

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»

СТРУКТУРНЕ (ІМІТАЦІЙНЕ) МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАРАБАННОГО КОТЛА

Структурне (імітаційне) моделювання автоматизованого технологічного комплексу – це моделювання взаємодії контрольної і супервізорної функціональності автоматизованої системи управління технологічними процесами і програмно змодельованого (зімітованого) технологічного об'єкту управління. Розроблено і тестовано структурну (імітаційну) модель автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанного котла. Контрольна функціональність автоматизованої системи управління здійснюється (моделюється) софтверним програмованим логічним контролером CoDeSys. Супервізорна функціональність автоматизованої системи управління здійснюється системою людинно-машинного інтерфейсу WebStudio. Технологічний об'єкт управління моделюється функціональними блок-схемами у системі комп'ютерної математики Matlab (пакет Simulink). Імітовано комплексну роботу системи автоматичного регулювання навантаження і системи автоматичного регулювання рівня (з урахуванням ефекту «набрякання рівня») у їх взаємодії за збуренням зі сторони регулюючого клапану турбіни у складі енергоблоку. Розроблена і протестована структурна (імітаційна) модель автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанного котла може бути використана як у початковому процесі, так і під час проектування та експлуатації для налагодження систем автоматичного регулювання котла.

Імітаційне моделювання є ефективною операційною технологією, близькою за своєю ідеологією до цифрового твінгу динамічних систем. Розроблена імітаційна модель автоматизованого технологічного комплексу барабанного котла на програмно-технічній платформі «Simulink (модель технологічного об'єкту управління) – CoDeSys (модель контролерної функціональності автоматизованої системи управління) – WebStudio (модель супервізорної функціональності автоматизованої системи управління)» рекомендується для використання як із навчальною метою під час лабораторних робіт із автоматизації, так і на стадіях проектування та експлуатації для налагодження систем автоматичного регулювання барабанного котла.

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

Постановка проблеми. Структурне моделювання динамічної системи – це моделювання статичної і динамічної взаємодії структурно виокремлених компонентів системи. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – це технологічний об'єкт управління (ТОУ), оснащений автоматизованою системою управління технологічними процесами (АСУ ТП). Структурне моделювання автоматизованого технологічного комплексу (АТК) – це моделювання взаємодії програмно змодельованого технологічного об'єкту управління (ТОУ) і програмно-технічного комп-

лексу (ПТК) автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), якою оснащений ТОУ. Оскільки використовується не сам ТОУ і не його фізична модель, а саме програмна модель (імітація, симуляція) ТОУ, таке структурне моделювання називається імітаційним моделюванням (симуляцією) АТК, а структурна модель АТК – імітаційною моделлю АТК (обидві аббревіатури ІМ АТК у контексті) [1]. Контролерна функціональність АСУ/ПТК в ІМ АТК здійснюється софтверним програмованим логічним контролером (софтПЛК). Супервізорна функціональність

АСУ/ПТК в ІМ АТК здійснюється промисловою SCADA-системою. ТОУ в ІМ АТК моделюється функціональними блок-схемами у системі комп'ютерної математики (СКМ).

Задачами структурного моделювання АТК є такі: 1) тестування алгоритмів контролерної і супервізорної автоматизації у взаємодії із змодельованим ТОУ у СКМ; 2) тестування обміну даними між ПЛК і SCADA-системою у реальних умовах; 3) модифікація алгоритмів контролерної і супервізорної автоматизації для тиражування АСУ ТП на новому одноступінному ТОУ.

Аналіз проблеми. ІМ АТК є різновидом сучасного цифрового твінінгу і цифрових двійників. Отже, програмно-технічна платформа сучасної ІМ АТК така [2]: контролерна функціональність АСУ/ПТК в ІМ АТК здійснюється (моделюється) софтПЛК CoDeSys, супервізорна функціональність АСУ/ПТК – SCADA-системою (використовується система людинно-машинного інтерфейсу Indusoft WebStudio). ТОУ моделюється функціональними блок-схемами у системі комп'ютерної математики Matlab (пакет Simulink). Функціональні блок-схеми працюють за графічною мовою CFC (Continuous Functional Chart – неперервна функціональна діаграма), тобто функціональна блок-схема є CFC-діаграмою.

Постановка завдання. ІМ АТК енергетичного барабанного котла розроблюється: 1) із навчальною метою для використання у лабораторних роботах із автоматизації; 2) із метою використання під час проектування та експлуатації для налагодження

САР котла; 3) із метою використання під час проектування та експлуатації для налагодження взаємодії ПЛК і SCADA-системи. Енергетичний барабанний котел – типовий об'єкт промислової автоматизації (в енергетиці), що робить ІМ АТК енергетичного барабанного котла актуальним (цікавим і корисним) завданням як для навчального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК під час проектування та експлуатації.

Система автоматичного регулювання (САР) барабанного котла є невід'ємною САР у складі АСУ ТП енергоблоків теплових електростанцій, в якій можна виділити дві такі основні САР: 1) каскадна САР теплового навантаження котла; 2) одноконтурна САР рівня в барабані котла з триімпульсним регулятором.

Ключовою технічною задачею ІМ АТК є здійснення обміну даними між софтПЛК CoDeSys і функціональною моделлю АТК барабанного котла у СКМ Matlab Simulink. Обмін даними здійснюється за OPC-протоколом шиною Ethernet. Модель ТОУ у СКМ Matlab Simulink є OPC-клієнтом. СофтПЛК CoDeSys є OPC-сервером. Розроблені вікна WebStudio мають втілити типову HMI-Standard і MES-Lite функціональність сучасних SCADA-систем із урахуванням вимог до навчання студентів і використання у лабораторних роботах.

Результати моделювання. На рис. 1 наведена модель ТОУ барабанного котла; верхній контур – це контур регулювання (САР) теплового навантаження котла, а нижній – контур регулювання (САР) рівня в барабані.

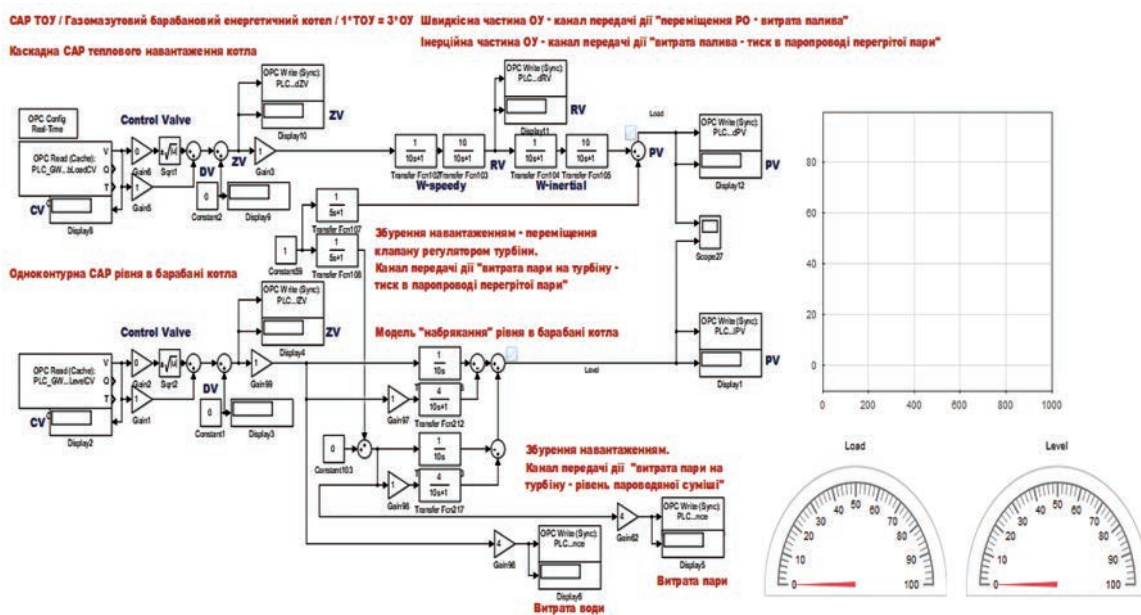


Рис. 1. Модель ТОУ барабанного котла у MatLabSimulink

ТОУ містить чотири взаємопов'язані об'єкти управління (ОУ): 1) канал передачі дії «переміщення РО на витраті палива – тиск у паропроводі на турбіну» (виділені відповідно швидкісний та інерційний ОУ: канал передачі дії «переміщення РО на витраті палива – витрата палива» і канал передачі дії «витрата палива – тиск пари»); 2) канал передачі дії «витрата пари на турбіну – тиск пари у трубопроводі турбіни»; 3) канал передачі дії «витрата пари на турбіну – рівень пароводяної суміші у барабані котла»; 4) канал передачі дії «витрата живильної води – рівень пароводяної суміші у барабані котла». Параметри ОУ вибрані зручними для моделювання, але співвідношення між часовими параметрами різних ОУ відповідає дійсному. Ефект набрякання рівня пароводяної суміші змодельований зустрічним паралельним включенням інтегруючої ланки і аперіодичної ланки першого порядку. Основним збуренням є збурення переміщенням регулюючого клапану (РК) турбіни регулятором кількості обертів турбіни: канал передачі дії «переміщення РК турбіни – витрата пари на турбіну». Змодельована взаємодія всіх указаних ОУ (каналів передачі дії) в ТОУ енергетичного барабанного котла.

Блок OPC Config використовується для конфігурації підключення до OPC серверу. За допомогою блоків OPC Read із серверу зчитуються результати, які передає контролер із регуляторів. Блоки OPC Write дозволяють передати значення контрольованих параметрів назад до контролера та у HMI-SCADA систему WebStudio, в якій реалізована супервізорна функціональність для відображення поточних значень параметрів САР теплового навантаження барабанного котла і САР

рівня у барабані котла. Для наочності в усіх важливих місцях були розташовані блоки Display, які відображають значення параметрів у цих точках.

Контролерна функціональність автоматичної системи регулювання (АСР) здійснена у середовищі CodeSys у вигляді універсальної каскадної АСР, яка може перемикатись у режими одноконтурного або каскадного регулювання.

СFC-діаграма АСР теплового навантаження представлена на рис. 2. Корируючий регулятор PID_1 тиску пари у паропроводі змінює завдання стабілізуючому регулятору PID_2 витрати палива у топку котла. Фільтри низької частоти (аперіодичні ланки першого порядку) UDO_Std_1, 2, 3 призначені відповідно для первинної фільтрації сигналів виміряних параметрів на корируючий регулятор, стабілізуючий регулятор і у SCADA-систему. Інші функціональні блоки слугують для перемикавання САР теплового навантаження в режими одноконтурного або каскадного регулювання.

СFC-діаграма АСР рівня в барабані котла представлена на рис. 3. АСР працює в одноконтурному режимі – задіяний тільки основний (корируючий) регулятор PID_1 рівня. Фільтри низької частоти (аперіодичні ланки першого порядку) UDO_Std_1, 3 призначені відповідно для первинної фільтрації сигналів виміряних параметрів на основний (корируючий) регулятор і в SCADA-систему. На трьох блоках SUB здійснена триімпульсність регулятору рівня: на регулятор рівня подаються два додаткові імпульси (перший імпульс – поточний рівень; уставка імпульсом не вважається); виміряно витрату живильної води в барабан (котел) і витрату пари із котла (на турбіну), причому із протилежними знаками. Унаслідок цього

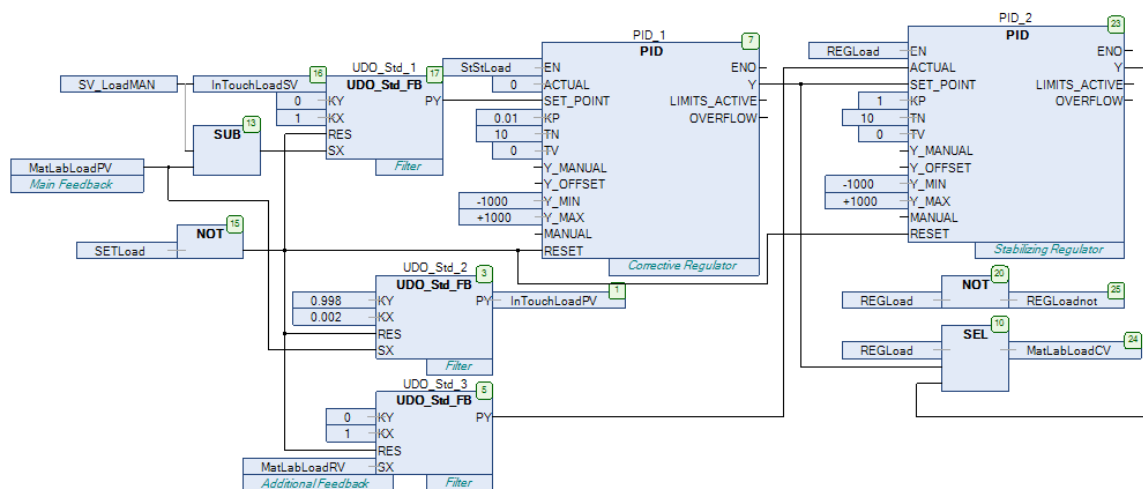


Рис. 2. Здійснення каскадної АСР для САР теплового навантаження барабанного котла у середовищі CodeSys

додатній імпульс витрати пари у перший момент забезпечує спрацювання регулятора рівня у правильному напрямку, а далі (коли регулятор рівня змінює витрату води вже у правильному напрямку) врівноважується від'ємним імпульсом витрати живильної води (спочатку завжди витрата пари є більшою за витрату живильної води, а потім ці витрати завжди однакові). Інші функціональні блоки слугують для перемикання САР теплового навантаження у режими одноконтурного або каскадного регулювання.

Користувач взаємодіє із програмно-технічним симулятором АСК за допомогою спеціальних вікон, розроблених у HMI/SCADA Indusoft WebStudio, кожне з яких має свою функціональність:

- «Menus» – стартове вікно, з якого можна виконати перехід на інші вікна після авторизації користувача;
- «Mimics» – мнемосхема барабанного котла;
- «Alarms» – алармування і логування історичних тривог;
- «Trends» – тренди технологічних параметрів для спостереження за процесом;
- «Models Heat Load» – мнемосхема моделі САР теплового навантаження барабанного котла;
- «Models Level» – мнемосхема моделі САР рівня в барабані котла;
- «Recipes» – формування і виконання рецептів;
- «Schedules» – розклад завантаження рецептів, створення історичних звітів;
- «Reports» – формування нових і редагування поточних звітів, здійснення історичних звітів.

Розроблені вікна дозволяють користувачу спостерігати за процесами, регулювати і контролювати роботу імітаційної моделі барабанного котла; слід-

кувати за поточними параметрами; переглядати всі зареєстровані системою тривоги та відображати тренди; створювати свої рецепти роботи системи і надалі використовувати їх для роботи системи; створювати, формувати та редагувати звіти.

Розроблена в імітаційній моделі АСК барабанного котла HMI-Standard і MES-Lite функціональність SCADA є типовою для сучасних АСУТП і демонструє всі можливості роботи оператора-технолога із сучасними ТОВ. Взаємодія оператора-технолога із вікнами відбувається за допомогою різноманітних елементів візуалізації.

Нижче наведена характеристика функціональності вікон SCADA WebStudio.

- «Menus» – стартове вікно-меню, яке дозволяє переходити на інші вікна. Для переходу до іншого вікна потрібно обрати бажане вікно і натиснути на нього. Вікно «Menus» завжди відкрите і не перекривається іншими вікнами, що дозволяє зручно перемикатися між ними.
- «Mimics» (рис. 4) – це вікно із спрощеною мнемосхемою газомазутового барабанного котла, в якому користувач може переглядати основні показання датчиків, а також побачити поточні положення регулюючих органів.
- «Alarms» (рис. 5) – це вікно для відображення аварій (алармів, тривог) поточних та історичних, наявних у системі, із журналом подій, у якому відображені події (дії оператора), що відбувалися під час роботи системи. На вікні розміщена група слайдерів, текстових полей, клавіш і віджетів для імітації алармів аналогових і дискретних сигналів (із метою перевірки роботоздатності послідовності «модель ТОВ в СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – SCADA WebStudio»).

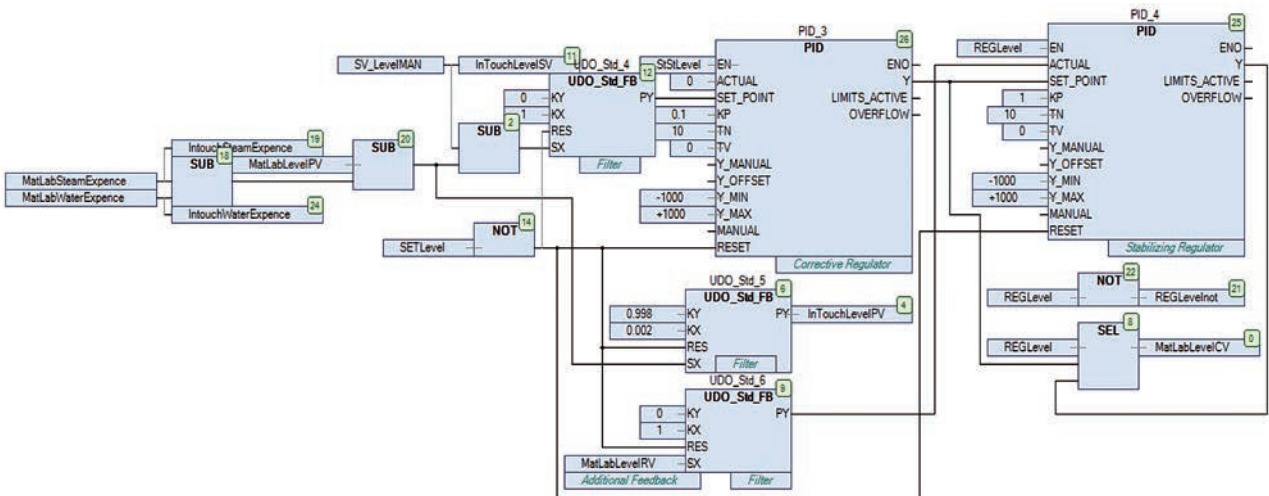


Рис. 3. Здійснення АСК для САР рівня у барабані котла у середовищі CodeSys

• «Trends» (рис. 6) – це вікно трендів реального часу та історичних, на якому користувач може переглянути зміну технологічних параметрів із часом. Функціональність тренду дозволяє досліджувати потрібний проміжок часу більш детально. На вікні розміщена група слайдерів, текстових полів, клавіш і віджетів для імітації зміни аналогових і дискретних сигналів (із метою перевірки працездатності послідовності «модель TOU у СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – SCADA WebStudio»).

• «Models Heat Load» (рис. 7) – це вікно, на якому відображена структурна схема моделі САР теплового навантаження барабанного котла. У вікні також відображається типова структурна схема каскадної САР. У цьому вікні користувач може задавати бажане значення (уставку) для регульованого параметру, змінювати тип АСР (одноконтурний чи каскадний режим САР), вмикати або вимикати регулятор і відслідкувати на тренді зміну технологічних параметрів у часі. Користувач перевіряє

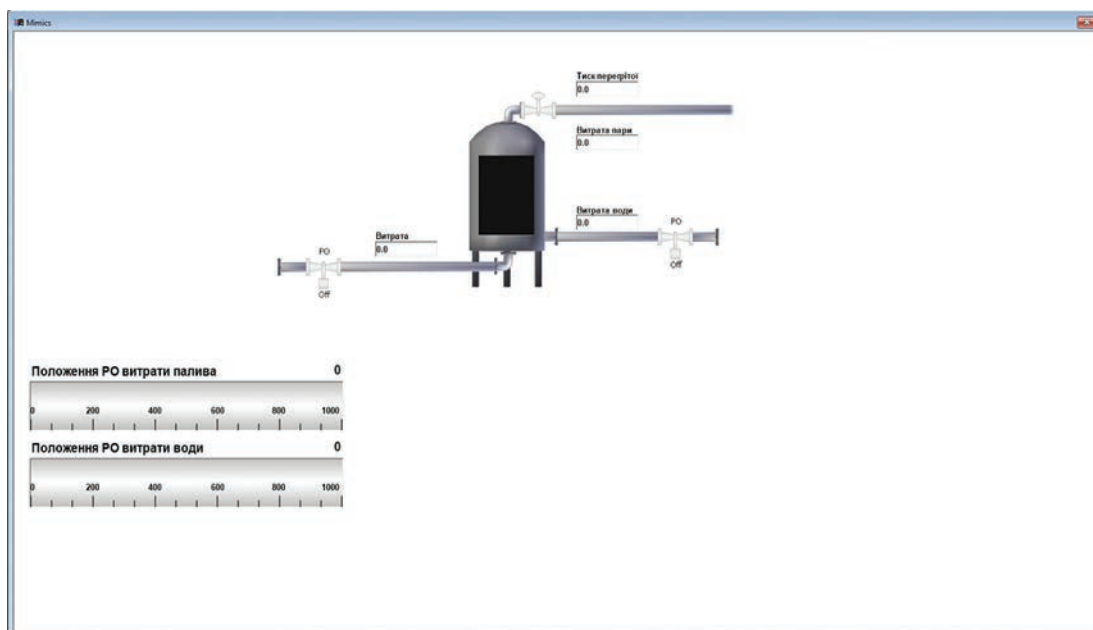


Рис. 4. Вікно Mimics

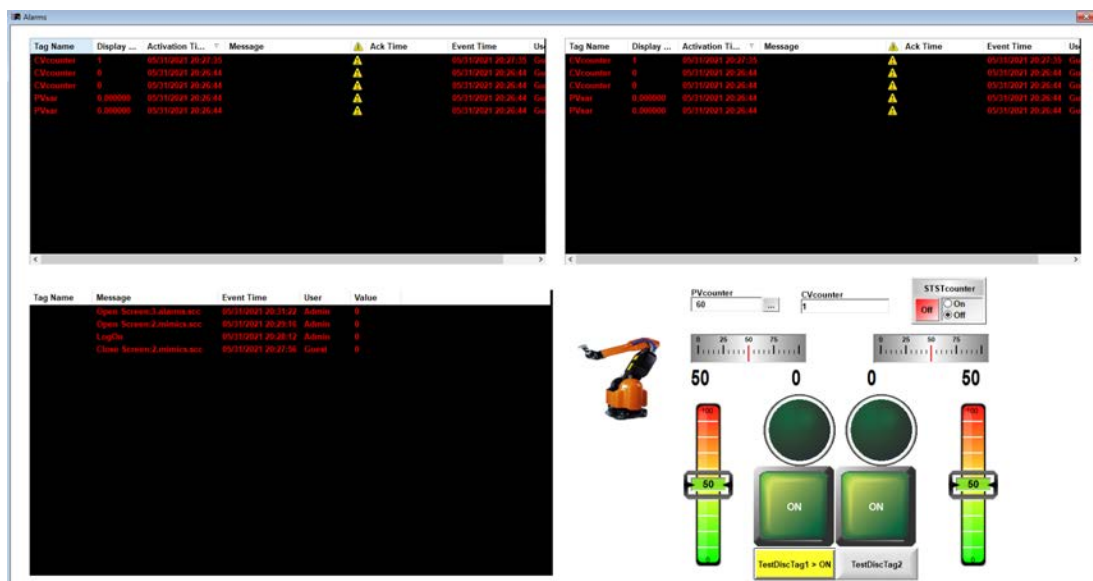


Рис. 5. Вікно «Alarms»

працездатність САР теплового навантаження барабанного котла.

- «Models Level» (рис. 8) – це вікно, на якому відображена структурна схема моделі САР-рівня у барабані котла. У вікні також відображається типова структурна схема одноконтурної САР. У цьому вікні користувач може задавати бажане

значення (уставку) для регульованого параметру, вмикати або вимикати регулятор та відслідкувати на тренді зміну технологічних параметрів у часі. Користувач перевіряє працездатність САР-рівня у барабані котла.

- «Recipes» (рис. 9) – це вікно для створення рецептів. Із позицій управління рецепт –

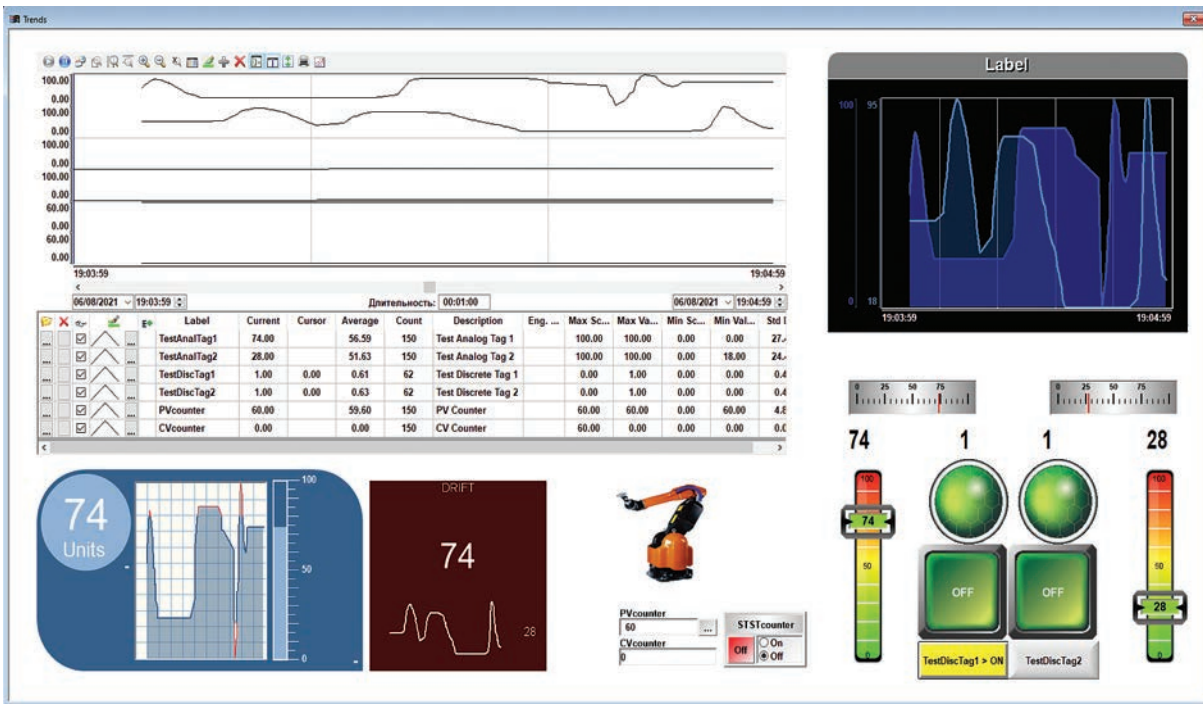


Рис. 6. Вікно «Trends»

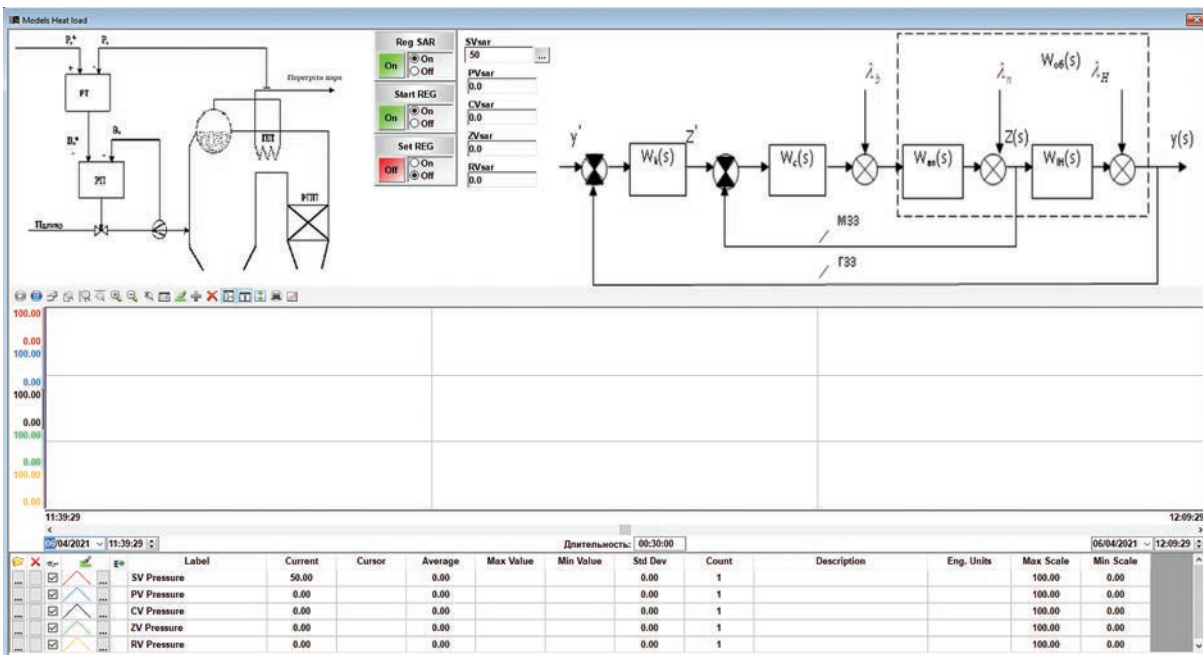


Рис. 7. Вікно «Models Heat Load»

це формула автоматичного управління ОУ, тобто комплекс уставок (заданих значень) режимних параметрів САР, на яких САР стабілізують режимні параметри. Із позицій SCADA рецепт – це зовнішній файл, в якому зберігається формула управління ОУ, тобто комплекс уставок (заданих значень) режимних параметрів САР. Користувач у вікні формує рецепт і виконує його. Формування рецепту – це введення уставок і запис їх у заданий текстовий файл. Виконання рецепту – це зчитування його файлу, парсинг файлу і запис уставок у внутрішні параметри SCADA-системи. Формування і виконання рецептів здійснюється скриптами SCADA-системи. Зконфігурований обмін даними SCADA-системи із софтПЛК забезпечує передачу у софтПЛК зчитаних SCADA-системою із файлів-рецептів уставок режимних параметрів САР.

• «Schedules» (рис. 10) – це вікно для втілення розкладів автоматичного завантаження рецептів і дописування поточних звітів. Розклад – це виконання заданої послідовності дій за календарним часом, періодично або за заданою подією. У вікні елементами управління ініціюються розклад завантаження рецепту із заданою періодичністю і розклад дописування поточного звіту із заданою періодичністю. Розклади здійснюються скриптами SCADA-системи. У вікні у текстові поля виведені значення трьох розрахованих найважливіших ключових показників ефективності (КПЕ; KPI – Key Performance Indicator): OEEsar (Overall Equipment Effectiveness – загальна ефективність обладнання); OTDsar (On Time Delivery – своєчасне постачання / виконання); RMYsar (Raw Material Yield – питома витрата матеріалу).

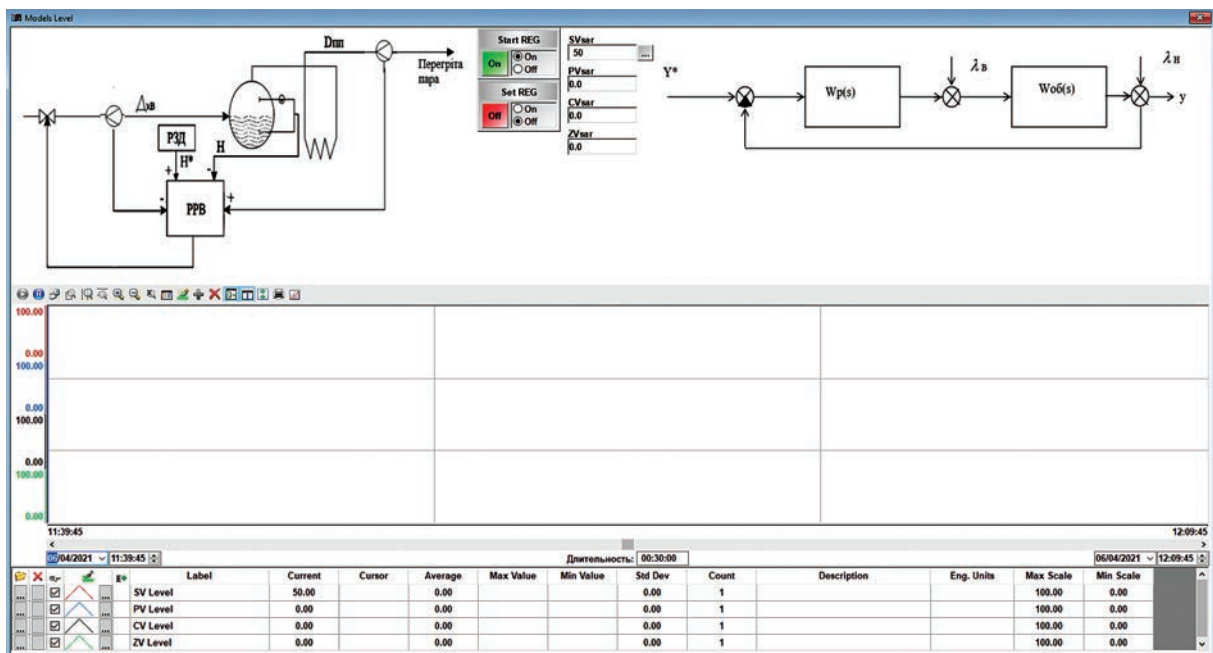


Рис. 8. Вікно «Models Level»

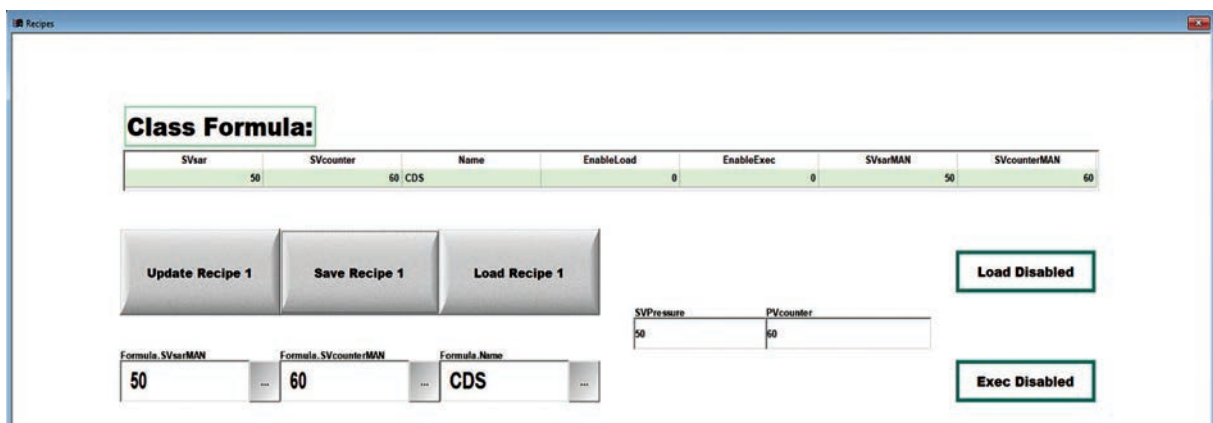


Рис. 9. Вікно «Recipes»

Указані КПЕ розраховуються скриптами SCADA-системи. (Примітка: порядок формування і розрахунку указаних КПЕ у статті не розглядається).

- «Reports» (рис. 11) – це вікно для формування нових звітів або редагування вже існуючих. Поточні звіти створюються у форматі RTF і переглядаються застосунком Microsoft Word. Клавішою Append або/і із заданою в вікні «Schedules» періодичністю у звіт дописуються поточні значення параметрів. Відповідними текстовими полями задається діапазон дати і часу формування історичного звіту, а відповідними клавішами ініціюється формування історичного звіту. Сформований історичний звіт може бути

переглянутий у таблиці на вікні або застосунком Microsoft Excel.

Висновки і рекомендації. 1. Структурне (імітаційне) моделювання АТК – це моделювання взаємодії програмно змодельованого ТОВ (тобто імітаційної моделі ТОВ) і ПТК АСУТП, якою оснащений ТОВ. Імітаційне моделювання є ефективною операційною технологією, близькою за своєю ідеологією до цифрового твінінгу динамічних систем. 2. Розроблена імітаційна модель АТК барабанного котла на програмно-технічній платформі «СКМ Matlab Simulink (модель ТОВ) – софтПЛК CoDeSys (контролерна функціональність АСУТП) – SCADA-система WedStudio

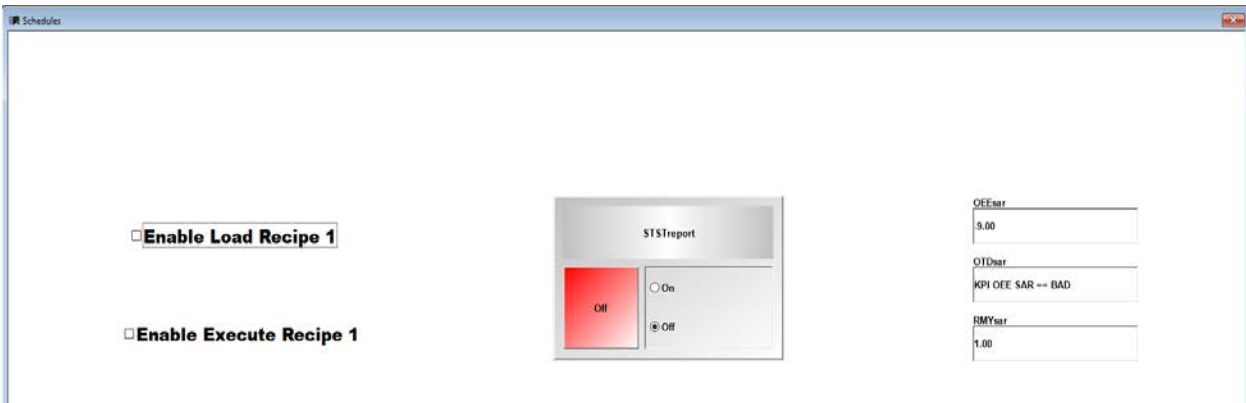


Рис. 10. Вікно «Schedules»

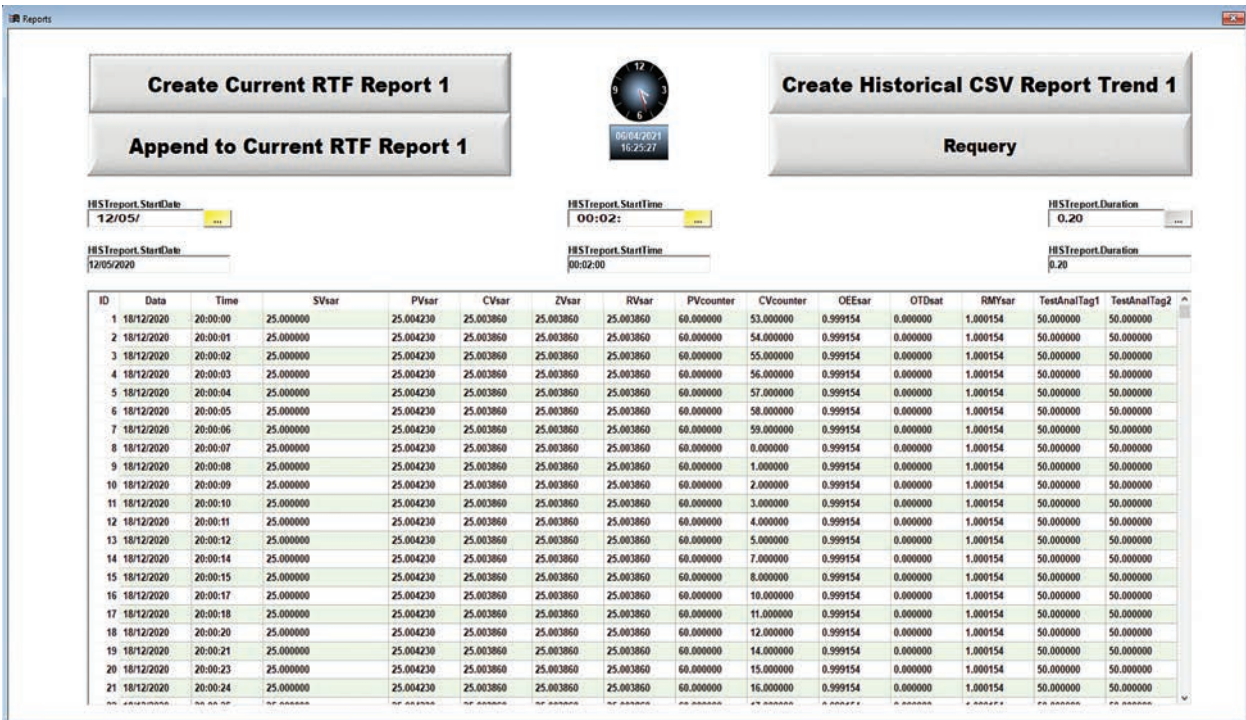


Рис. 11. Вікно «Reports»

(супервізорна функціональність АСУТП)» рекомендується для використання як із навчальною метою у лабораторних роботах із автоматизації, так і на стадіях проектування та експлуатації для налагодження АСУ котла. 3. У СКМ Matlab Simulink змодельована функціональна взаємодія всіх ОУ (каналів передачі дії) в ТОУ барабанного котла (зокрема з урахуванням ефекту «набрякання рівня») за основним збуренням зі сторони регулюючого клапану турбіни. 4. Змодельовані найважливіші АСУ контролерної функціональності

(на прикладі софтверу CoDeSys) АСУТП барабанного котла – каскадна АСУ теплового навантаження котла і одноконтурна АСУ рівня в барабані котла, які є невід’ємними частинами системи автоматичного управління енергоблоком. 5. Реалізовані типова НМІ-Standard і MES-Lite супервізорна функціональність (у SCADA-системі WebStudio), зокрема розрахунок ключових показників ефективності, що дозволяє оператору-технологу ефективно імітувати роботу і взаємодію (операційний інтерфейс) із реальним фізичним ТОУ.

Список літератури:

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

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

Structural modeling (simulation) of automated technological complex is modeling of the interaction of the controller and supervisory functionality of the automated process control system and software-modeled (simulated) technological control object. Structural model (simulation) of the automated technological complex of the heat power drum boiler are developed and tested. The controller functionality of the automated control system is implemented (modeled) by the software programmable logic controller CoDeSys. Supervisory functionality of the automated control system is implemented by the human-machine interface system WebStudio. The technological control object is modeled by functional block diagrams in the Matlab computer mathematics system (Simulink package). The complex work of automatic heat load control system and automatic level control system (taking into account the effect of "swelling of the level") in their interaction on the disturbance from the control valve of the turbine as a part of the power unit is simulated. Developed and tested structural model (simulation) of the automated technological complex of the heat power 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.

Simulation is an effective operating technology that is ideologically close to digital twinning of dynamic systems. Developed imitation model of automated technological complex of drum boiler on the software and hardware platform "Simulink (model of technological control object) – CoDeSys (model of control functionality of the automated control system) – WebStudio (model of supervisory functionality of the automated control system)" is recommended for use both for educational purposes in laboratory works on automation and for adjusting automatic control system of drum boiler at stages of designing and operation.

Key words: *structural modeling, imitation modeling, simulation, 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.*