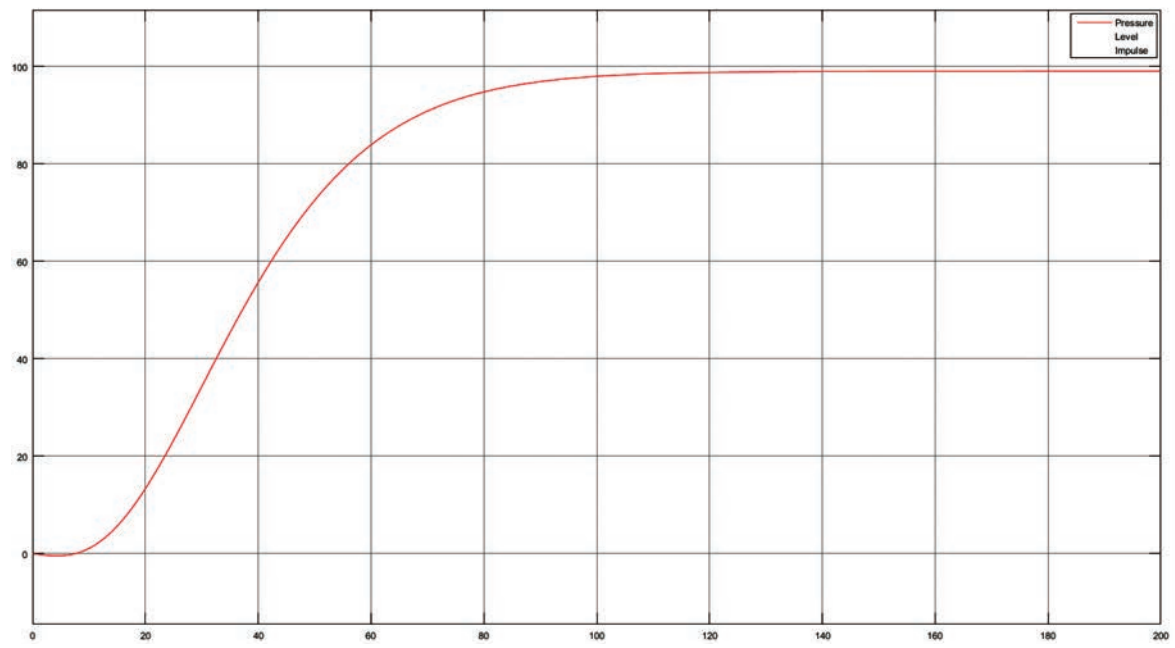

Рис. 6. Перехідна характеристика моделі ОУ теплового навантаження

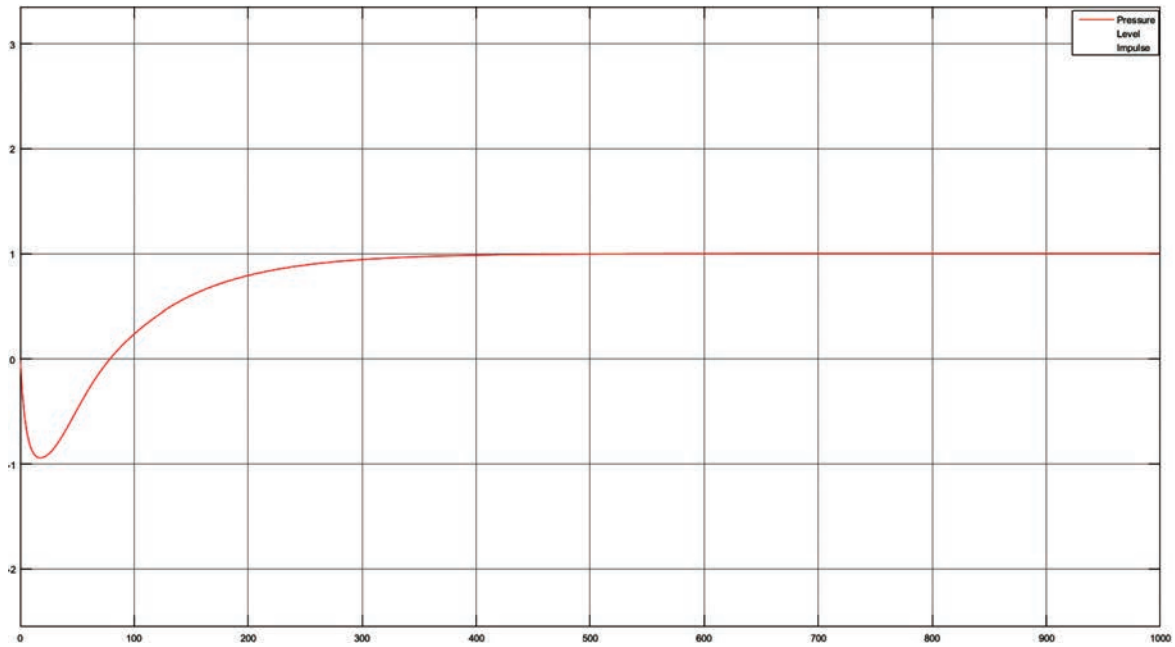

Рис. 7. Перехідна характеристика моделі каскадної САР теплового навантаження

(зменшення рівня). Модель набрякання рівня в барабані наведена на рис. 8. Набрякання рівня змодельовано зустрічним включенням аперіодичної ланки першого порядку й інтегруючої ланки (а не послідовним включенням ланки транспортного запізнення та інтегруючої ланки).

Через явище набрякання одноімпульсний (імпульс за виміряним значенням рівня) регулятор не може стабілізувати рівень води в барабані, і перехідний процес розходиться. Перехідна характеристика наведена на рис. 9.

Для запобігання розходження процесу до регулятора додають ще два імпульси, і система стає

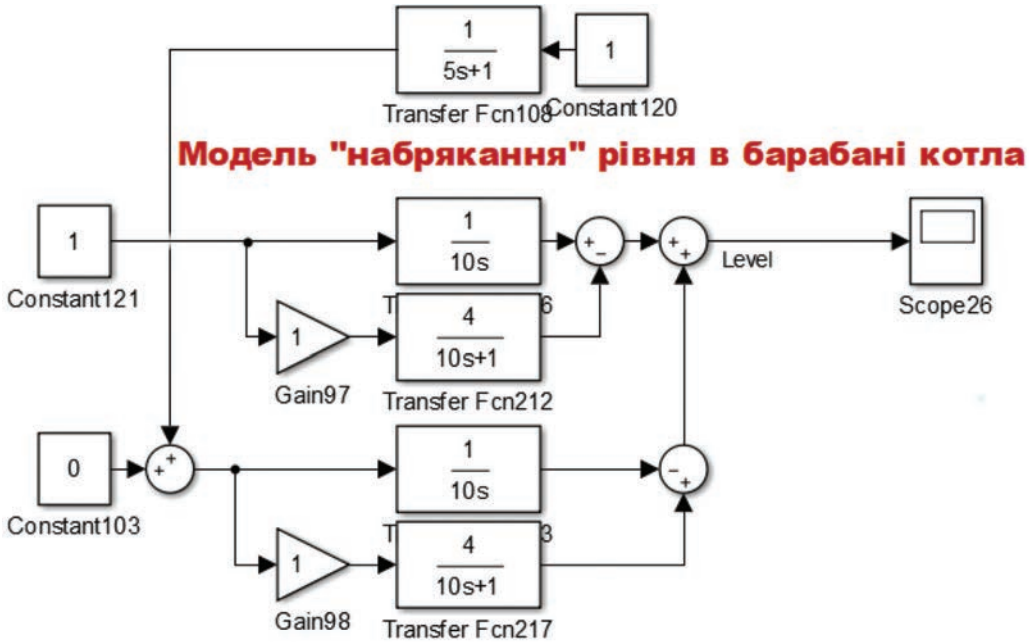

Рис. 8. Модель набрякання рівня в Matlab Simulink

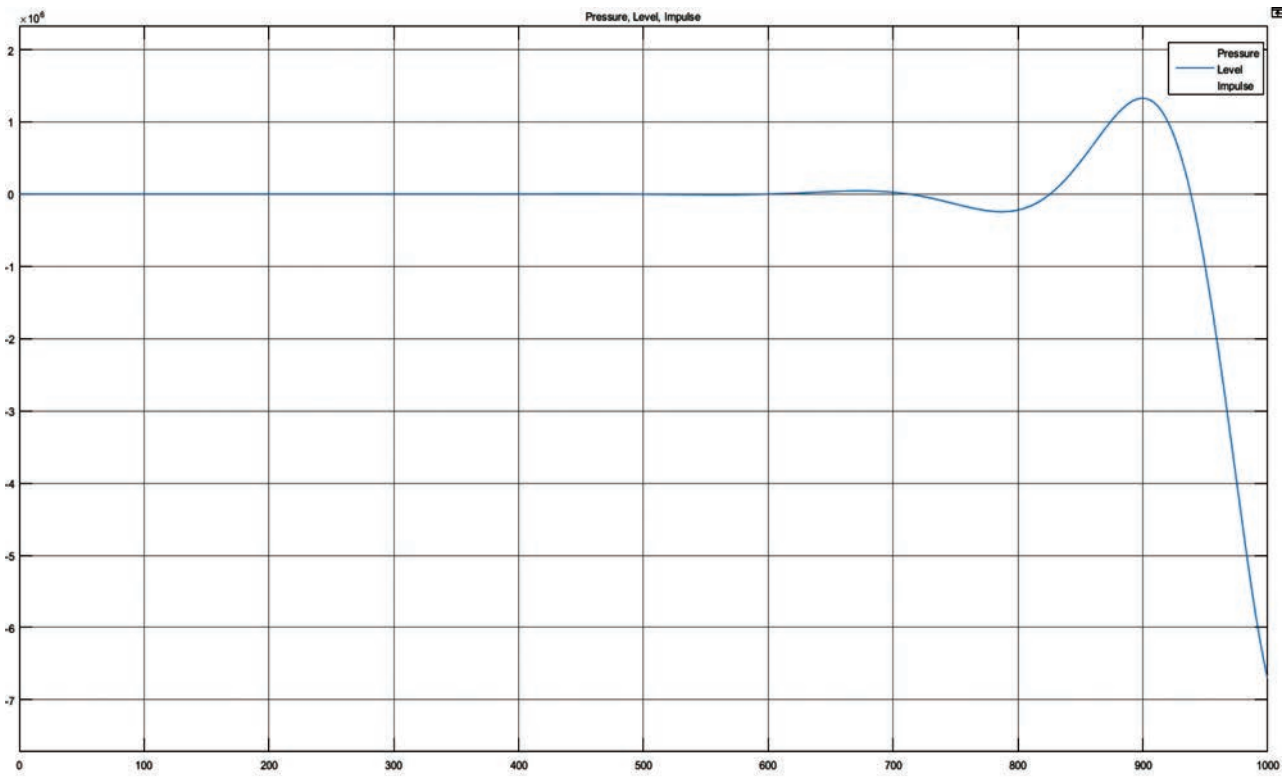

Рис. 9. Графік перехідного процесу одноконтурної САР рівня в барабані котла в Matlab Simulink

триімпульсною. Триімпульсна САР рівня в барабані котла: регулятор отримує імпульс із витрати пари від котла за рівнем води в барабані й за надходженням води в котел, після чого виробляється регулюючий вплив, який надходить на регулюючий орган на живильній воді до котла.

На регулятор подаються вимірювальні сигнали за рівнем у барабані котла, витратою живильної води на котел і витратою пари від котла. Сигнали за витратою живильної води й витратою пари повинні компенсувати один одного, тому включені з різними знаками. У разі збільшення витрати пари регулятор виробляє сигнал на збільшення витрати живильної води й навпаки. Сигнал за рівнем у барабані котла коригуючий. Він повинен компенсувати різницю між витратою пари й живильної води.

Реалізацію триімпульсного регулятора наведено на рис. 10. Перехідний процес регулювання рівня в барабані з триімпульсним регулятором наведений на рис. 11.

Висновки.

1. Функціональне моделювання АТК дозволяє сформувати динамічну взаємодію всіх САР у складі АТК за типовими збуреннями (які самі також моделюються). У моделі АТК моделюються типові збурення та досліджується функціонування комплексу САР у складі АТК у взаємодії їх реакцій на змодельовані збурення. Саме можливість такого моделювання взаємодії комплексу САР у складі АТК є перевагою над функціональним моделюванням автономних САР.

2. Ефективним інструментарієм функціонального моделювання АТК є CFC-діаграма (функціональні блок-схеми) у пакеті графічного моделювання Simulink у СКМ Matlab.

3. Функціональна модель АТК барабанового котла в СКМ Matlab Simulink рекомендується для використання як із навчальною метою в лабораторних роботах з автоматизації, так і на стадіях проєктування та експлуатації для налагодження САР котла. Змодельовані найважливіші

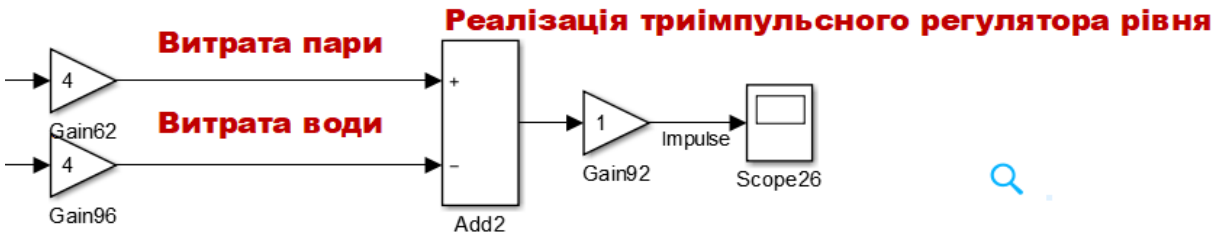

Рис. 10. Реалізація триімпульсного регулятору в Matlab Simulink

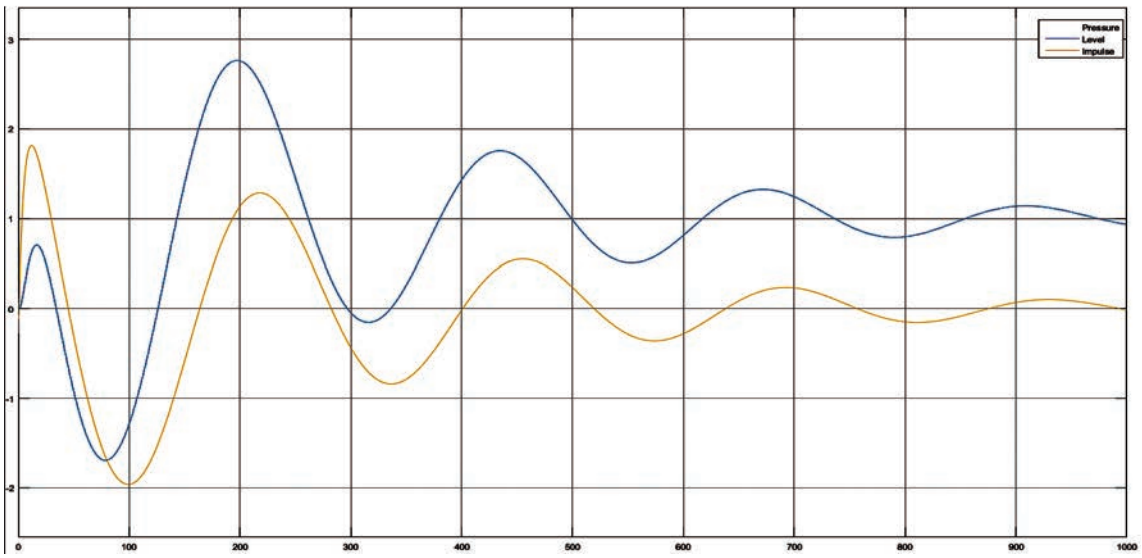

Рис. 11. Перехідний процес рівня в барабані з триімпульсним регулятором

САР – каскадна САР теплового навантаження котла й одноконтурна САР рівня в барабані котла, які є невід'ємними частинами САУ енергоблоком.

4. Енергетичний барабановий котел, з одного боку, є типовим об'єктом промислової автоматизації (в енергетиці), з іншого боку, барабановий котел має специфічний унікальний ефект «набрякання рівня», необхідність урахування якого призводить до використання унікальної одноконтурної САР рівня з триімпульсним регулятором. Саме вказане поєднання типовості й унікальності барабанового котла як ТОУ робить моделювання АТК енергетичного барабанового котла актуальною (цікавою та корисною) задачею як для навчального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК у процесі проєктування та експлуатації.

5. Ефективність функціонального моделювання ТОУ CFC-діаграмами дозволяє рекомендувати такі функціональні моделі ТОУ як для імітаційного моделювання САР безпосередньо в програмованих логічних контролерах (ПЛК) мовою FBD/CFC, так і для імітаційного моделювання АТК програмним комплексом «СКМ Matlab Simulink (моделювання ТОУ) – софтПЛК (реалізація контролерної функціональності, наприклад, у CoDeSys) – промислова SCADA-система (реалізація супервізорної функціональності, наприклад, в Indusoft WebStudio)» [2].

Список літератури:

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
2. Рыбалев А.Н. Имитационное моделирование АСУТП. Благовещенск : Амурский гос. ун-т, 2019. 408 с.

Batiuk S.G., Lobzov N.S. FUNCTIONAL MODELING OF AUTOMATED TECHNOLOGICAL COMPLEX OF HEAT POWER DRUM BOILER

Functional modeling of control system – modeling of static and dynamic functions of control system by functional block diagrams in the Matlab computer mathematics system (Simulink package). Functional models of the automated technological complex of the heat power drum boiler are developed and tested. The automatic control system of heat load of the drum boiler is modeled. The automatic control system of the level in the drum of the boiler is modeled taking into account the effect of "swelling of the level". The complex work of automatic heat load control system and automatic level control system in their interaction on the disturbance from the control valve of the turbine as a part of the power unit is modeled. Developed and tested functional models of automatic control systems of drum boiler can be used both in the educational process and during design end exploitation for the adjustment of automatic control systems of the boiler.

The uniqueness of the drum boiler as a technological control object (the presence of an automatic level control system with a three-pulse regulator to counteract the effect of "swelling of the level") makes the modeling of the automated technological complex of the energy drum boiler an urgent task.

The efficiency of functional modeling of technological control objects by functional block diagrams allows to recommend such functional models both for imitation modeling of automatic control systems directly in programmable logic controllers and for imitation modeling of automated technological complexes (cyber-physical systems) by software package "computer mathematics system (modeling of technological control objects) – simulator of programmable logic controller (implementation of controller functionality of automated control systems) – industrial system of human-machine interface (implementation of supervisory functionality of automated control systems)".

Key words: *functional modeling, mathematical modeling, computer mathematics system, Matlab Simulink, technological control object, heat power station, heat power unit, drum boiler, automated technological complex, automatic control system, automatic heat load control system, automatic level control system, swelling of the level.*