

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ЦИФРОВИЙ ТВІНІНГ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ (КІБЕР-ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ)

Батюк С. Г.

ВСТУП

Четверта промислова революція (4ІР) – практична реалізація цифрової економіки. Цифрова економіка – це економіка інформатизації, автоматизації і роботизації (основна тенденція вже 5-ої промислової революції). Сенс 4ІР – цифровізація підприємства. Результат 4ІР – цифрове (цифровізоване) підприємство. Агенти 4ІР – розподілені кібер-фізичні системи (КФС), які взаємодіють.

КФС (інакше: розумна або інтелектуальна система) – це інтерактивна мережа з фізичних та обчислювальних компонентів, які запроєктовані і функціонують як єдине ціле. КФС – це інтернет-річ. КФС історично походять від 1) воєнних, технологічних і побутових пристроїв з вбудованими системами управління реального часу (розумні девайси і роботи) і 2) автоматизованих технологічних комплексів (АТК).

АТК складається з технологічного об'єкту управління (ТОУ), що автоматизується, і розробленої автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУТП).

КФС є актором (реалізує алгоритм управління об'єктом) і комунікатором (реалізує обмін даними). Сучасні технології обробки даних роблять з концепції КФС реальні КФС. Саме сучасні технології обробки даних, а не складні внутрішні алгоритми і математика, роблять КФС активним агентом і комунікатором цифрової економіки.

Енергетичні кібер-фізичні системи (або кібер-енергетичні системи – КЕС) – це цифровізовані (автоматизовані та інформатизовані) теплоенергетичні агрегати, виробництва і підприємства в енергетиці і промисловості. КЕС – це «розумний» агрегат, «розумне» виробництво, «розумне» підприємство.

Промислові КЕС в автоматичному режимі забезпечують генерацію, перетворення, розподіл та споживання різних видів енергії – теплової, електричної, механічної. Прикладами КЕС в Україні і в світі є розумні енергетичні виробництва (ТЕЦ, ТЕС, АЕС

тощо), розумні виробництва в металургійній, хімічній, будівельній, харчовій галузях, розумні електричні та теплові мережі (Smart Grid, Smart Thermal Grids), розумні будинки (Smart Building), промислові інтернет-речі (IoT).

Фізичні (промислові об'єкти) і вбудовані обчислювальні (кібернетичні) компоненти КЕС є глибоко інтегрованими на основі мереж обміну даними, інтернет технологій, хмарних обчислень. КЕС складається з технологічного об'єкту управління (агрегат, виробництво, підприємство) і автоматизованої системи управління (АСУ).

Програмна і апаратна платформа сучасної КЕС – операційні технології, що поєднують класичні рішення з автоматизації і актуальні інформаційні технології. Операційні технології – класичні і сучасні технології промислової автоматизації.

Операційні технології цифровізації підприємства:

1. Автоматизація промислового підприємства на основі АСУ технологічними процесами, АСУ виробництвами, інтегрованої АСУ підприємством.

2. Алгоритмізація і моделювання КЕС на основі теорії автоматичного управління (ідентифікація об'єктів, аналіз і синтез систем автоматичного регулювання, PID-регулювання, fuzzy-регулювання, neuro-регулювання, адаптивне управління) і сучасних методів Data Science (імітаційне моделювання; цифрові двійники – Digital Twins, машинне навчання – Machine Learning, попереджувальне обслуговування – Predictive Maintenance, віртуальна і доповнена реальність – VR/AR).

3. Програмне і технічне забезпечення контролерного (нижнього) рівня сучасної АСУ на платформі програмованих логічних контролерів (ПЛК – PLC), станцій людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ – НМІ), граничних пристроїв (Edge Devices), інтелектуальних сенсорів і актуаторів (RTU).

4. Програмне і технічне забезпечення супервізорного (верхнього) рівня АСУ на платформі систем автоматизації і диспетчеризації технологічних (SCADA), виробничих (MES) та бізнесових процесів (BPM), систем промислової бізнес аналітики (BI).

5. Сучасні мережеві технології обміну даними, хмарні (Cloud) технології, сенсорні мережі, промисловий інтернет речей (Industrial IoT).

6. Засоби інформаційної та функціональної безпеки (Cyber Security and Functional Safety).

В розділі монографії розглядаються актуальні теоретичні і практичні задачі імітаційного моделювання теплоенергетичних АТК. Технології

імітаційного моделювання і цифрового твінінгу є схожими, але не тотожними і мають різні сфери ефективного застосування. Метою розділу монографії є демонстрація універсальності і ефективності саме імітаційного моделювання АТК як в STEM-освіті для навчального процесу, так і в промисловості для системного інтегратора в процесі інсталяції, модернізації і тиражуванні розробленого програмно-технічного комплексу АСУТП.

Історично і парадигматично першою є ідеологія імітаційного моделювання динамічних систем взагалі¹.

Ідеологія імітаційного моделювання промислових АТК (як і цифровий твінінг) історично і парадигматично є практичним застосуванням ідеології імітаційного моделювання динамічних систем і конкретизує її засади і принципи саме для промислових АТК².

Автор розділу монографії розробляв теоретичні і практичні питання імітаційного моделювання теплоенергетичних АТК на кафедрі автоматизації енергетичних процесів (раніше кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів) разом з бакалаврантами і магістрантами в процесі лекційних і лабораторних занять в STEM-лабораторії імітаційного моделювання АТК. Кафедра входить до складу навчально-наукового інституту атомної і теплової енергетики (раніше теплоенергетичний факультет) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Теоретичні і практичні результати роботи описані в статтях автора зі співавторами (бакалаврантами і магістрантами) [3-7].

Розділ монографії складається з вступу (поточний текст), п'яти параграфів і висновків. В параграфі 1 описані постановка задачі і основні теоретичні засади і практичні результати імітаційного моделювання теплоенергетичних АТК. В параграфі 2 описане функціональне імітаційне моделювання фільтрації в інформаційно-вимірювальних системах (як найскладнішої функції первинної обробки сигналів в ПЛК); викладений матеріал є прикладом реалізації ідеології імітаційного моделювання для задач, напряму не пов'язаних з автоматизацією. В параграфах 3 і 4 описані відповідно функціональне імітаційне і структурне імітаційне моделювання АТК з, напевно, найскладнішим теплоенергетичним ТОВ – енергетичним барабановим котлом; викладений матеріал є прикладом реалізації

¹ Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Санкт-Петербург, 2005. 400 с.

² Рыбалев А.Н. Имитационное моделирование АСУ ТП. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. 408 с.

ідеології імітаційного моделювання АТК для конкретного ТОО. В параграфі 5 описане структурне імітаційне моделювання АТК промислової логістики на прикладі ділянки методичних печей прокатного стану; викладений матеріал є прикладом реалізації ідеології імітаційного моделювання АТК для задач програмно-логічного управління, а не тільки неперервного управління (історично імітаційне моделювання АТК розроблялось саме для ТОО неперервного управління). Висновки містять перелік результатів і рекомендацій щодо імітаційного моделювання і цифрового твінінгу автоматизованих технологічних комплексів та інформаційно-вимірвальних систем.

Кожен параграф розділу монографії може бути опрацьований окремо, так як є автономним за змістом і не має перехресних посилань на інші параграфи (тому деякі визначення і формулювання в параграфах вимушено повторюються). Параграфи містять, крім тексту, достатньо багато рисунків (в параграфі 2 є формула, в параграфі 5 – таблиця). Рубрикація, номери рисунків і таблиць інкапсульовані всередині параграфів. Рубрикація матеріалу всередині параграфів є однотипною (для уніфікації викладу матеріалу).

Параграф 1 також можна розглядати або як вступний, або як узагальнюючий відносно наступних параграфів 2-5.

1. Імітаційне моделювання (функціональне і структурне) теплоенергетичних автоматизованих технологічних комплексів³.

1.1. Постановка проблеми. Імітаційне моделювання динамічних систем – актуальний напрямок і ефективний інструментарій програмного моделювання динаміки з використанням як універсальних, так і спеціалізованих програмних продуктів. Для промислової автоматизації значний практичний інтерес має імітаційне моделювання динамічних систем в системах автоматизованого управління технологічними процесами промислових технологічних агрегатів, в тому числі теплоенергетичних агрегатів.

Технологічний об'єкт управління (ТОО) – це технологічний агрегат, який автоматизується. Структурно ТОО складається з

³ Розділ базується на практичних розробках автора з співавторами Батюк С.Г., Лядишев Д.К. Імітаційне моделювання теплоенергетичних автоматизованих технологічних комплексів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. Том 33 (72). № 4. С. 39-47.

окремих об'єктів управління (ОУ) – каналів передачі дії «регульовальна дія – регульований параметр». Сучасні автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП; надалі просто АСУ) ТОУ є дворівневими. Програмно-технічною платформою контролерного (нижнього) рівня АСУ є програмовані логічні контролери (ПЛК). Бізнес-логіка (неперервне регулювання і програмно-логічне управління) в ПЛК реалізується функціональними блоками (ФБ). Програмно-технічною платформою супервізорного (верхнього) рівня АСУ є HMI/SCADA-системи (надалі системи ЛМІ – людинно-машинного інтерфейсу). Візуалізація в ЛМІ реалізується графічними вікнами з вставленими і анімованими графічними елементами і контролами (меню, мнемосхеми, аларми, тренди, рецепти, розклади, звіти тощо). Оператор технологічного процесу (ОТП) через ЛМІ реалізує автоматизоване (за участі людини) управління технологічними процесами ТОУ. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – це ТОУ з АСУ, якою ОТП управляє цим ТОУ. АТК – це сукупність систем автоматичного регулювання (САР). Автоматична система регулювання (АСР) – це сукупність програмно-технічних засобів (сенсори; засоби візуалізації; регулятори; актуатори) в складі САР. АСУ – це сукупність АСР. САР – це ОУ (як канал передачі дії) з АСР, яка управляє цим ОУ. САУ – система автоматичного управління, яка об'єднує декілька функціонально взаємодіючих САР. Сучасна АСУ функціонально структурується на дві підсистеми: інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) і регульовально-виконавчу систему (РВС). ІВС – це сукупність вимірювальних каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори або давачі Д; реєструючі прилади РП; вхідні модулі – аналогово-цифрові перетворювачі АЦП – ПЛК). РВС – це сукупність регульовально-виконавчих каналів (РВК) технологічних параметрів (ФБ в ПЛК; вихідні модулі – цифро-аналогові перетворювачі ЦАП – ПЛК; актуатори або виконавчі механізми ВМ; блоки ручного управління БРУ для вибору режимів автоматичного (від ПЛК) або ручного і дистанційного управління з пульта оператора ВМ в ручному режимі; регулюючі органи РО). Програмно-технічні засоби (ПТЗ) АСР – це сукупність ВК і РВК в складі АСР (коректно буде також сказати – в складі САР).

На рис. 1.1 представлена схема структурна сучасної ПТЗ типової каскадної САР (на конкретному прикладі). Схема демонструє: 1) вимірювання параметрів давачами Д1 і Д2 і вхідними АЦП ПЛК (регульований параметр – температура зворотної води; параметр з

проміжної точки – температура прямої води); 2) первинну обробку вимірних сигналів в ПЛК (ФБ на схемі не вказані); 3) каскадне регулювання в ПЛК (ФБ коригуючого регулятора температури зворотної води змінює завдання ФБ стабілізуючого регулятора температури прямої води); 4) видачу управляючого сигналу з ПЛК через вихідний ЦАП і БРУ на ВМ, який реалізує регульовальну дію – переміщення РО на подачі води в гріючий контур теплообмінника; 5) вторинну обробку вимірних даних в ЛМІ (обмін даними ПЛК-ЛМІ за протоколом OPC-UA; ЛМІ SQL-запитами записує історичні дані в SQL-СУБД; ЛМІ, як MQTT-публікатор (паблішер) передає файл даних на MQTT-брокер, де він зчитується MQTT-підписувачем (субскрайбером)).

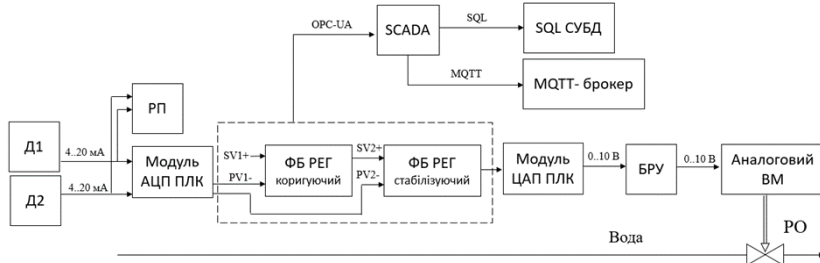


Рис. 1.1. Схема структурна ПТЗ каскадної САР температури зворотної води в незалежній системі центрального опалення. Регульовальна дія – зміна витрати води в гріючому контурі теплообмінника

Задачами імітаційного моделювання ПТЗ промислових САР є моделювання окремих функцій ПТЗ і моделювання взаємодії структурних компонентів ПТЗ (ВК і РВК) з спільним використанням сучасного програмно-технічного інструментарію АСУ і систем комп'ютерного моделювання.

1.2. Аналіз проблеми. Моделювання об'єктів – це маніпулювання аналогами реальних об'єктів замість маніпулювання реальними об'єктами. Аналоги об'єктів можуть бути спрощеними, адекватними або складнішими порівняно з реальними об'єктами.

Різновиди моделювання динамічних систем

– Фізичне моделювання (фізичні аналоги фізичних об'єктів).
Математичні засоби: теорія подібності, теорема Бекінгема

(пі-теорема або теорема розмірностей), критерії (інваріанти) подібності. Застосування: авіація; космонавтика; теплоенергетика і ядерна енергетика; військова промисловість.

– Аналітичне моделювання (математичні аналоги динамічних систем). Математичні засоби: лінійні і нелінійні диференційні рівняння. Застосування: динамічні системи в промисловості і в енергетиці.

– Програмне (імітаційне) моделювання (обчислювальні аналоги динамічних систем). Математичні засоби: передавальні функції, функціональні блоки, системи комп'ютерної математики (СКМ), блок-діаграми (MatLab Simulink), програмно-технологічні компоненти (MatLab SimScape). Застосування: динамічні системи в промисловості і в енергетиці.

Імітаційне моделювання технологій, агрегатів, виробництв і кібер-фізичних систем – це програмне (віртуальне) моделювання фізичних (реальних) активів. Вирізняють симуляцію і емуляцію. Симуляція – це імітаційне моделювання фізичного активу, яке імітує як структуру і динаміку фізичного активу, так і збурення (технологічні і параметричні) на фізичний актив. Емуляція – це імітаційне моделювання фізичного активу, яке імітує структуру і динаміку фізичного активу, але використовує для симуляції реальні (вимірні) збурення (технологічні і параметричні) на фізичний актив. Емулятор – це симулятор, зв'язаний з фізичним активом через реальні (які вимірюються в реальному часі) технологічні і параметричні збурення на фізичний актив.

Імітаційне моделювання АТК – це програмно-технічне моделювання контролерної і супервізорної функціональності АСУ з використанням програмних (не фізичних і не математичних) моделей (цифрових двійників) ТОУ. Функціональне імітаційне моделювання динамічної системи – імітаційне моделювання функцій динамічної системи. Структурне імітаційне моделювання динамічної системи – моделювання взаємодії структурних частин динамічної системи.

Імітаційне моделювання АТК є ефективним інструментарієм для перевірки роботоздатності і налагодження АСУ за відсутності доступу до реального фізичного ТОУ і неможливості розрахунку динаміки систем автоматичного регулювання з використанням складних математичних моделей ТОУ. Імітаційне моделювання АТК використовується на стадіях проектування (розробки і програмування), впровадження, тиражування і модернізації АСУ.

ТОУ моделюється або в СКМ, або прямо в самому ПЛК. Реалізація ЛМІ – зовнішня SCADA-система або НМІ-панель самого ПЛК. Реалізація ПЛК – хардПЛК (реальний фізичний ПЛК) або софтПЛК (програмно реалізований в комп'ютері ПЛК).

Вирізняють: імітаційне SIL-моделювання АТК (Software-In-the-Loop: софтПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована в СКМ; ЛМІ – зовнішня SCADA-система); імітаційне НІЛ-моделювання АТК (Hardware-In-the-Loop: хардПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована прямо в хардПЛК; ЛМІ – НМІ-панель самого хардПЛК); імітаційне VІL-моделювання АТК (Viewer-In-the-Loop: модель ТОУ, ПЛК і ЛМІ реалізовані в НМІ/SCADA-системі).

Цифровий твінінг – це розробка і впровадження цифрових двійників. Цифровий двійник (Digital Twin – DT) – керована реальними вимірними даними цифрова копія фізичного активу для оптимізації активу в реальному часі впродовж всього циклу життя активу. Цифровий двійник реалізує патерн проектування M-V-C (Model-View-Controller – Модель-Візуалізація-Контролінг).

З позицій імітаційного моделювання, цифровий двійник – це емулятор фізичного активу, тобто симулятор фізичного активу, зв'язаний з цим фізичним активом через реальні (тобто вимірювані в реальному часі) технологічні і параметричні збурення на цей фізичний актив.

DT-прототип (DT-Prototype) – програмна модель фізичного активу без підключення до реальних вимірних даних (тобто симулятор фізичного активу). DT-екземпляр (DT-Instance) – програмна модель фізичного активу з підключенням до реальних вимірних даних (тобто емулятор фізичного активу). DT-агрегатор (DT-Aggregate) – сукупність програмних моделей фізичних активів з підключенням до реальних вимірних даних і обміном даними між моделями (тобто емулятор комплексу фізичних активів). DT-продукт (DT-Product) – цифровий двійник окремого продукту. DT-процес (DT-Process) – цифровий двійник технологічного процесу. DT-система (DT-System) – цифровий двійник складної системи з продуктів і процесів. DT-колекція (DT-Collection) – колекція цифрових двійників. DT-середовище (DT-Environment) – фізичне середовище, з яким взаємодіють цифрові двійники (ПЛК для обміну даними тощо).

Екземпляри ЦД ТОУ (емюлятори ТОУ) має сенс використовувати в АСТД – автоматизованих системах технічної діагностики – для

задач предиктивного обслуговування (predictive maintenance) технологічного обладнання на основі інформації від кількісних давачів (термометри, п'єзометри, витратоміри, рівнеміри, контцентратоміри, контроль руху) і якісних давачів (спектрометрія, якісний аналіз тощо). Особливість: режим порадики; відсутність замкнених контурів регулювання режимних параметрів. Не має сенсу використовувати в імітаційних моделях АТК для тестування АСУ.

Прототипи ЦД ТОО (симулятори ТОО або просто імітаційні моделі ТОО) має сенс використовувати в імітаційних моделях АТК. Мета – налагодження і тестування АСУ (на стадіях техно-робочого проектування, введення в дію, тиражування, модернізації). Особливість: замкнені контури регулювання режимних параметрів; одноконтурні і каскадні САР; взаємовпливи між САР через збурення зі сторони регулюючого органу і за навантаженням (а не тільки просто моделювання автономних САР). Не має сенсу використовувати в АСТД для задач предиктивного обслуговування (predictive maintenance).

1.3. Постановка завдання. На кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) КПІ розроблюються полігони імітаційного моделювання АТК теплоенергетичних режимних параметрів. Полігони використовується в навчальному процесі і входять до складу лабораторії імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів (ІМ АТК). Лабораторний комплекс ІМ АТК призначений для імітаційного моделювання теплоенергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем). В лабораторії виконуються лабораторні роботи з автоматизації технологічних процесів, програмування контролерної і супервізорної функціональності АСУ. Лабораторія використовується для дослідження і розробки АСУ в енергетиці і промисловості в процесі роботи над курсовими проектами, дипломними проектами бакалавра, магістерськими дисертаціями.

На рис. 1.2 представлені структури полігонів імітаційного моделювання АТК в лабораторії ІМ АТК.

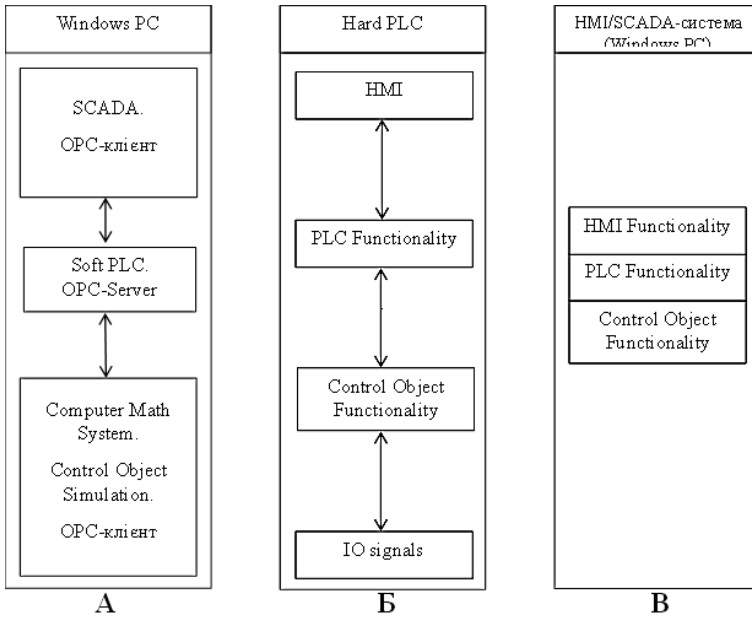


Рис. 1.2. Структури полігонів імітаційного моделювання АТК

- А) Структура полігону імітаційного SIL-моделювання АТК.
- Б) Структура полігону імітаційного HIL -моделювання АТК.
- В) Структура полігону імітаційного VIL -моделювання АТК

Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ призначений для:

- 1) використання в навчальному процесі кафедри АЕП (наскрізна віртуальна комплексна лабораторна робота з дисциплін «Інформаційно-вимірювальні системи» (2 курс), «Автоматизовані системи управління» (3 курс), «Супервізорні засоби автоматизації» (4 курс));
- 2) використання в якості програмно-технічного симулятора при проектуванні, модернізації і тиражуванні промислових АСУТП ТОУ.

Програмно-модельним інструментарієм розробки полігону імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ є: 1) альбом моделей «Моделювання елементів і структур промислових САР в СКМ Matlab Simulink» для імітаційного функціонального моделювання САР промислових систем; 2) програмно-технічний SIL-симулятор АТК на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio для імітаційного структурного моделювання АТК ТОУ.

Задачами розробки полігону імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ є: 1) зробити огляд АТК ТОУ; 2) виконати інженерний розрахунок САР режимного параметру; 3) виконати функціональне моделювання САР режимного параметру в СКМ Matlab Simulink; 4) виконати структурне моделювання САР режимного параметру в програмно-технічному SIL-симуляторі на платформі Simulink/CoDeSys/WebStudio; 5) розробити посібник «Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ» (порядок роботи з полігоном імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ).

Інженерний розрахунок АСУТП – це спрощений (арифметичні дії) і комплексний (метрологічний розрахунок; розрахунок надійності; вибір РО; розрахунок і функціональне моделювання динаміки) швидкий формульний розрахунок основних показників роботоздатності САР в складі АСУТП, на основі якого приймаються рішення щодо експлуатації САР.

Склад полігону імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ: 1) посібник «Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ» з результатами розрахунків, імітаційного функціонального і структурного моделювання САР режимного параметру; 2) файл проєкту функціонального моделювання САР режимного параметру в СКМ Matlab Simulink; 3) сконфігурований програмно-технічний SIL-симулятор – папка проєкту WebStudio з структурним моделюванням НМІ/SCADA-функціональності САР режимного параметру.

1.4. Результати моделювання. Полігони імітаційного SIL-моделювання реалізують як функціональне, так і структурне імітаційне моделювання АТК ТОУ, що дає можливість користувачу всебічно дослідити ТОУ і АТК, який розроблюється. Полігони підтримують імітаційне моделювання ВК ІВС АСУ і РВК РВС АСУ.

Функціональні моделі імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ (альбом моделей «Моделювання елементів і структур промислових САР в СКМ Matlab Simulink»)

- Моделі елементарних промислових ТОУ.
- Моделі фільтрів низької частоти, високої частоти і смугових.
- Модель зовнішньої і внутрішньої фільтрації сигналів і даних в теплоенергетичних САР.
- Модель аналогового ПІ-регулятора з виконавчим механізмом змінної швидкості (позиціонером).
- Модель релейно-імпульсного ДП-регулятора з виконавчим механізмом постійної швидкості (інтегратором); в комплекті – ПІ-закон регулювання.

- Модель нелінійного РО (квадратична нелінійність).
- Модель одноконтурної САР з ПІ-регулятором.
- Модель (одноконтурної) релейної САР з двопозиційним (релейним) регулятором.
- Модель комбінованої САР.
- Модель двоконтурної двовимпульсної САР.
- Модель двоконтурної каскадної САР.
- Модель двовірної системи зв'язаного регулювання.
- Модель структурно несталої САР.
- Модель САУ промислової топки: САР температури топки; САР пропорціонування витрати повітря; САР розрідження в топці.
- Модель САР тиску в колекторі.
- Модель САР каскадного басейну.
- Модель САУ газомазутового барабанного енергетичного парового котла з моделюванням ефекту набрякання рівня пароводяної суміші в барабані: САР теплового навантаження (САР тиску в паропроводі турбіни); одноконтурна САР рівня в барабані котла з трімппульсним регулятором.
- Моделі одноконтурних САР з структурними регуляторами. Предиктивний регулятор. Каскадний регулятор. Квадратичний регулятор.

Структурні моделі імітаційного SIL-моделювання АТК ТОУ (програмно-технічний SIL-симулятор АТК на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio)

На рис. 1.3 представлений програмний компонент софтПЛК CoDeSys для моделювання функцій первинної обробки сигналів в ПЛК. Програмний компонент підтримується вікном візуалізації в софтПЛК CoDeSys з елементами управління і багатоточковим трендом. Програмний компонент дозволяє змоделювати в реальному часі типову контролерну функціональність ВК ІВС АСУ.

На рис. 1.4 представлена модель універсального ТОУ в СКМ Matlab Simulink. Модель працює в реальному часі, тобто в темпі з реальним перехідним процесом. Обмін даними з софтПЛК CoDeSys – за протоколом OPC-DA. Універсальність ТОУ полягає в наступному: 1) має швидкісну та інерційну частини з можливістю вимірювання сигналу з проміжної точки ОУ, що дає можливість використати ТОУ як в одноконтурній САР, так і в каскадній САР; 2) дозволяє реалізувати в реальному часі сигнальні збурення зміною завдання і зі сторони РО і параметричні збурення зміною параметрів ОУ; 3) дозволяє змоделювати

низькочастотну і високочастотну зовнішні перешкоди для реалізації фільтрації вимірних даних в ПЛК.

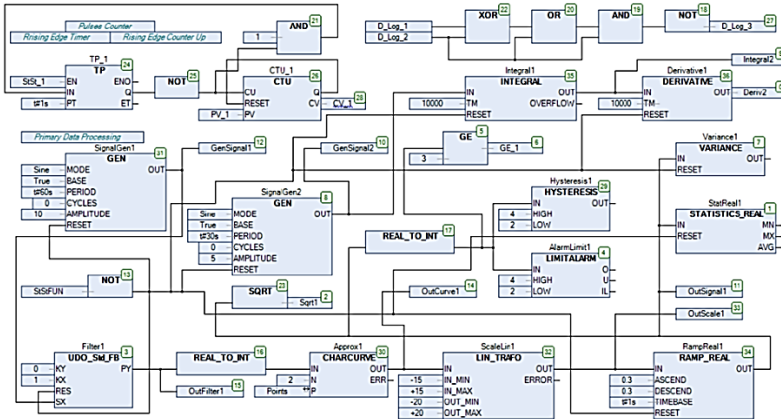


Рис. 1.3. Скріншот програмного компонента софтПЛК CoDeSys для моделювання функцій первинної обробки сигналів в ПЛК

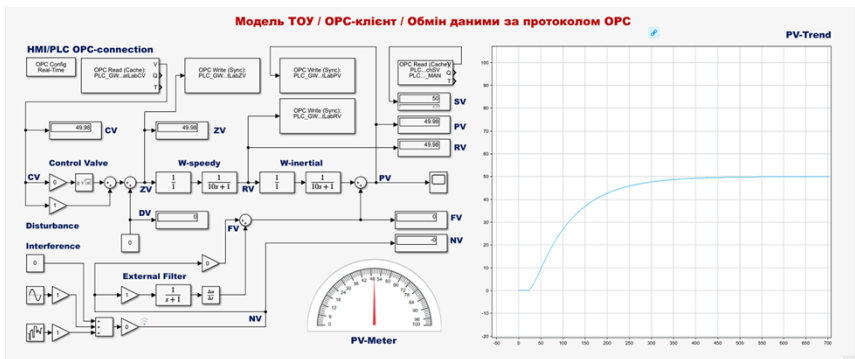


Рис. 1.4. Скріншот моделі універсального TOU в СКМ Matlab Simulink

На рис. 1.5 представлений програмний компонент софтПЛК CoDeSys для реалізації універсальної каскадної АСР в ПЛК. Програмний компонент підтримується вікном візуалізації в софтПЛК CoDeSys з елементами управління і багатоточковим

трендом. Обмін даними з ТОУ в СКМ Matlab Simulink – за протоколом OPC-DA. Програмний компонент дозволяє змодельовати в реальному часі типову контролерну функціональність каскадної АСР. В промисловості практично використовуються тільки дві АСР – одноконтурна і каскадна. Решта типів АСР практично не використовуються, так як для реалізації своїх внутрішніх і зовнішніх компенсаторів потребують ланок реального диференціювання, які практично неможливо реалізувати в ПЛК. (Використовується релейна АСР для тих ОУ, де реалізація АСР з ПІ-регуляторми є занадто коштовною, наприклад в багатозонних – до 20 зон регулювання температури – тунельних печах для випалення цегли.) Каскадна АСР принципово краща за одноконтурну АСР при збуренні зі сторони РО. При збуренні зміною завдання одноконтурна і каскадна АСР забезпечують практично однакові перехідні процеси. Каскадна АСР може бути реалізована тільки тоді, коли є можливість виміряти параметр з проміжної точки ОУ, тому каскадна АСР – найкращий представник АСР з додатковими інформаційними каналами (додатковими зворотними зв'язками). Універсальність каскадної АСР полягає в тому, що вона може бути легко трансформована в одноконтурну АСР – відключається стабілізуючий регулятор і коригуючий регулятор каскадної АСР стає регулятором одноконтурної АСР.

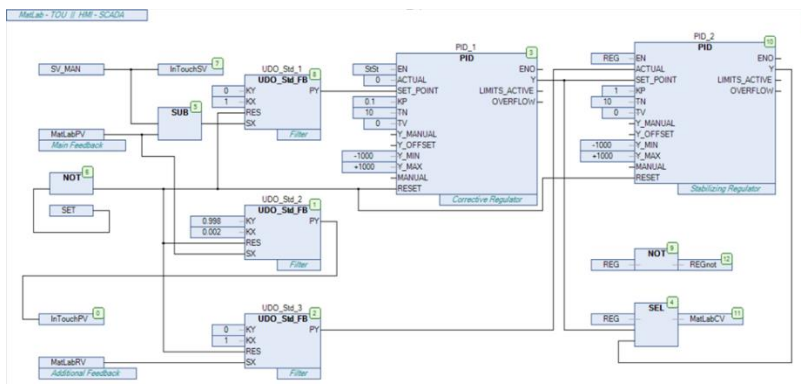


Рис. 1.5. Скріншот універсальної каскадної АСР в софтПЛК CoDeSys

На рис. 1.6 представлено вікно «Models» ЛМІ WebStudio. Вікно підтримує візуалізацію взаємодії універсального ТОУ в СКМ Matlab

Simulink і універсальної АСР В софті ПЛК CoDeSys. Іншими словами, вікно візуалізує перехідний процес в універсальній каскадній АСР. Обмін даними з софті ПЛК CoDeSys – за протоколом OPC-DA. Моделювання будь-якої АСР як каскадної АСР має сенс, так як каскадна АСР може бути легко трансформована в одноконтурну АСР шляхом трансформації каскадної АСР в софті ПЛК CoDeSys в одноконтурну АСР.

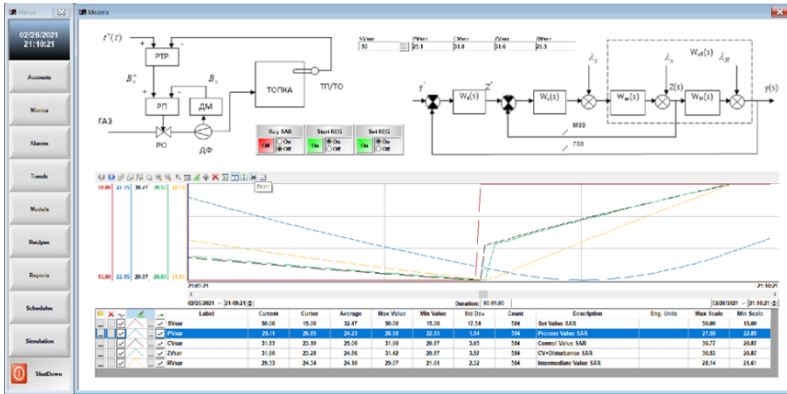


Рис. 1.6. Скріншот вікна «Models» візуалізації каскадної АСР в LMI WebStudio

В структурному моделюванні немає сенсу моделювати взаємодію АСР, як це зроблено в функціональному моделюванні САУ промислової топки і САУ газомазутового барабанного енергетичного парового котла. Причина – всі промислові АСР є автономними, тобто мають працювати як автономні АСР режимних параметрів незалежно від інших АСР. Вплив іншої АСР на роботу автономної АСР – це збурення, яке потрібно парировати; тобто автономна АСР має реалізувати перехідний процес, що сходиться до заданного значення режимного параметру, з оптимальними прямими показниками якості перехідного процесу. Таким чином, в структурному моделюванні САУ ТОВ моделюється як сукупність автономних АСР режимних параметрів.

В LMI WebStudio змодельовано Застосунок HMI-Standard функціональність (вікна «Menus», «Mimics», «Alarms», «Trends», «Models») і MES-Lite функціональність (вікна «Models», «Recipes»,

«Reports», «Schedules», «Simulation»). Назви вікон відповідають функціональності, яку вони візуалізують.

Додаткова функціональність програмно-технічного SIL-симулятора АТК ТОУ

– НІЛ-симуляція універсальної каскадної АСР в софтПЛК CoDeSys. ТОУ реалізований спрощений (швидкісна та інерційна частини – по одній аперіодичній ланці першого порядку). Реалізована вся функціональність каскадної АСР. Реалізовані збурення зі сторони РО. Програмний компонент підтримується вікном візуалізації в софтПЛК CoDeSys з елементами управління і багатоточковим трендом.

– VІL-симуляція універсальної каскадної АСР в ЛМІ WebStudio. ТОУ реалізований спрощений (швидкісна та інерційна частини – по одній аперіодичній ланці першого порядку). Реалізована вся функціональність каскадної АСР. Реалізовані збурення зі сторони РО. Скрипт підтримується вікном візуалізації «Simulation» в ЛМІ WebStudio з елементами управління і багатоточковим трендом.

Примітка. Програмно-модельним інструментарієм для розробки полігонів імітаційного НІЛ-моделювання АТК в лабораторії ІМ АТК є програмно-технічний НІЛ-симулятор на платформі хардПЛК Uniflex UniStream.

Полігони імітаційного моделювання лабораторії ІМ АТК

1. Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК пічних систем.
2. Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК котельних систем.
3. Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК інженерних систем.
4. Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК тепло-енергетичних систем
5. Полігон імітаційного НІЛ-моделювання АТК тепло-енергетичних систем.
6. Полігон імітаційного SIL-моделювання АТК з структурними регуляторами.
7. Полігон імітаційного SIL-моделювання ІВС тепло-енергетичних режимних параметрів.
8. Полігон імітаційного НІЛ-моделювання ІВС теплоенергетичних режимних параметрів.

Розроблені полігони 1-4. Розробка полігонів 5-8 планується на 2022-2023 навчальний рік.

1.5. Висновки і рекомендації. 1. Розроблений програмно-технічний SIL-симулятор є ефективним програмно-модельним інструментарієм розробки полігонів імітаційного SIL-моделювання АТК. 2. Розроблені полігони імітаційного SIL-моделювання АТК можуть бути використані як в навчальному процесі (основне призначення), так і техно-робочому проєктуванні чи модернізації АТК (опція). 3. Ідеологія імітаційного моделювання АТК може бути реалізована для будь-якого АТК, а також в MES-системах на зовсім іншій програмно-технічній платформі.

2. Функціональне імітаційне моделювання фільтрації в теплоенергетичних інформаційно-вимірювальних системах⁴

2.1. Постановка проблеми. Успішне вирішення наукових і технічних задач, у тому числі забезпечення якості продукції, у значній мірі залежить від ступеня досягнення єдності і вірогідності (точності) вимірювань. Єдність вимірювань – стан вимірювань, за якого їхні результати виражені в узаконених одиницях, а похибки або невизначеності вимірювань відомі із заданою ймовірністю і не виходять за встановлені границі. Єдність вимірювань необхідна для забезпечення порівнюваності результатів вимірювань, проведених у різних місцях, в різний час з використанням різних методів і засобів вимірювання. Точність вимірювань – характеристика ступеня наближення результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Для конкретних умов і цілей вимірювання існує свій раціональний рівень точності, котрий недоцільно перевищувати через зростання складності відповідних вимірювань. У сучасній промисловості затрати праці на виконання вимірювань складають близько 10% загальних затрат праці на всіх стадіях створення і експлуатації продукції, а в окремих галузях промисловості досягають 50-60% (електронна, радіотехнічна тощо). Ефективність цих затрат визначається достовірністю і відтворюваністю вимірювань.

Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – це технологічний агрегат, який автоматизується. АСУТП (надалі просто АСУ) – автоматизована система управління технологічними процесами ТОУ. Програмно-

⁴ Розділ базується на практичних розробках автора з співавторами Батюк С.Г., Лядишев Д.К. Моделювання фільтрації в теплоенергетичних системах автоматичного регулювання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. Том 33 (72). № 4. С. 48-55.

технічною платформою АСУ є програмовані логічні контролери (ПЛК) і системи людинно-машинного інтерфейсу (ЛМІ). Оператор технологічного процесу через ЛМІ реалізує автоматизоване (за участі людини) управління технологічними процесами ТОУ. ІВС – інформаційно-вимірвальна система – підсистема в складі АСУ. ІВС – це сукупність вимірвальних каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори; реєструючі прилади; вхідні модулі ПЛК).

Технологічні параметри ТОУ – це параметри технологічного агрегату, які вимірюються для автоматизації технологічного агрегату. Виміряні технологічні параметри ТОУ підрозділяються за призначенням на три групи. 1. Режимні параметри – технологічні параметри, стабілізація яких на заданному значенні забезпечує ефективне функціонування ТОУ. Стабілізація режимних параметрів ТОУ – це управляючі функції АСУ, які реалізуються системами автоматичного регулювання (САР) режимних параметрів в складі АСУ. 2. Захисні параметри – технологічні параметри, вимірювання (неперервне) або контроль (датчики-реле параметрів) яких забезпечує реалізацію захистів ТОУ від неправильного управління. Реалізація технологічних захистів на основі захисних параметрів ТОУ – це захисні функції АСУ. 3. Контрольні параметри – технологічні параметри, які не приймають участі в реалізації управляючих або захисних функцій АСУ, а використовуються для додаткового інформування оператора.

Інформаційні функції АСУ – це функції вимірювання технологічних (режимних, захисних і контрольних) параметрів ТОУ.

2.2. Аналіз проблеми. Вимірювання технологічних параметрів в автоматизації технологічних процесів має дві мети: 1) використання в САР режимних параметрів ТОУ, тобто в замкненому контурі регулювання; 2) інформування оператора про стан ТОУ. Відповідно, інформаційні функції АСУ – це не тільки просте фізичне вимірювання технологічних параметрів сенсорами, але і реалізація надзвичайно важливих функцій первинної обробки вимірних сигналів в ПЛК і вторинної обробки вимірних даних в ЛМІ.

Типові функції первинної обробки даних в ПЛК

1. Фільтрація – програмно реалізована фільтрація вимірних сигналів.

2. Апроксимація – кусочно-лінійна апроксимація. Лінеаризація нелінійної характеристики вимірювання. Обмеження мінімального і максимального значень (нелінійність типу насичення).

3. Масштабування – лінійне перетворення діапазону (шкали) вимірювання.

4. Сповільнення – обмеження швидкості зміни параметру (нелінійність типу насичення).

5. Порівняння – порівняння з уставкою. РІВНО, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДІАПАЗОН. Обмеження значення (нелінійність типу насичення).

6. Гістерезис – реалізація зони нечутливості і зони повернення (двопозиційна нелінійність; релейне регулювання).

7. Алармування – формування події тривоги (аларму) технологічної (попереджувальної) або аварійної.

8. Аналітика – статистичний аналіз. Виділення найменшого, найбільшого і середнього значень. Розрахунок дисперсії.

9. Інтегрування – лінійне інтегрування параметру (площа під графіком зміни параметру).

10. Лічильник – математична інкрементація і декрементація. Обрахування дискретних подій до уставки лічильника.

11. Таймер – реалізація часових затримок на величину уставки таймеру.

12. NOT – логічна операція НІ. Значення виходу протилежне значенню входу.

13. AND – логічна операція І. Вихід = 1, якщо два входи = 1.

14. OR – логічна операція АБО. Вихід = 1, якщо хоча б один з входів = 1.

15. XOR – логічна операція виключного АБО. Вихід = 1, якщо тільки один з входів = 1.

16. Генератор – генерація аналогових і дискретних даних константних і періодичних.

17. Перетворення типів даних – вимушене явне перетворення типів даних, як правило, REAL>INT.

Типовий порядок первинної обробки аналогових сигналів (INT, REAL) в ПЛК: Сигнал > Фільтрація – Апроксимація – Масштабування – Сповільнення – Порівняння, Аналітика, Алармування > Дані.

Порядок обробки дискретних сигналів (BOOL) в ПЛК – залежить від логіки обробки і не може бути типовим.

2.3. Постановка завдання. Найважливішою функцією первинної обробки вимірних сигналів в ПЛК є функція фільтрації сигналів і даних. Теплоенергетичні ТОУ – «повільні» ТОУ, які самі є фільтрами низьких частот. Оптимальна фільтрація даних на теплоенергетичних

об'єктах в умовах значних промислових перешкод – актуальна технічна задача, що може бути ефективно вирішена. Дослідження ефективності зовнішньої і внутрішньої фільтрації в АСУ і її впливу на якість регулювання в САР і якість візуалізації для оператора – важлива задача моделювання фільтрації і аналізу практичної реалізації алгоритмів фільтрації в ПЛК.

2.4. Результати моделювання. Далі розглядаються питання класифікації похибок вимірювання, класифікації перешкод, функціонального моделювання фільтрації сигналів в САР і реалізації алгоритмів фільтрації в ПЛК. Моделі реалізовані в системі комп'ютерної математики (СКМ) MatLab Simulink.

Похибка вимірювання

Похибка вимірювання – це кількісне значення точності вимірювання. Це характеристика ступеня відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Для конкретних умов і цілей вимірювання існує свій раціональний рівень похибки, котрий недоцільно зменшувати через зростання складності відповідних вимірювань. Чим більше похибка вимірювання, тим менше точність; чим менша похибка, тим вища точність вимірювання. В лінійних системах всі похибки є адитивними, тобто додаються (з + або –) до істинного значення величини, тому вони однакові у всьому діапазоні вимірювання.

Похибки вимірювання залежать від перешкод процесу вимірювання. Похибку вимірювання класифікують за 1) джерелом походження перешкоди вимірювання і 2) способом походження перешкоди вимірювання. За джерелом походження перешкоди вирізняють внутрішню (інструментальну) і зовнішню (методичну) похибки вимірювання.

1. Внутрішня похибка вимірювання – це похибка самих компонентів ВК і залежить від типу і якості компонента (наприклад, давача). Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

2. Зовнішня похибка вимірювання – це результат впливу на компонент ВК зовнішніх перешкод і способу (методу) монтажу компонента (наприклад, давача). Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

За способом походження перешкоди вимірювання вирізняють постійну (систематичну) і стохастичну (випадкову) похибки вимірювання.

3. Постійна похибка вимірювання (ППВ) – це постійне відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

4. Стохастична похибка вимірювання (СПВ) – це випадкове відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини. Вона не залежить від величини самого істинного значення, тому вона однакова у всьому діапазоні вимірювання.

До визначення СПВ

З позицій теорії ймовірності і математичної статистики СПВ є результатом дії багатьох випадкових чинників. В цьому випадку розподілення значень вимірювання підкоряється нормальному закону розподілення Гауса. Тому результат випадкового розподілення значень вимірювання характеризується двома детермінованими показниками – математичним очікуванням і дисперсією. Математичне очікування – це середнє арифметичне всіх значень вимірювання в генеральній сукупності (велика кількість вимірювань). Це і є значення вимірної величини. Реальна сукупність вимірювань має кінцеву кількість вимірювань і називається вибіркою вимірювань. Середнє арифметичне вибірки відрізняється від математичного очікування і характеризується дисперсією. Дисперсія – це середнє значення квадратів відхилення результатів вимірювання від середнього арифметичного вимірювань, тобто від вимірною значення величини (примітка: квадрат відхилення береться тому, щоб відхилення з різними знаками не компенсували один одного). Корінь квадратний із дисперсії називається середньоквадратичним відхиленням (СКВ) або стандартним відхиленням. Достовірність вимірювання характеризується довірчим діапазоном вимірювання $ДДВ = 3 \times СКВ$. Саме в цей діапазон попадають 99,9% результатів вимірювання.

Для засобів вимірювання клас точності являє собою межу основної допустимої похибки вимірювання.

Термін «межа» має статистичний характер і вказує на те, що з ймовірністю 0,999 всі випадкові відхилення вимірюваної величини вкладаються в довірчий діапазон вимірювання ДДВ.

Термін «основна» вказує на те, що клас точності нормує похибку для нормальних умов експлуатації (тобто коли задовольняються вимоги до температури, вологості і тиску навколишнього середовища і вимоги до живлення приладів). Якщо вказані технічні

вимоги не виконуються, з'являється додаткова похибка і сумарна похибка перевищує клас точності приладу.

Похибка всього ВК (сумарна похибка ВК) дорівнює квадратичній сумі похибок окремих компонентів ВК. Нижче наведені формули для розрахунку відповідно відносної і абсолютної похибок ВК на основі похибок компонентів ВК (якщо діапазони вимірювання компонентів ВК однакові).

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad \Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}$$

Слід розрізняти похибку одноразового вимірювання і похибку багаторазового вимірювання. На практиці ці поняття часто не розрізняють, і говорять про похибки вимірювання, маючи на увазі саме похибки одноразового вимірювання. Різниця між цими поняттями принципова. Похибка одноразового вимірювання визначається класом точності приладу. Нижче наведені формули для розрахунку відповідно відносної і абсолютної похибок багаторазового вимірювання на основі похибка одноразового вимірювання і кількості (k) послідовних вимірювань (формула середньоквадратичного значення).

$$\frac{\varepsilon}{\sqrt{k}} \quad \frac{\Delta}{\sqrt{k}}$$

При багаторазовому вимірюванні навіть на низькоточному приладі можливо отримати високу точність вимірювання. Наприклад, для 100 вимірювань похибка вимірювання знижується квадратично, тобто в 10 разів. Так як в перехідному процесі в САР динамічне вимірювання є одноразовим, а статичне – багаторазовим, то клас точності ВК впливає на якість перехідного процесу (динамічні показники якості), але не впливає на точність стабілізації в кінці перехідного процесу (статичний показник якості) – ПІ-регулятор при будь-якій стохастичній похибці вимірювання забезпечує нульову статичну помилку регулювання.

До визначення похибки вимірювання компоненту ВК

Внутрішня ППВ компонента ВК виникає внаслідок несправності компоненту. Зовнішня ППВ виникає внаслідок неправильного монтажу і неправильної експлуатації компоненту ВК, електростатичного наведення і неправильного заземлення (виникає

додаткова різниця потенціалів, тобто напруга). Сумарну внутрішню і зовнішню ППВ об'єднують в єдину ППВ.

Кожний компонент ВК має внутрішню СПВ, яка характеризується класом точності компонента. Клас точності визначає значення ДДВ цього компоненту.

Наприклад, ВК виміряв значення температури 30 градусів. ДДВ, обчислений на основі класу точності ВК, є, наприклад, 5 градусів. Це означає, що вимірний параметр з ймовірністю 99,9% знаходиться в діапазоні 30 ± 5 градусів, тобто в діапазоні 25..35 градусів.

Зовнішня СПВ – це результат впливу на компонент ВК зовнішніх стохастичних перешкод внаслідок, в основному, електромагнітного наведення від силових кабелів і потужного електротехнічного обладнання (яке працює під великим струмом, так як «наводить струм, а не напруга»).

Пригнічення похибки (= пригнічення перешкоди = пригнічення впливу перешкоди) – зменшення похибки до прийняттого рівня, котрий недоцільно зменшувати через зростання складності засобів і алгоритмів пригнічення похибки.

Пригнічення ППВ полягає в усуненні джерела виникнення ППВ, тобто в ремонті компоненту ВК, правильному монтажі і правильній експлуатації компоненту ВК, ліквідації електростатичного наведення і правильного заземлення.

Радикальний спосіб пригнічення ППВ – коректування похибки адитивним зміщенням на величину похибки виміряного значення параметру або заданого значення виміряного регульованого параметру. Легше всього це зробити в ПЛК, можливо зробити в багатоканальному реєстраторі. Але це хибний шлях і виправданий тільки як тимчасовий засіб.

Внутрішня СПВ компоненту ВК не може бути пригнічена, вона може бути тільки врахована при визначенні ДДВ всього ВК. ДДВ ВК розраховується на основі паспортних ДДВ компонентів ВК.

Зовнішня СПВ компоненту ВК пригнічується фільтрацією вхідних (вимірних) сигналів. Використовуються фільтри низьких частот (ФНЧ), фільтри високих частот (ФВЧ) і фільтри смуги частот (ФСЧ).

На рис. 2.1 представлені функціональні моделі ФНЧ, ФВЧ і ФСЧ в СКМ Matlab Simulink.

Фільтри нижніх частот, верхніх частот, смуговий

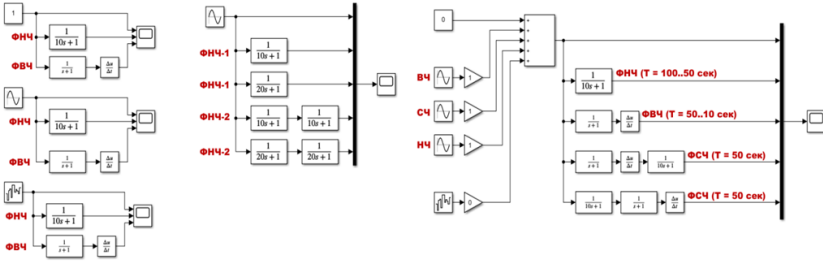


Рис. 2.1. Моделі ФНЧ, ФВЧ, ФСЧ в СКМ Matlab Simulink

ФНЧ пропускає з входу на вихід сигнали низьких частот, а пригнічує сигнали високих частот. Пригнічення високих частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. Приклади ФНЧ 1-го і 2-го порядків – аперіодичні ланки 1-го і 2-го порядків. Частота відфільтрованого і пригніченого сигналів визначається так званою частотою частотою зрізу. Частота зрізу – це частота, вище якої потужність вихідного сигналу (квадрат амплітуди) фільтра зменшується вдвічі від потужності в смузі пропускання (тобто, амплітуда вихідного сигналу зменшується до $\sim 70\%$ від вхідного сигналу).

ФВЧ пропускає з входу на вихід сигнали високих частот, а пригнічує сигнали низьких частот. Пригнічення низьких частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. Приклади ФВЧ 1-го і 2-го порядків – ланки реального диференціювання 1-го і 2-го порядків. Частота відфільтрованого і пригніченого сигналів визначається так званою частотою частотою зрізу. Частота зрізу – це частота, нижче якої потужність (квадрат амплітуди) вихідного сигналу фільтра зменшується вдвічі від потужності в смузі пропускання (тобто, амплітуда вихідного сигналу зменшується до $\sim 70\%$ від вхідного сигналу).

ФСЧ пропускає з входу на вихід сигнали смуги частот f_1 і f_2 , а пригнічує сигнали нижчих за f_1 частот і вищих за f_2 частот. Пригнічення низьких і високих частот полягає в зменшенні амплітуди вихідного сигналу, а частота вихідного сигналу зберігається. ФСЧ є послідовним з'єднанням: або ФНЧ (фільтрація нижчих за f_2 частот) і ФВЧ (фільтрація вищих за f_1 частот); або ФВЧ (фільтрація вищих за f_1 частот) і ФНЧ (фільтрація нижчих за f_2 частот). Частоти відфільтрованого і пригніченого сигналів

визначаються так званими частотами зрізу. Частоти зрізу – це дві частоти, нижче якої і вище якої потужність вихідного сигналу (квадрат амплітуди) фільтра зменшується вдвічі від потужності в смузі пропускання (тобто, амплітуда вихідного сигналу зменшується до $\sim 70\%$ від вхідного сигналу).

Вплив ППВ і СПВ на роботу САР

ППВ є найбільш небезпечною похибкою. ППВ можливо пригнітити 2-ма способами: 1) усунути джерело похибки; 2) відкоректувати значення задавача на величину похибки (наприклад, якщо справжня температура 30 градусів, а давач показує 25 градусів, то в САР потрібно задавати значення 25 градусів, «тримаючи в умі», що насправді це 30 градусів; так само з виведенням значення на ПП/РП – треба «тримати в умі», що насправді показуються не 25, а 30 градусів). Крім того, ППВ важко, а в багатьох випадках неможливо виявити.

Внутрішня СПВ компоненту ВК враховується при визначенні ДДВ всього ВК на основі класів точності компонентів ВК.

ППВ і СПВ по різному (навіть протилежно) впливають на якість регулювання, тобто на якість перехідних процесів в САР. ППВ не впливає на динаміку перехідного процесу і його динамічні показники, але впливає на статичну похибку регулювання (відхилення від завдання в сталому значенні регульованого параметру в кінці перехідного процесу). СПВ впливає на динаміку перехідного процесу і його динамічні показники, але не впливає на статичну похибку регулювання (відхилення від завдання в сталому значенні регульованого параметру в кінці перехідного процесу).

Зовнішня СПВ має бути пригнічена фільтрацією. Розрізняють зовнішню і внутрішню фільтрацію ВК. Зовнішня фільтрація – це використання зовнішніх до ВК і ПЛК фільтрів.

Зовнішня фільтрація

– Екранування компонентів ВК і ПЛК від електромагнітних наведень шляхом встановлення в спеціалізовані металеві шафи з їх заземленням. Це запобігає проникненню паразитних струмів в електричні кола компонентів ВК.

– Прокладання сигнальних кабелів окремо від силових кабелів, тобто в окремих кабельних каналах і в окремих металевих трубах. Це запобігає електромагнітному наведенню і, відповідно, проникненню паразитних струмів в електричні кола компонентів ВК.

– Використання скручених пар (біфілярні провідники – розташовані один біля одного провідники; біфілярна скручена або

вита пара – twisted pair – скручені навколо один одного два провідники) для: 1) зменшення площі електромагнітного наведення за рахунок біфілярності провідників і, відповідно, зменшення електромагнітного наведення паразитних струмів; 2) додаткової взаємної компенсації наведених паразитних струмів в плюсовому і мінусовому провідниках за рахунок взаємно-протилежних напрямів струмів в плюсовому і мінусовому провідниках внаслідок різнополярності плюсового і мінусового провідників.

– Заземлення екранів кабелів. Заземлення металевих труб, в яких прокладені сигнальні кабелі. Електромагнітно наведені паразитні струми «стікають в землю» і не проникають в електричні кола компонентів ВК.

Правильне заземлення – заземлення системи в одній точці; тобто точки заземлення всіх приладів повинні бути індивідуально підключені до єдиної спільної заземленої точки заземлення системи (бажано до металевого шасі шафи). Фізичне заземлення в одній фізичній точці заземлення запобігає виникненню паразитних струмів в провідниках між заземленими точками заземлення.

Внутрішня фільтрація – програмна фільтрація в ПЛК

Програмна фільтрація в ПЛК здійснюється або функціональними блоками (графічна мова ПЛК), або різницевиими рівняннями (текстова мова ПЛК) ФНЧ – аперіодичними ланками 1-го або 2-го порядків. ФВЧ і ФСЧ в ПЛК не використовуються, так як 1) корисний сигнал завжди низькочастотний (тобто він може пригнічуватись), 2) сам ОУ і сама САР є ФНЧ (тобто сам ОУ і сама САР пригнічує високочастотні перешкоди), 3) програмно ФВЧ і ФСЧ (відповідно програмний реальний диференціатор і програмна інтегро-диференціальна ланка) в ПЛК реалізується неефективно (неефективною є реалізація саме операції ідеального диференціювання).

Задача внутрішньої фільтрації сигналу в ПЛК – відфільтрувати корисний сигнал (значення регульованого параметру) і пригнітити перешкоду. Корисний сигнал завжди низькочастотний. Якщо сигнал перешкоди високочастотний, то треба використовувати ФНЧ, і це ефективно. Якщо сигнал перешкоди нижчої частоти, ніж корисний, то треба використовувати ФВЧ, що неефективно. Саме тому зовнішні фільтри не мають пропускати на вхід САР низькочастотну перешкоду, так як вона буде фактично однакової частоти з корисним сигналом (в цьому випадку САР буде реагувати на перешкоду як на корисний сигнал хибним регулюванням, що неприпустимо). Саме

тому зовнішні фільтри для САР мають бути ФВЧ, або, краще, ФСЧ (пригнічувати низькочастотну перешкоду; пропускати більш високочастотний корисний сигнал; пригнічувати ще більш високочастотну перешкоду). Це відрізняється від радіоприладів (смартфонів), де принципово використовуються внутрішні ФНЧ, які пригнічують високочастотну перешкоду (атмосферні електромагнітні наведення) і пропускають низькочастотний корисний сигнал (голосовий сигнал).

Слід розрізнити ВК з виходом на показуючий або реєструючий прилад (ВК-ПРП) і ВК з виходом на регулятор в ПЛК (ВК-РЕГ).

Для ВК-ПРП внутрішня програмна фільтрація засобами ФНЧ є ефективною, так як відфільтрований сигнал без високочастотних перешкод краще візуалізується. Для ВК-РЕГ внутрішня програмна фільтрація засобами ФНЧ є неефективною, так як це означає введення в зворотний зв'язок додаткової аперіодичної ланки 1-го порядку, тобто послідовне підключення до ОУ додаткової аперіодичної ланки 1-го порядку (тобто ускладнення ОУ – він стає більш інерційним – і погіршення якості регулювання). Сам ОУ і сама САР вже є ФНЧ.

Висновок. Фільтрацію засобами ФНЧ в ПЛК використовувати тільки для ВК з виходом на показуючий або реєструючий прилад, але не використовувати для фільтрації в замкненому контурі регулювання.

Загальні висновки щодо фільтрації

Нижче викладені результати функціонального моделювання фільтрації в САР режимного параметру.

На рис. 2.2 представлена функціональна модель фільтрації виміряного сигналу в ПЛК в СКМ Matlab Sumulink. Моделювались зовнішні і внутрішні фільтри як ФНЧ і як ФВЧ.

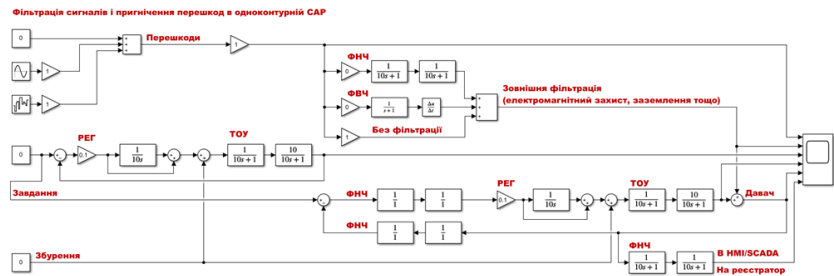


Рис. 2.2. Моделювання фільтрації в САР режмного параметру в СКМ Matlab Simulink

Моделювання зовнішньої і внутрішньої фільтрації в типовій теплоенергетичній САР дало наступні результати (типовість промислової САР як теплоенергетичної визначена «повільними» параметрами об'єкту управління і «повільними» параметрами ПІ-регулятора).

Зовнішня фільтрація є більш ефективною, ніж внутрішня, хоча і набагато дорожчою. Треба використовувати дорогі зовнішні фільтри у вигляді електромагнітних екранів, дорогих скручених пар, сучасної кабельної системи, сучасної системи заземлення. Ці фільтри є фільтрами низьких частот (ФНЧ), тобто зовнішня фільтрація (фільтрація екрануванням і заземленням) є низькочастотною фільтрацією.

Треба розрізняти, для чого використовується відфільтрований сигнал – для регулювання чи виключно для інформації (візуалізації, алармування, архівації). Задачею класичної зовнішньої фільтрації є пригнічення високочастотних перешкод і пропускання низькочастотних сигналів, які вважаються корисними, тобто робочими; це ФНЧ. Але для промислових ТОУ цього недостатньо, так як не всі низькочастотні сигнали є корисними, а можуть бути низькочастотними перешкодами; САР такі перешкоди не відрізняє від низькочастотних коливань регульованих параметрів і реагує хибним регулюванням; крім того, сама САР є ФНЧ, тобто практично не реагує на високочастотні перешкоди. Введення додаткових внутрішніх ФНЧ в замкнений контур регулювання погіршує якість регулювання. Таким чином, з позицій регулювання як зовнішня, так і внутрішня низькочастотна фільтрація (ФНЧ) є неефективною. Навпаки, ефективною є високочастотна (краще смугова) фільтрація перешкод; але: 1) високочастотна фільтрація (ФВЧ) і смугова фільтрація (ФСЧ) практично не можуть бути реалізовані, як зовнішньо (екрануванням), так і внутрішньо (програмно); всі фільтри, які практично можливо реалізувати, є ФНЧ; 2) високочастотна фільтрація перешкод може пригнічувати корисний низькочастотний сигнал (а не тільки шкідливу низькочастотну перешкоду).

Зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація (ФНЧ) є ефективною саме для інформаційних задач (систем), де немає замкнених контурів регулювання. Ефективна зовнішня фільтрація реалізується ефективним екрануванням. Ефективна внутрішня фільтрація реалізується програмно розробленими ФНЧ; переважно достатньо аперіодичної ланки 1-го порядку, інколи 2-го порядку. Для промислових інформаційних систем високочастотна і смугова

фільтрації (ФВЧ і ФСЧ) не мають сенсу; високочастотна фільтрація (ФВЧ) зрідка має сенс тільки для швидкісних технологічних процесів, наприклад, для зварювання (необхідно відфільтрувати корисні високочастотні сигнали і пригнітити низькочастотну перешкоду, як правило, за живленням, тобто частотою змінного струму 50 Гц). В загальному випадку, найбільш шкідливими для інформаційних систем є саме відносно низькочастотні перешкоди частотою 50 Гц, продуковані електромагніним наведенням. Задача зовнішньої і внутрішньої фільтрації для інформаційних систем – пригнітити перешкоду 50 Гц і відфільтрувати (пропустити на вихід) корисний низькочастотний сигнал (частотою, меншою за 50 Гц).

Так як АСУ є як автоматичною, так і інформаційною системою (включає в себе як ІВС в складі САР, так і автономні ІВС), то зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація є необхідною для АСУ (саме для автономних ІВС, які є невід'ємною частиною АСУ; автономні інформаційні функції є такі ж важливі, як і функції регулювання).

Таким чином, фінансові вкладення в коштовну зовнішню фільтрацію є ефективними і рекомендованими, так як зменшать загальну вартість володіння (ТСО – total cost of ownership) АСУТП за період життєвого циклу ТОУ.

2.5. Висновки і рекомендації. 1. Зовнішня низькочастотна фільтрація (апаратно реалізоване екранування від електромагнітних наведень) програмно-технічних засобів САР є неефективною, так як вона пропускає на вхід регулятора низькочастотну перешкоду, яку регулятор не може відрізнити від низькочастотного виміряного регульованого параметру, сприймає як зміну регульованого параметру і відповідно реалізує регульовальну дію, яка, в даному випадку, є зайвою і помилковою. Екранування має сенс виключно як засіб запобігання електромагнітних уражень апаратури САР. 2. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК (програмно реалізованого ФНЧ в ПЛК) в замкненому контурі регулювання є неефективним, так як фактично вносить додаткову інерційність в контур регулювання. Так як ОУ сам ФНЧ, то високочастотні перешкоди практично не впливають на якість регулювання в САР. 3. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК є ефективним для фільтрації сигналу, який передається для візуалізації на реєструючий прилад або в НМІ/SCADA-систему. 4. Як внутрішній програмний ФВЧ в ПЛК, так і зовнішня апаратна високочастотна фільтрація не може бути реалізована, так як ФВЧ повинен мати в своєму складі

ланку реального диференціювання, що практично неможливо реалізувати як апаратно, так і програмно.

3. Функціональне імітаційне моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла⁵.

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

Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – це технологічний об'єкт управління (ТОУ), оснащений автоматизованою системою управління технологічними процесами (АСУТП). ТОУ є сукупністю окремих об'єктів управління (ОУ) – каналів передачі дії «регулюючий орган – регульований режимний параметр». АТК є сукупністю САР. Кожна САР – це ОУ, який оснащений автоматичною системою регулювання (АСР). АСР в лінійній САР переважно реалізуються ПІД-регуляторами (практично, завжди ПІ-регуляторами, так як Д-частина тільки «підкреслює» стохастичні перешкоди і не покращує якість регулювання).

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

Функціональне моделювання АТК – перший крок до імітаційного моделювання динамічних систем з використанням промислового програмного забезпечення.

3.2. Аналіз проблеми. Моделі САР в АТК повинні бути виключно лінійними, що забезпечує реалізацію принципу суперпозиції, який гарантує відтворення результатів моделювання як при самому

⁵ Розділ базується на практичних розробках автора з співавторами Батюк С.Г., Лобзов Н.С. Функціональне моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2021. Том 32 (71). № 5. С. 65-73.

моделюванні, так і в промислових умовах функціонування (тобто незалежність реакції замкненої САР на збурення від амплітуди збурення). Використання нелінійних елементів категорично забороняється. Вимушені виключення: моделювання нелінійності регулюючого органу (якщо використаний регулюючий орган є нелінійним) з метою визначення лінійної ділянки витратної характеристики регулюючого органу; реалізація релейного двопозиційного регулювання (яке вводить САР в режим автоколиваний, які є сталим режимом роботи нелінійної САР). Головна відмінність функціонального моделювання АТК від функціонального моделювання автономних САР – саме моделювання динамічної взаємодії всіх САР в складі АТК за типовими збуреннями (які самі також моделюються). В моделі АТК моделюються типові збурення і досліджується функціонування комплексу САР в складі АТК у взаємодії їх реакцій на змодельовані збурення.

3.3. Постановка завдання. Модель АТК барабанового котла розроблюється 1) з навчальною метою для використання в лабораторних роботах з автоматизації і 2) з метою використання під час проектування і експлуатації для налагодження САР котла. Енергетичний барабановий котел – типовий об’єкт промислової автоматизації (в енергетиці). В той же час, потужний паровий барабановий котел має специфічний унікальний ефект «набрякання рівня», необхідність врахування якого призводить до використання унікальної одноконтурної САР рівня з триімпульсним регулятором. Саме вказане поєднання типовості і унікальності барабанового котла як ТОУ робить моделювання АТК енергетичного барабанового котла актуальною (цікавою і корисною) задачею як для начального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК в процесі проектування і експлуатації.

САР барабанового котла – невід’ємна САР в складі АСУТП енергоблоків теплових електростанцій. Модель АТК барабанового котла проектується в середовищі Matlab Simulink. ОУ представляє собою чотири аперіодичні ланки першого порядку, з’єднаних послідовно. При моделюванні слід передбачити контроль основних параметрів барабанового котла, найбільш вагомим параметром є рівень в барабані. В 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. 3.1 наведена схема структурна системи автоматичного управління (САУ) енергоблоком.

САУ енергоблоком включає САР електричної потужності електрогенератору, САР теплового навантаження котла і САР живлення водою котла. Всі 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 і потрібного тепла (підведеної і 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. 3.1: 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 ($f^*=50\text{Гц}$). ГДЦ – головний диспетчерський центр енергосистеми. РПБ – регулятор електричної потужності енергоблоку. КБ – командний блок для формування заданих потужностей.

Примітка. САУ енергоблоку включає також САР економічності згоряння палива. САР підтримує співвідношення паливо/повітря на рівні, що забезпечує повне згоряння палива в топці котла, відповідно, виділення в топці всього тепла відповідно до теплотворної здатності палива. В статті ця САР не розглядається.

Всі 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 трімппульсною САР рівня в барабані котла (індикатор балансу/небалансу – рівень води в барабані котла).

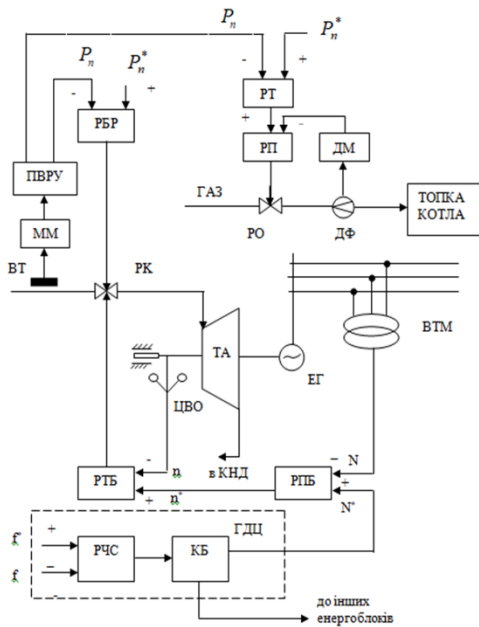


Рис. 3.1. Схема структурна САУ енергоблоком

Частота змінного струму 50 Гц в енергосистемі є сталою, якщо енергосистема виробляє стільки струму, тобто потужності (при заданій ерс 220/380 В), скільки потрібно користувачам. При, наприклад, підключенні додаткових користувачів, тобто при збільшенні навантаження енергосистеми, струм в енергосистемі збільшується, але не достатньо, тобто його не вистачає всім користувачам; напруга ж зменшується. В той же час вказане 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 з ротором електрогенератора, також обертається повільніше. В результаті відцентровий регулятор РТБ частоти обертів вала турбіни привідкриває клапан РК паропроводу на турбіну, тим самим збільшуючи витрату пари на турбіну, і ротор турбіни і 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 в

ГДЦ і станційний РПБ). В результаті енергосистема виробляє більше струму і 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, в топку потрібно подати більше палива.

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

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

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

На рис. 3.2 наведена схема структурна триімпульсної САР рівня в барабані парового котла.

Абревіатури рис. 3.2: Н* – заданий рівень (уставка рівня) і поточний рівень. РРВ – регулятор рівня. ВР – відбір рівня. РМ – рівнемір. ДФ – діафрагма. ДМ – дифманометр. Дзв – витрата живильної води. Дшп – витрата перегрітої пари. РО – регулюючий орган.

Рівень пароводяної суміші в барабані вимірюється рівнеміром. Так як пароводяна суміш вже є неньютоновою рідиною (змінює об'єм від тиску), то має місце так зване «набрякання рівня»: при зменшенні 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 і її рівень падає). При збільшенні тиску в барабані має місце протилежне хибне спрацювання –

рівнемір дає зменшення рівня, хоча насправді рівень води збільшується.

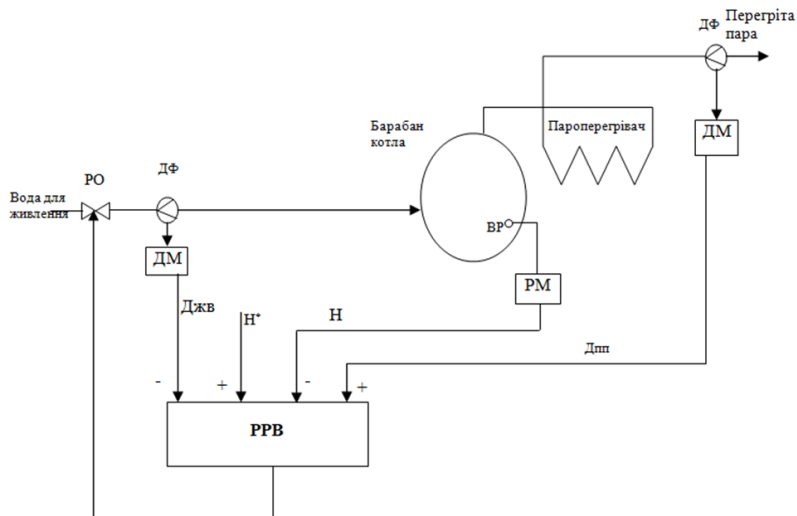


Рис. 3.2. Схема структурна триімпульсної САР рівня в барабані парового котла

Хибне протилежне спрацювання рівнеміра перетворює зворотний зв'язок за рівнем в САР рівня з від'ємного на додатний, в результаті чого перехідний процес розходиться і має місце 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 витрати живильної води в барабан (котел) і витрата пари з котла (на турбіну), причому з протилежними знаками. В результаті додатний імпульс витрати пари в перший момент забезпечує спрацювання РРВ в правильному напрямку, а далі (коли РРВ змінює витрату води в правильному напрямку) врівноважується від'ємним імпульсом витрати живильної води (спочатку завжди $D_{пп} > D_{жв}$ або $D_{пп} < D_{жв}$ а потім завжди $D_{жв} = D_{пп}$).

В кінці перехідного процесу завжди має місце нульова статична похибка, так як з часом завжди $D_{жв} = D_{пп}$, в результаті в кінці перехідного процесу $H = H^*$.

3.4. Результати моделювання. На рис. 3.3 наведена модель АТК барабанного котла (параметри приближені до реальних), верхня САР – каскадна САР теплового навантаження котла, нижня САР – одноконтурна САР рівня в барабані котла.

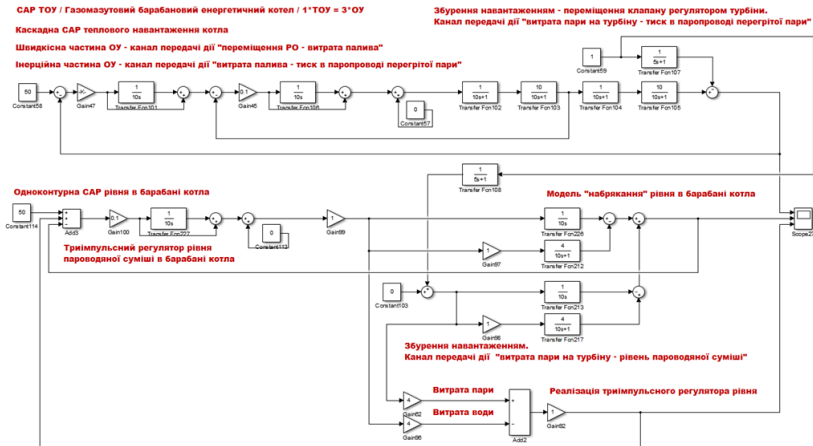


Рис. 3.3. Модель АТК барабанного котла в Matlab Simulink

На рис. 3.4 наведена модель каскадної САР теплового навантаження котла. Для каскадної САР випереджаючий та інерційний об'єкти змодельовані послідовним з'єднанням двох аперіодичних ланок кожний. Основне збурення – збурення за навантаженням – збурення зміною витрати пари на турбіну (переміщення регулюючого клапану турбіни).



Рис. 3.4. Модель каскадної САР теплового навантаження барабанного котла в Matlab Simulink

На рис. 3.5 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.

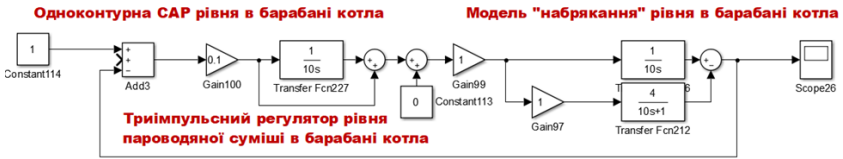


Рис. 3.5. Модель САР рівня в барабані котла в Matlab Simulink

Відхилення рівня за допустимі межі призводить до аварійних режимів роботи котла: при занадто низькому рівні порушується режим циркуляції води в випарній системі і можливий перепад деяких підйомних труб, а при «переживленні» котлів (надмірне підвищення рівня) можливий закид води в пароперегрівач, що може вивести його з ладу. Тому до точності підтримки рівня висуваються жорсткі вимоги.

На рис. 3.6 наведена перехідна характеристика моделі ОУ теплового навантаження за одиничним ступінчастим збуренням завданням.

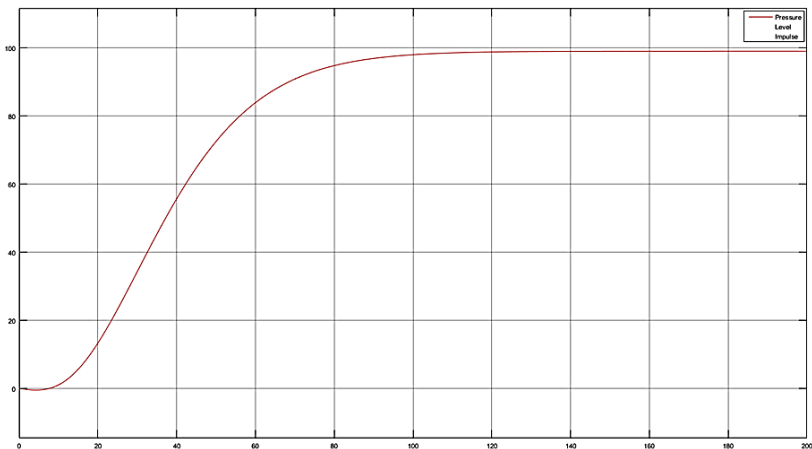


Рис. 3.6. Перехідна характеристика моделі ОУ теплового навантаження

На рис. 3.7 наведено перехідну характеристику моделі каскадної САР теплового навантаження.

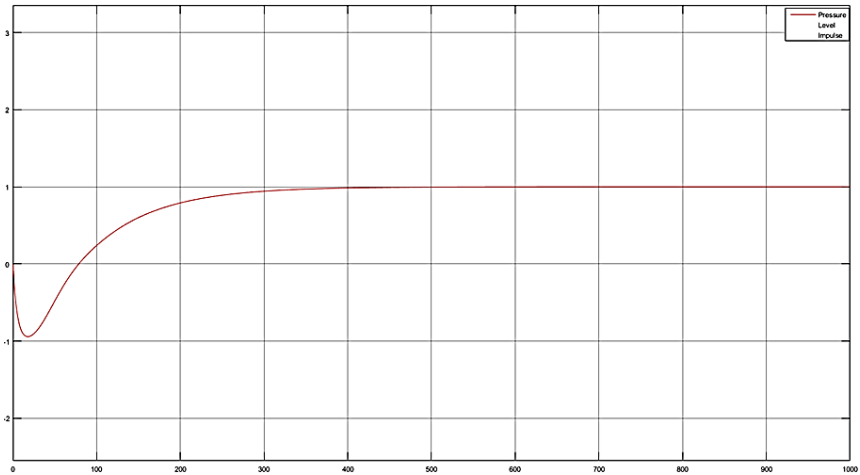


Рис. 3.7. Перехідна характеристика моделі каскадної САР теплового навантаження

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

Модель набрякання рівня в барабані наведена на рис. 3.8. Набрякання рівня змодельовано зустрічним включенням аперіодичної ланки першого порядку та інтегруючої ланки (а не послідовним включенням ланки транспортного запізнення і та інтегруючої ланки).

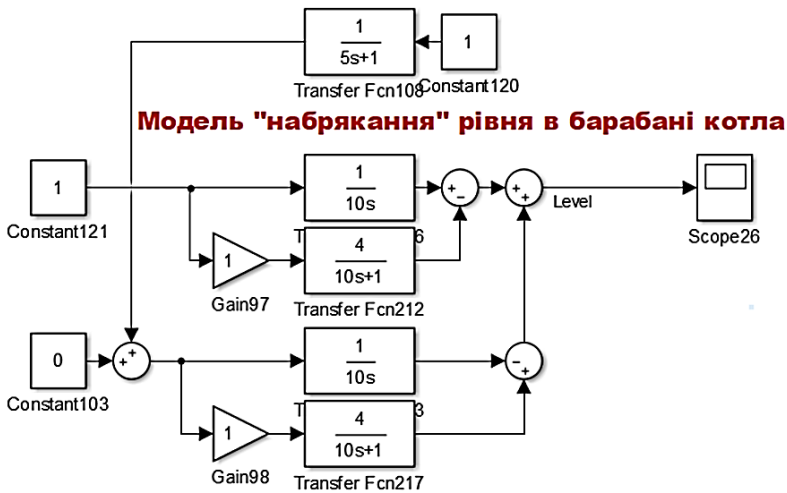


Рис. 3.8. Модель набрякання рівня в Matlab Simulink

Через явище набрякання одноімпульсний (імпульс за вимірним значенням рівня) регулятор не може стабілізувати рівень води в барабані і перехідний процес розходиться. Перехідна характеристика наведена на рис. 3.9.

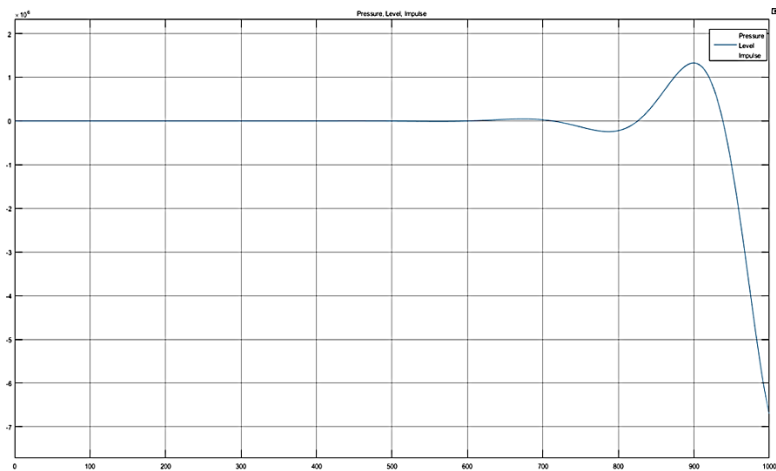


Рис. 3.9. Графік перехідного процесу одноконтурної САР рівня в барабані котла в Matlab Simulink

Для запобігання розходження процесу до регулятору додають ще два імпульси і система стає триімпульсною. Триімпульсна САР рівня в барабані котла: регулятор отримує імпульс по витраті пари від котла, за рівнем води в барабані і по надходженню 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 в барабані котла, витраті живильної води на котел і витраті пари від котла. Сигнали за витратою живильної води і витратою пари повинні компенсувати один одного, тому включені з різними знаками. При збільшенні витрати пари регулятор виробляє сигнал на збільшення витрати живильної води і навпаки. Сигнал по рівню в барабані котла є коригуючим. Він повинен компенсувати різницю між витратою пари і живильної води. Реалізацію триімпульсного регулятора наведено на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Реалізація триімпульсного регулятора в Matlab Simulink

Перехідний процес регулювання рівня в барабані з триімпульсним регулятором наведений на рис. 3.11.

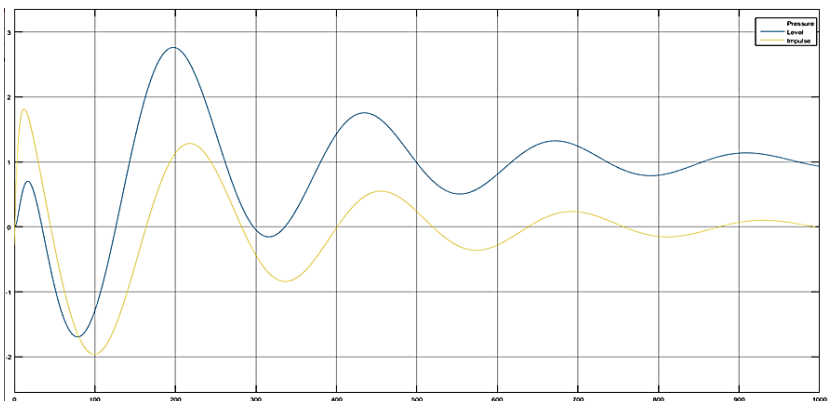


Рис. 3.11. Перехідний процес рівня в барабані з триімпульсним регулятором

3.5. Висновки і рекомендації. 1. Функціональне моделювання АТК дозволяє змодельовати динамічну взаємодію всіх САР в складі АТК за типовими збуреннями (які самі також моделюються). В моделі АТК моделюються типові збурення і досліджується функціонування комплексу САР в складі АТК у взаємодії їх реакцій на змодельовані збурення. Саме можливість такого моделювання взаємодії комплексу САР в складі АТК є перевагою над функціональним моделюванням автономних САР. 2. Ефективним інструментарієм функціонального моделювання АТК є CFC-діаграма (функціональні блок-схеми) в пакеті графічного моделювання Simulink в СКМ Matlab. 3. Функціональна модель АТК барабанового котла в СКМ Matlab Simulink рекомендується для використання як з навчальною метою в лабораторних роботах з автоматизації, так і на стадіях проектування і експлуатації для налагодження САР котла. Змодельовані найважливіші САР – каскадна САР теплового навантаження котла і 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 врахування якого призводить до використання унікальної одноконтурної САР рівня з триімпульсним регулятором. Саме вказане поєднання типовості і унікальності барабанового котла як ТОУ робить моделювання АТК енергетичного барабанового котла

актуальною (цікавою і корисною) задачею як для начального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК в процесі проєктування і 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, в CoDeSys) – промислова SCADA-система (реалізація супервізорної функціональності, наприклад, в Indusoft WebStudio)».

4. Структурне імітаційне моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла⁶

4.1. Постановка проблеми. Структурне моделювання динамічної системи – моделювання статичної і динамічної взаємодії структурно виокремлених компонентів системи. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – технологічний об’єкт управління (ТОУ), оснащений автоматизованою системою управління технологічними процесами (АСУ ТП). Структурне моделювання автоматизованого технологічного комплексу (АТК) – моделювання взаємодії програмно змодельованого технологічного об’єкту управління (ТОУ) і програмно-технічного комплексу (ПТК) автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), якою оснащений ТОУ. Так як використовується не сам ТОУ і не його фізична модель, а саме програмна модель (імітація, симуляція) ТОУ, то таке структурне моделювання називається імітаційним моделюванням (симуляцією) АТК, а структурна модель АТК – імітаційною моделлю АТК (обидві абрєвіатури ІМ АТК в контексті). Контролерна функціональність АСУ/ПТК в ІМ АТК реалізується софтверним програмованим логічним контролером (софтПЛК). Супервізорна функціональність АСУ/ПТК в ІМ АТК реалізується промисловою SCADA-системою. ТОУ в ІМ АТК моделюється функціональними блок-схемами в системі комп’ютерної математики (СКМ).

⁶ Розділ базується на практичних розробках автора з співавторами Батюк С.Г., Лобзов Н.С. Структурне (імітаційне) моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2021. Том 32 (71). № 5. С. 74-82.

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

4.2. Аналіз проблеми. ІМ АТК є різновидом сучасних цифрового твінінгу і цифрових двійників. Відповідно, програмно-технічна платформа сучасної ІМ АТК наступна. Контролерна функціональність АСУ/ПТК в ІМ АТК реалізується (моделюється) софтПЛК CoDeSys. Супервізорна функціональність АСУ/ПТК реалізується SCADA-системою (використовується система людинно-машинного інтерфейсу Indusoft WebStudio). ТОУ моделюється функціональними блок-схемами в системі комп'ютерної математики Matlab (пакет Simulink). Функціональні блок-схеми реалізовані графічною мовою CFC (Continuous Functional Chart – неперервна функціональна діаграма), тобто функціональна блок-схема є CFC-діаграмою.

4.3. Постановка завдання. ІМ АТК енергетичного барабанового котла розроблюється: 1) з навчальною метою для використання в лабораторних роботах з автоматизації; 2) з метою використання під час проектування і експлуатації для налагодження САР котла; 3) з метою використання під час проектування і експлуатації для налагодження взаємодії ПЛК і SCADA-системи. Енергетичний барабановий котел – типовий об'єкт промислової автоматизації (в енергетиці), що робить ІМ АТК енергетичного барабанового котла актуальною (цікавою і корисною) задачею як для начального процесу з автоматизації, так і для налагодження АТК в процесі проектування і експлуатації.

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

Ключовою технічною задачею ІМ АТК є реалізація обміну даними між софтПЛК CoDeSys і функціональною моделлю АТК барабанового котла в СКМ Matlab Simulink. Обмін даними реалізується за OPC-протоколом шиною Ethernet. Модель ТОУ в СКМ Matlab Simulink є OPC-клієнтом. СофтПЛК CoDeSys є OPC-сервером. Розроблені вікна WebStudio мають реалізувати типову

HMI-Standard і MES-Lite функціональність сучасних SCADA-систем з урахуванням вимог до навчання студентів і використання в лабораторних роботах.

4.4. Результати моделювання. На рис. 4.1 наведена модель ТОУ барабанового котла, верхній контур – контур регулювання (САР) теплового навантаження котла, а нижній – контур регулювання (САР) рівня в барабані.

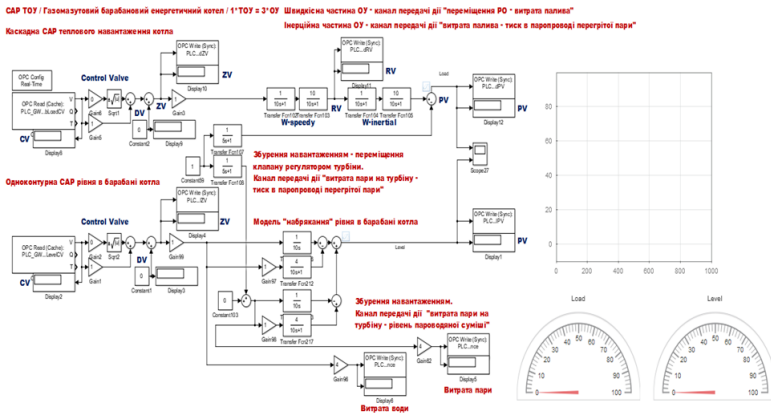


Рис. 4.1. Модель ТОУ барабанового котла в MatLabSimulink

ТОУ складається з чотирьох взаємопов'язаних об'єктів управління (ОУ): 1) канал передачі дії «переміщення РО на витраті палива – тиск в 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 в трубопроводі турбіни»; 3) канал передачі дії «витрата пари на турбіну – рівень пароводяної суміші в барабані котла»; 4) канал передачі дії «витрата живильної води – рівень пароводяної суміші в барабані котла». Параметри ОУ вибрані зручні 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 числа обертів турбіни: канал передачі дії «переміщення

ПК турбіни – витрата пари на турбіну». Змодельована взаємодія всіх вказаних ОУ (каналів передачі дії) в ТОУ енергетичного барабанового котла.

Блок OPC Config використовується для конфігурації підключення до OPC серверу. За допомогою блоків OPC Read з серверу зчитуються дані які передає контролер з 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 барабанового котла і САР рівня в 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) реалізована в середовищі CodeSys у вигляді універсальної каскадної АСР, яка може перемикатись в режими одноконтурного або каскадного регулювання.

CFC-діаграма АСР теплового навантаження наведена на рис. 4.2. Коригуючий регулятор PID_1 тиску пари в паропроводі змінює завдання стабілізуючому регулятору PID_2 витрати палива в топку котла. Фільтри низької частоти (аперіодичні ланки першого порядку) UDO_Std_1, 2, 3 призначені відповідно для первинної фільтрації сигналів вимірних параметрів на коригуючий регулятор, стабілізуючий регулятор і в SCADA-систему. Інші функціональні блоки слугують для перемикання САР теплового навантаження в режими одноконтурного або каскадного регулювання.

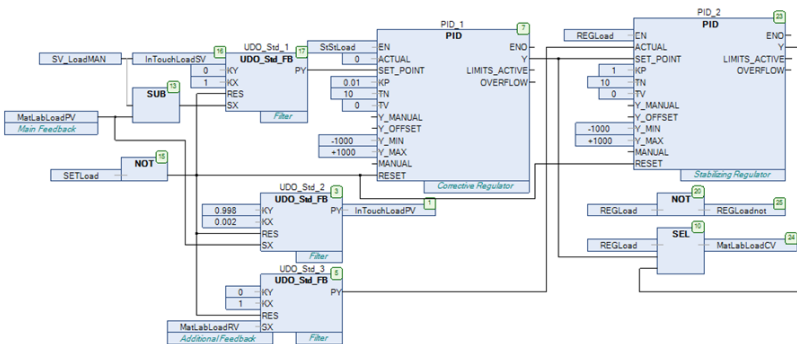


Рис. 4.2. Реалізація каскадної АСР для САР теплового навантаження барабанового котла в середовищі CodeSys

CFC-діаграма АСР рівня в барабані котла наведена на рис. 4.3. АСР працює в одноконтурному режимі – задіяний тільки основний (коригуючий) регулятор PID_1 рівня. Фільтри низької частоти (апериодичні ланки першого порядку) UDO_Std_1, 3 призначені відповідно для первинної фільтрації сигналів вимірних параметрів на основний (коригуючий) регулятор і в SCADA-систему. На трьох блоках SUB реалізована трійімпульсність регулятора рівня: на регулятор рівня подаються два додаткові імпульси (перший імпульс – поточний рівень; уставка імпульсом не вважається): вимірні витрата живильної води в барабан (котел) і витрата пари з котла (на турбіну), причому з протилежними знаками. В результаті додатній імпульс витрати пари в перший момент забезпечує спрацювання регулятора рівня в правильному напрямку, а далі (коли регулятор рівня змінює витрату води вже в правильному напрямку) врівноважується від’ємним імпульсом витрати живильної води (спочатку завжди витрата пари більша за витрату живильної води, а потім ці витрати завжди однакові). Інші функціональні блоки слугують для перемикання САР теплового навантаження в режимі одноконтурного або каскадного регулювання.

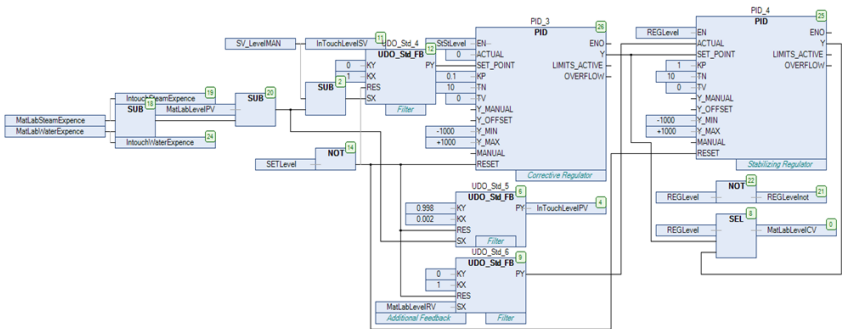


Рис. 4.3 Реалізація АСР для САР рівня в барабані котла в середовищі CodeSys

Користувач взаємодіє з програмно-технічним симулятором АТК 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 барабанового котла.

- «Alarms» – алармування і логування історичних тривог.
- «Trends» – тренди технологічних параметрів для спостерегання за процесом.
- «Models Heat Load» – мнемосхема моделі САР теплового навантаження барабанового 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 та редагування поточних звітів, реалізація історичних звітів.

Розроблені вікна дозволяють користувачу спостерігати за процесами, регулювати та контролювати роботу імітаційної моделі барабанового котла, слідкувати за поточними параметрами, переглядати усі зареєстровані системою тривоги та відображати тренди, створювати свої рецепти роботи системи та в подальшому використовувати їх для роботи системи, створювати, формувати та редагувати звіти.

Розроблена в імітаційній моделі АТК барабанового котла НМІ-Standard і MES-Lite функціональність SCADA є типовою для сучасних АСУТП і демонструє всі можливості роботи оператора-технолога з сучасними ТОУ. Взаємодія оператора-технолога з вікнами відбувається за допомогою різноманітних елементів візуалізації.

Нижче характеризується функціональність вікон SCADA WebStudio.

– «Menus» – стартове вікно-меню, яке дає можливість переходити на інші вікна. Для переходу до іншого вікна необхідно обрати бажане вікно і натиснути на нього. Вікно «Menus» завжди відкрите і не перекривається іншими вікнами, що дає можливість зручно перемикатися між ними.

– «Mimics» (рис. 4.4) – вікно із спрощеною мнемосхемою газомазутового барабанового котла, в якому користувач може переглядати основні покази давачів, а також побачити поточні положення регулюючих органів.

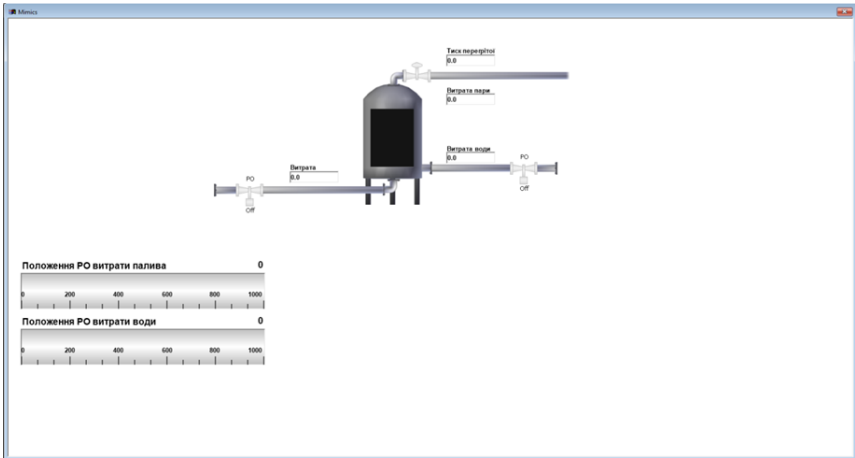


Рис. 4.4. Вікно «Mimics»

– «Alarms» (рис. 4.5) – вікно для відображення аварій (алармів; тривоги) поточних та історичних, які мали місце у системі, з журналом подій, у якому відображені події (дії оператора), які мали місце в роботі системи. На вікні розміщена група слайдерів, текстових полей, клавіш і віджетів для імітації алармів аналогових і дискретних сигналів (з метою перевірки роботоздатності послідовності «модель TOU в СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – SCADA WebStudio»).

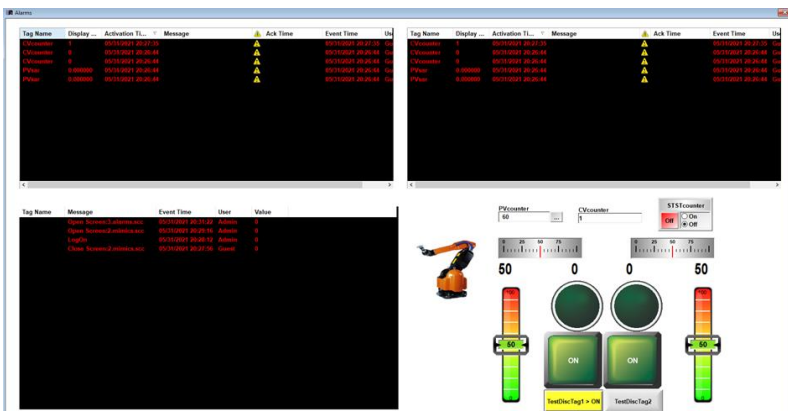


Рис. 4.5. Вікно «Alarms»

– «Trends» (рис. 4.6) – вікно тредів реального часу та історичних, на якому користувач має можливість переглянути зміну з часом технологічних параметрів. Функціональність тренду дозволяє досліджувати необхідний проміжок часу більш детально. На вікні розміщена група слайдерів, текстових полей, клавіш і віджетів для імітації зміни аналогових і дискретних сигналів (з метою перевірки роботоздатності послідовності «модель TOY в СКМ Matlab Simulink – софтПІЛК CoDeSys – SCADA WebStudio»).

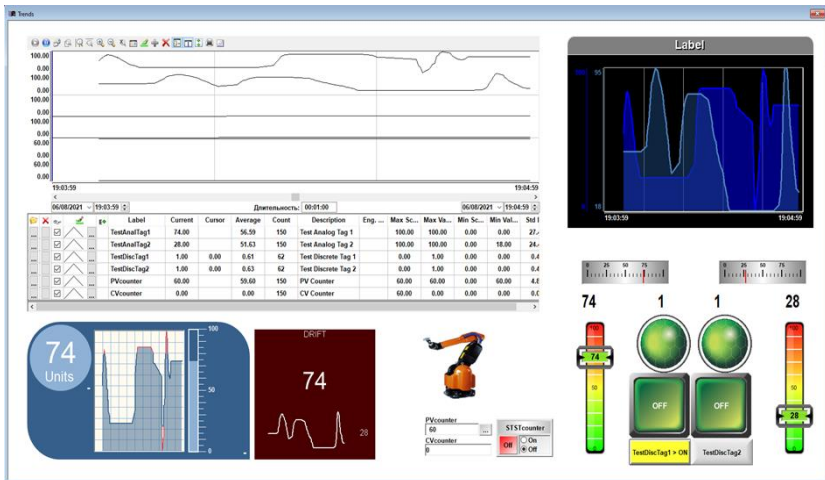


Рис. 4.6. Вікно «Trends»

– «Models Heat Load» (рис. 4.7) – вікно, на якому відображена структурна схема моделі САР теплового навантаження барабанового 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 та відслідкувати на тренді зміну у часі технологічних параметрів. Користувач перевіряє роботоздатність САР теплового навантаження барабанового котла.

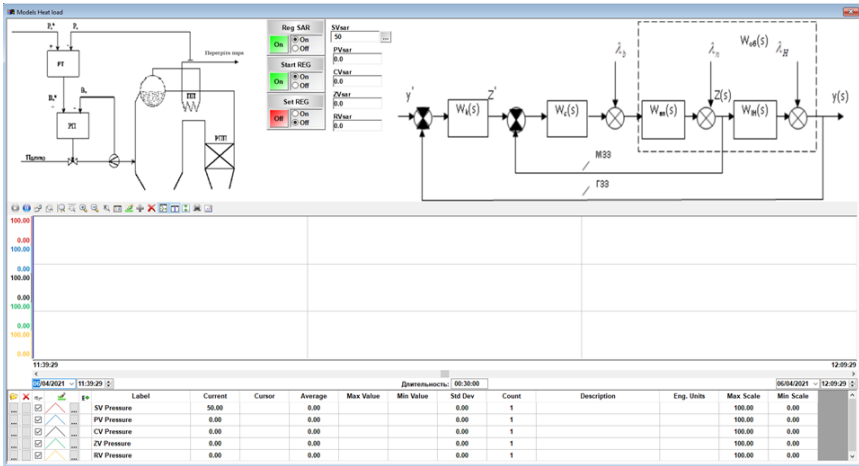


Рис. 4.7. Вікно «Models Heat Load»

– «Models Level» (рис. 4.8) – вікно, на якому відображена структурна схема моделі САР рівня в барабані котла. У вікні також відображається типова структурна схема одноконтурної САР. У даному вікні користувач може задавати бажане значення (уставку) для регульованого параметру, вмикати або вимикати регулятор та відслідкувати на тренді зміну у часі технологічних параметрів. Користувач перевіряє роботоздатність САР рівня в барабані котла.

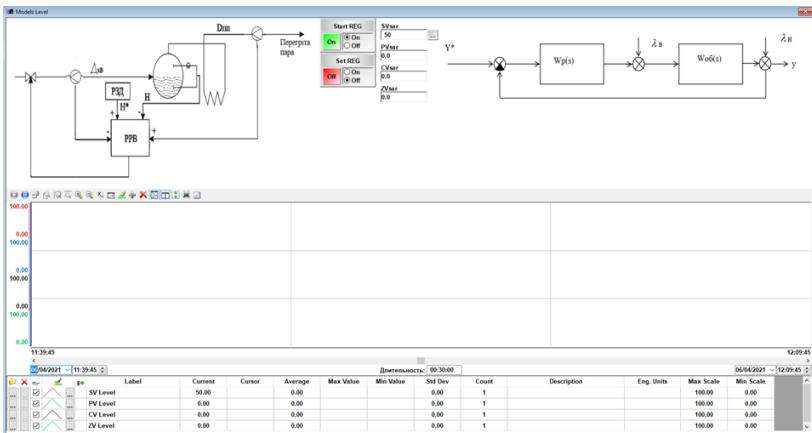


Рис. 4.8. Вікно «Models Level»

– «Recipes» (рис. 4.9) – вікно для створення рецептів. З позицій управління, рецепт – це формула автоматичного управління ОУ, тобто комплекс уставок (заданих значень) режимних параметрів САР, на яких САР стабілізують режимні параметри. З 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 рецепт. Формування рецепту – введення уставок і запис їх в заданий текстовий файл. Виконання рецепту – зчитування файлу рецепту, парсинг файлу і запис уставок у внутрішні параметри SCADA-системи. Формування і виконання рецептів реалізується скриптами SCADA-системи. Зконфігурований обмін даними SCADA-системи з софтПЛК забезпечує передачу в софтПЛК зчитаних SCADA-системою з файлів-рецептів уставок режимних параметрів САР.

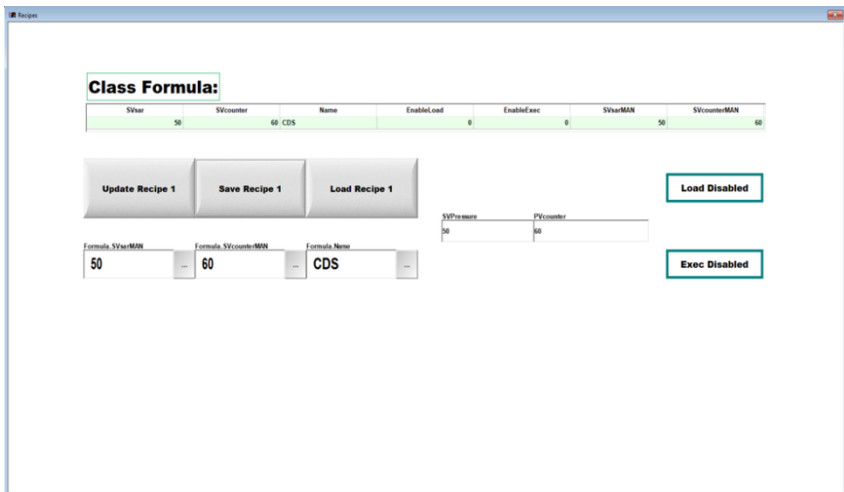


Рис. 4.9. Вікно «Recipes»

– «Schedules» (рис. 4.10) – вікно для реалізації розкладів автоматичного завантаження рецептів та 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 з заданою періодичністю і розклад дописування поточного звіту з заданою періодичністю. Розклади реалізуються скриптами SCADA-

системи. У вікні в текстові поля виведені значення трьох розрахованих найвіжливіших 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). Вказані КПЕ розраховуються скриптами SCADA-системи. Примітка. Порядок формування і розрахунку вказаних КПЕ в статті не розглядається.

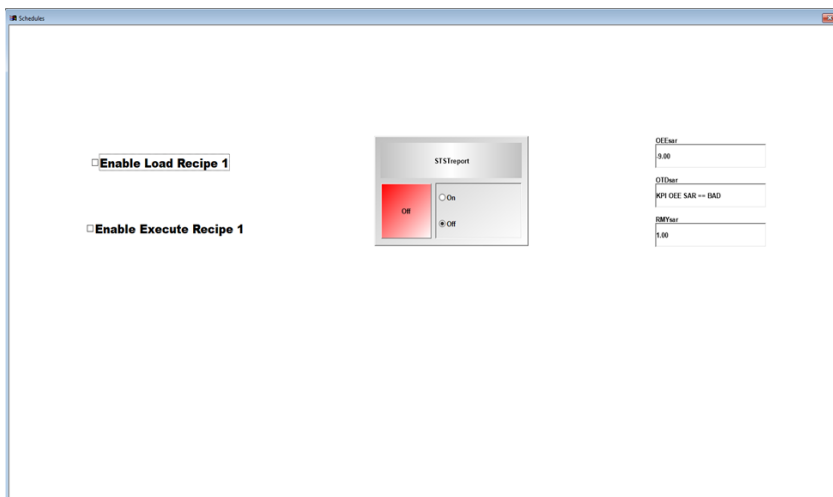


Рис. 4.10. Вікно «Schedules»

– «Reports» (рис. 4.11) – вікно для формування нових звітів або редагування вже існуючих. Поточні звіти створюються в форматі RTF і переглядаються застосунком Microsoft Word. Клавішею Append або/і з заданою в вікні «Schedules» періодичністю в звіт дописуються поточні значення параметрів. Відповідними текстовими полями задається діапазон дати і часу формування історичного звіту, а відповідними клавішами ініціюється формування історичного звіту. Зформований історичний звіт може бути переглянутий в таблиці на вікні або застосунком Microsoft Excel.

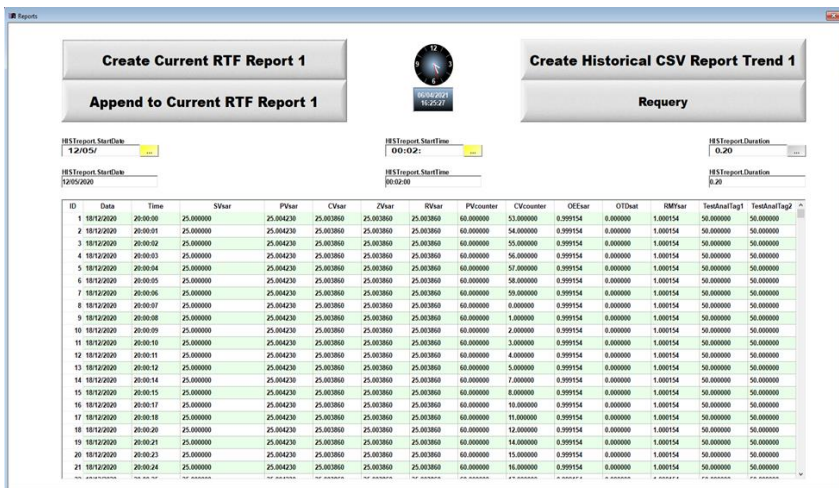


Рис. 4.11. Вікно «Reports»

4.5. Висновки і рекомендації. 1. Структурне (імітаційне) моделювання АТК – моделювання взаємодії програмно змодельованого ТОУ (тобто імітаційної моделі ТОУ) і ПТК АСУТП, якою оснащений ТОУ. Імітаційне моделювання є ефективною операційною технологією, яка близька за своєю ідеологією до цифрового твінінгу динамічних систем. 2. Розроблена імітаційна модель АТК барабанового котла на програмно-технічній платформі «СКМ Matlab Simulink (модель ТОУ) – софтПЛК CoDeSys (контролерна функціональність АСУТП) – SCADA-система WedStudio (супервізорна функціональність АСУТП)» рекомендується для використання як з навчальною метою в лабораторних роботах з автоматизації, так і на стадіях проектування і експлуатації для налагодження САР котла. 3. В СКМ Matlab Simulink змодельована функціональна взаємодія всіх ОУ (каналів передачі дії) в ТОУ барабанового котла (в тому числі з урахуванням ефекту «набрякання рівня») за основним збуренням зі сторони регулюючого клапану турбіни. 4. Змодельовані найважливіші АСР контролерної функціональності (на прикладі софтПЛК CoDeSys) АСУТП барабанового котла – каскадна АСР теплового навантаження котла і одноконтурна АСР рівня в барабані котла, які є невід’ємними частинами системи автоматичного управління енергоблоком. 5. Реалізовані типова HMI-Standard і MES-Lite супервізорна

функціональність (в SCADA-системі WebStudio), в тому числі розрахунок ключових показників ефективності, що дозволяє оператору-технологу ефективно імітувати роботу і взаємодію (операційний інтерфейс) з реальним фізичним ТОУ.

5. Структурне імітаційне моделювання автоматизованого технологічного комплексу промислової логістики на програмній платформі SIMIO⁷

5.1. Постановка проблеми. Актуальність застосування імітаційного моделювання полягає у складності роботи з реальним об'єктом. Часто дослідження над реальним об'єктом є дорогими і / або неможливими, а також може мати велику тривалість проведення в повному обсязі. Слід зазначити, що імітаційне моделювання може застосовуватися тоді, коли неможливо з тих чи інших причин використовувати аналітичні моделі. Експеримент з моделлю дозволяє, задаючи різні початкові параметри моделі, отримувати і аналізувати різні результати її виконання, що дозволяє спростити задачу прийняття рішення по управлінню об'єктом. Таким чином, моделювання у промисловості застосовується все частіше. Зростання та розвиток автоматизації технологічних процесів дозволяє використовувати потужні програмні продукти з великим набором математичних інструментів, зокрема для імітаційного моделювання. Це відкриває нові можливості для – підвищення ефективності виробництва, покращення якості готової продукції, економії сировини та матеріалів, аналізу та оптимізації робочих процесів.

Актуальною є задача імітаційного моделювання автоматизованого технологічного комплексу (АТК), який включає технологічний об'єкт управління (ТОУ) і автоматизовану систему управління технологічними процесами (АСУТП).

5.2. Аналіз проблеми. Модель – це спрощений аналог реального об'єкту чи явища, який представляє поведінку вхідних частин та їх взаємозв'язки. Під імітаційною моделлю розуміють спеціалізований комплекс програмних засобів, який дає можливість зімітувати роботу будь-якого складного процесу. Завданням імітаційного моделювання є побудова простих моделей складних реальних систем.

⁷ Розділ базується на практичних розробках автора з співавторами Батюк С.Г., Федь Т.І. Імітаційне моделювання АТК промислової логістики на основі програмного забезпечення Simio. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2020. Том 31 (70). № 6. С 149-155.

Імітаційне моделювання можна використовувати при прийнятті рішень на стадіях проектування та аналізу виробничих систем (конвеєрних ліній, складських приміщень), транспортних систем, різноманітних організацій, що надають сервіси масового обслуговування. Імітаційне моделювання – ефективний засіб дослідження і проектування складних систем.

Об'єктом дослідження є модель АТК виробничої логістики на ділянці методичних печей прокатного стану. Модель формує рецепти для партій слябів до відповідної печі. Рецепти включають формули – задані значення температур по зонам печі. Методичні печі використовуються для нагріву металу у неперервному прокатному виробництві. За принципом дії методична піч є неперервною піччю, хоча посадка в неї партій слябів відбувається дискретно – через визначені проміжки часу. Основним завданням є отримання металу із заданою температурою поверхні і допустимим за умовами прокатки перепадом температур по перерізу. Завданням управління процесом нагріву є вироблення такого температурного режиму печі, щоб весь час отримувати задану якість нагріву в умовах змінної продуктивності агрегату з урахуванням інших збурень.

Загальна схема методичної печі з нагріванням металу з однієї сторони показана на рис. 5.1.

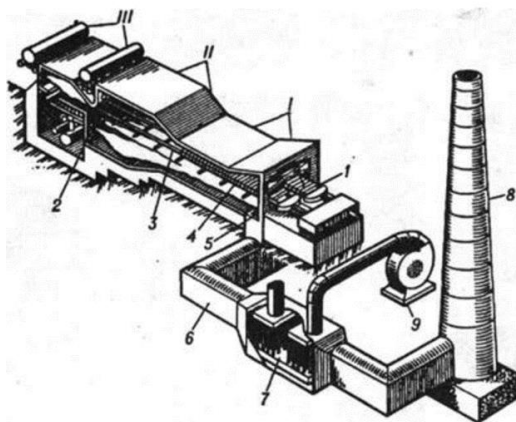


Рис. 5.1. Загальна схема методичної печі
3-зонна методична піч за конструкцією ділиться на три зони:

- I – методична;
- II – зварювальна;
- III – томильна зона.

Загальний вигляд 3-зонної методичної печі: 1 – штовхач; 2 – пальник; 3 – охолоджувальні труби; 4 – місце, де нагріваються заготовки; 5 – вертикальний канал для відведення продуктів згоряння (димопад); 6 – горизонтальний димар для відведення газів; 7 – рекуператор; 8 – димова труба; 9 – повітряний вентилятор.

5.3. Постановка завдання. Розробити імітаційну модель автоматизованого технологічного комплексу АТК промислової логістики в симуляторі Simio, яка може бути використана як в навчальному процесі, так і в техніко-робочому проєктуванні ситем автоматизації. Даний симулятор використовується для здійснення імітаційного моделювання дискретних процесів і періодичних виробництв та агентне моделювання. Автоматизований виробничий комплекс (АВК) ділянки методичних печей прокатного стану включає АТК методичних печей (по кількості печей на ділянці) і одну АТК виробничої логістики (транспортна система + АСУ переміщенням слябів).

Виробнича логістика – переміщення партій слябів на ділянці між печами, завантаження партій слябів в піч і вивантаження партій слябів з печі на прокатний стан згідно з розкладом, який залежить від прогнозованого темпу роботи прокатного стану. Додатковою функціональністю АТК виробничої логістики є завантаження рецептів (формул) температурного режиму печі (задані температури в зонах печі по довжині печі) в ПЛК АСУ ТП печей для відповідних партій слябів. Партія слябів містить однакові сляби – з однаковими геометричними і фізико-хімічними характеристиками.

Модель АТК виробничої логістики імітує змінний темп роботи прокатного стану, відповідно змінний розклад логістики слябів, реалізацію відповідної логістики слябів і завантаження відповідних рецептів для партій слябів в відповідних печах.

5.4. Результати моделювання. Середовище Simio Simulation застосовується для моделювання в різних сферах діяльності. Особливістю системи є вбудовані інтелектуальні об'єкти, які можна використовувати при побудові моделі, а також можливість створення тривимірних моделей. Simio забезпечує об'єктно-орієнтоване середовище 3D-моделювання, яка дозволяє побудувати об'ємну модель з двовимірного представлення, а потім переключитися на тривимірний вигляд системи. Всі продукти моделювання програми Simio безпосередньо інтегруються з Google Warehouse. Для реалістичного відображення виконаних моделей можна завантажувати з масивної бібліотеки готові 3D-об'єкти.

Моделювання в середовищі Simio починається з використання базових об'єктів – це основа, для подальшої побудови об'єктів вищого рівня.

Базовий об'єкт у Simio – це фіксований об'єкт, агент, сутність, ланка, вузол або транспортер, які мають власну логіку. Процеси надають об'єкту інтелект, визначаючи логіку, яка виконується у вигляді відповіді на події.

Кожен процес – це послідовність кроків, яка запускається подією і виконується токеном.

Токен виконується на початку процесу і є простим потоком виконання (подібно до сутностей). Токен може мати певні властивості (вхідні параметри) і стани (змінні значення у процесі виконання), які контролюють виконання кроків процесу. Користувач має можливість визначити власні класи токенів, які мають різні комбінації властивостей і станів.

Потужний механізм моделювання Simio забезпечується набором подій, які автоматично запускаються для шести базових класів об'єктів, разом із кроками процесу, доступними для моделювання змін стану, які є реакцією на ці події. Побудова інтелектуальних об'єктів передбачає вивчення подій та колекцію доступних кроків процесу, а також знання того, як об'єднати ці кроки для реалізації складної логіки.

За допомогою набору стандартних елементів створюються складні логічні схеми. Вигляд схеми процесу показаний на рис. 5.2.

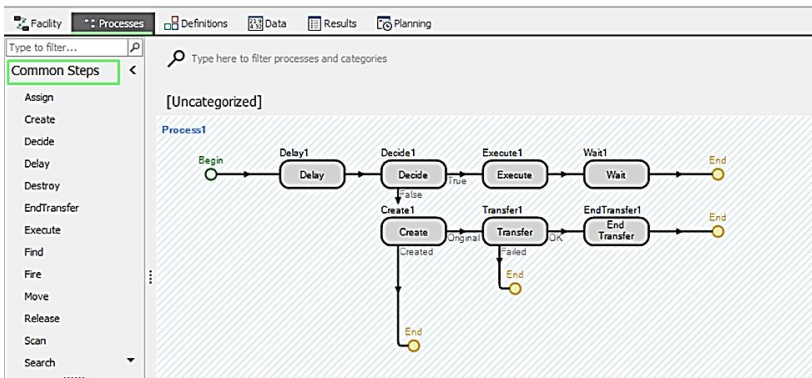


Рис. 5.2. Схема процесу

В Simio використовуються класи інтелектуальних об'єктів (Intelligent Object):

- Fixed (фіксований об'єкт) – має єдине нерухоме місце в системі, наприклад, машина.

- Link (посилання) – надає шлях, по якому можуть проходити об'єкти.

- Node (вузол) – визначає перетин між однією або кількома вхідними / вихідними посиланнями. Вузли також можуть бути пов'язаними з нерухомими об'єктами, щоб забезпечити точки входу та виходу для об'єкта.

- Entity (сутність) – визначає динамічний об'єкт, який можна створити та знищити, переміщатися по мережі посилань та вузлів та вводити / виходити фіксовані об'єкти через пов'язані з ними вузли.

- Transporter (транспортер) – визначає особливий тип сутності, який також може приймати та віддавати інші об'єкти у вузлах.

Вказані типи визначають загальну, але не конкретну поведінку об'єкта. Конкретна поведінка об'єкта визначається внутрішньою моделлю цього об'єкта. Наприклад, у нас може бути бібліотека з півтисячі різних типів транспортерів, кожен з яких має власну поведінку, яку визначено їх власними моделями. Однак усі вони мають базову здатність пересуватися по мережі посилань та вузлів.

Стандартна бібліотека Simio містить 15 об'єктів, які являються основою більшості моделей. Всі об'єкти розташовані на головному вікні у вкладці Facility (рис. 5.3, табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Опис стандартних елементів Simio

Назва об'єкту	Опис
1	2
Source (Джерело)	Створення сутності об'єкту заданого типу.
Sink (Вихідний елемент)	Знищує сутності, які завершили процес.
Server (Сервер)	Представляє собою ємнісний процес, такий як машина або сервісна операція.
Workstation (Робоча станція)	Моделює складну робочу станцію з фазами налаштування, обробки та вилучення.
Resource (Ресурс)	Базовий об'єкт, який може бути задіяний та звільнений іншими об'єктами
Worker (Робітник)	Рухомий ресурс, який може бути задіяний та звільнений для виконання завдань, а також використовується для транспортування об'єктів між вузлами.

Продовження таблиці 5.1

1	2
Combiner (Комбінатор)	Об'єднує кілька об'єктів з материнською сутністю.
Separator (Сепаратор)	Розбиває групу сутностей або робить копії однієї сутності.
Vehicle (Транспортний засіб)	Транспортер, який може слідувати фіксованим маршрутом або виконувати виїзди на вимогу.
BasicNode (Базовий вузол)	Моделює простий перетин між декількома посиланнями.
TransferNode (Вузол передачі)	Моделює роздоріжжя для зміни пункту призначення та режиму подорожі.
Connector (Конектор)	Просте з'єднання між двома нерухомими вузлами.
Path (Шлях звичайний)	Маршрут, по якому сутності можуть самостійно рухатися зі своєю швидкістю.
TimePath (Шлях часовий)	Маршрут, що має вказаний час подорожі для всіх сутностей.
Conveyor (Конвеєр)	Посилання, що моделює акумулюючі / неакумулюючі конвеєрні установки.
ModelEntity (Сутність моделі) *	Представляє частину, особу чи інший об'єкт, який динамічно створюється, проходить через систему, після чого залишає систему. *Оскільки сутності додатково налаштовуються, вони не є частиною стандартної бібліотеки.

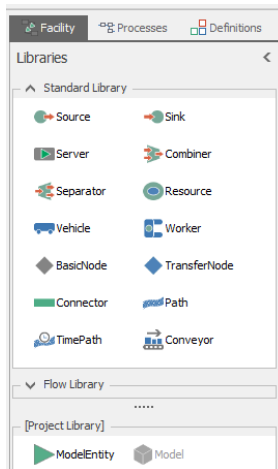


Рис. 5.3. Вкладка Facility на головному екрані

Розглянемо спрощену модель – ділянку методичних печей прокатного стану металургійного заводу. Методичні печі використовуються для нагріву металу у неперервному прокатному виробництві. За принципом дії методична піч є неперервною піччю, хоча посадка в неї партій слябів відбувається дискретно – через визначені проміжки часу.

За допомогою стандартних об'єктів Simio реалізуємо неперервний процес проходження металу (рис. 5.4).

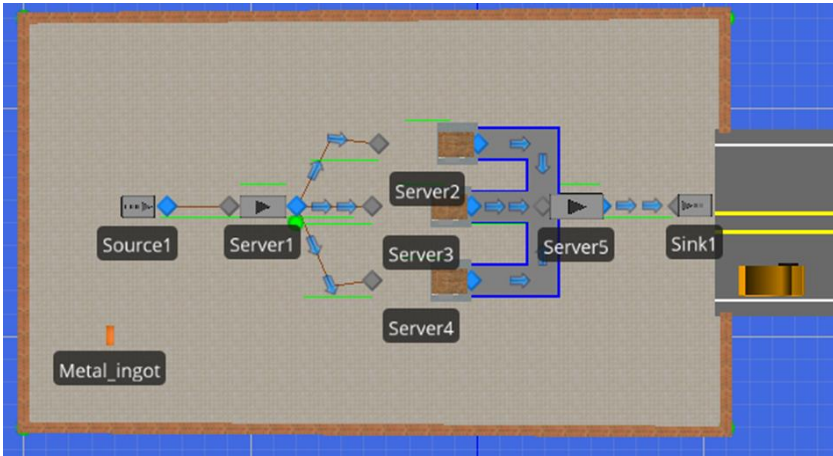


Рис. 5.4. 2D модель процесу

Використано такі типи стандартних об'єктів: ModelEntity, Source, Server, Sink, Path.

ModelEntity (Metal_ingot) – металічний сляб, що проходить через систему.

Source1 – початкова точка, в яку завантажуються сляби.

Server1 – пункт розподілення слябів між системою методичних печей.

Server(2-4) – методичні печі, в яких проходить нагрівання слябів.

Server5 – прокатний стан.

Sink – кінцева точка, місце збору готової продукції

Path – шлях, маршрут проходження слябів.

За рахунок накладання шаблонів різних моделей на стандартні об'єкти отримуємо реалістичну візуалізацію виробничої ділянки.

Перейдемо до 3D режиму, та запустимо процес на виконання.

Бачимо, що матеріал проходить системою по наперед заданому маршруту (рис. 5.5).

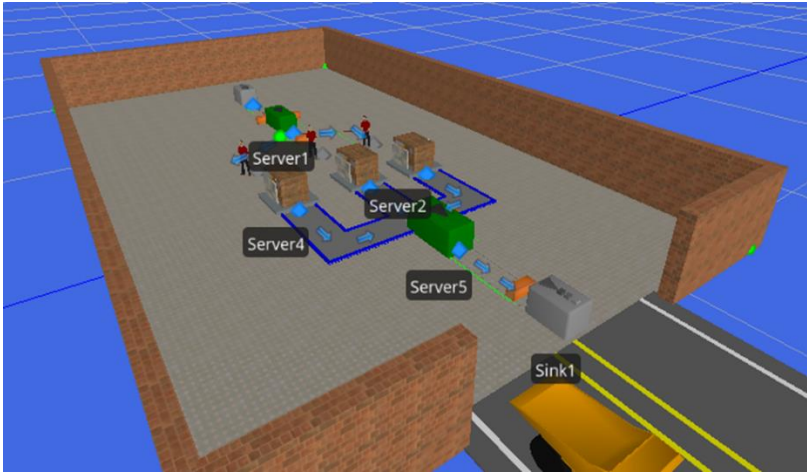


Рис. 5.5. 3D модель процесу

Основним підходом при плануванні на основі моделювання є запуск моделі промислового об'єкту з врахуванням його початкового стану та набору запланованих кроків, які потрібні для отримання кінцевого продукту. Правила прийняття рішень включені в модель для прийняття рішень, вибору ресурсів та маршруту. У процесі моделювання будується графік, імітуючи переміщення по технологічній ланці та приймаючи «розумні» рішення на основі визначених правил планування. Результати моделювання зазвичай відображаються як задачі, завантажені на інтерактивній діаграмі Ганта, якими користувач може надалі оперувати. Існує велика кількість правил, які можна застосувати в рамках імітаційної моделі для створення різних типів графіків, орієнтованих на такі задачі, як максимізація пропускної здатності, підтримка оптимального використання ресурсів, мінімізація змін або дотримання визначених правил.

Конфігурація режиму роботи показана на рис. 5.6.

The screenshot shows a software interface with a menu bar (Facility, Processes, Definitions, Data, Results, iG Planning) and a sidebar with navigation icons (Entity Workflow, Logs, Tables, Work Schedules). The main area displays two tables:

Work Schedules										
Name	Start Date	Description	Days	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
StandardWeek	03.01.2011	Standard Work Week Schedule	7	StandardDay	StandardDay	StandardDay	StandardDay	StandardDay		

Day Patterns	
Name	Description
StandardDay	Standard 8-5 Work Day

Рис. 5.6. Розклад роботи

Діаграма Ганта (англ. Gantt chart, також стрічкова діаграма, графік Ганта) – діаграма, яка використовується для ілюстрації плану, графіка робіт за будь-яким проектом. Є одним з засобів планування та управління проектами. Діаграма зображена на рис. 5.7.

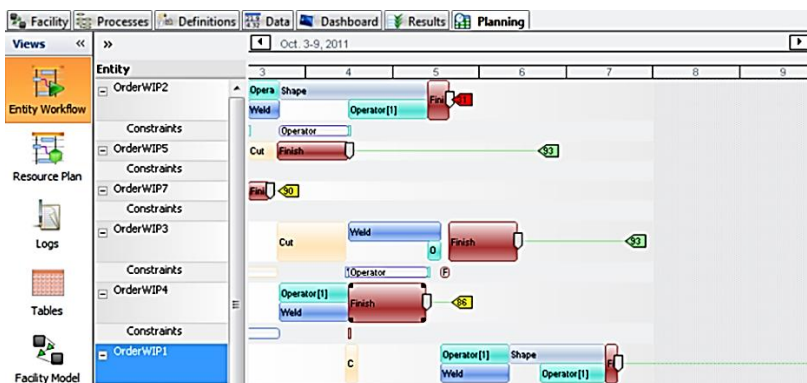


Рис. 5.7. Схема планування (діаграма Ганта)

Пакет RPS (Risk-based Planning and Scheduling – планування на основі ризиків та розклад) дозволяє реалізовувати гнучкі стратегії планування, для підтримки ключових виробничих цілей, та дозволяє швидко реформувати графік при виникненні незапланованих події або нештатних ситуацій. Можна відображати графіки в широкому діапазоні результатів, включаючи інтерактивні діаграми Ганта, які відображають індивідуальний час очікування на критичних ресурсах.

Продукти Simio також інтегрують 3D-анімацію запланованого графіка, щоб забезпечити попередній перегляд роботи

досліджуваного об'єкту. Рішення RPS Simio може гнучко застосовуватися для вирішення найскладніших задач у автоматизації.

Результатом імітаційного моделювання АТК виробничої логістики є робоче завдання / порційний розклад (work order / batch schedule) для MES-системи з симулятором Simio в якості генератора розкладу (scheduler).

Обмін даними (рецептами) між симулятором Simio і HMI/SCADA-системою реалізується через текстовий рецептурний файл.

5.5. Висновки і рекомендації. Обґрунтована актуальність і ефективність імітаційного моделювання АТК логістики для проектування АСУ технологічними процесами і АСУ виробництвом.

Розроблена методика імітаційного моделювання логістики в симуляторі Simio може бути ефективно використана в навчальному процесі на кафедрах промислової автоматизації.

Описаний порядок роботи в середовищі імітаційного моделювання Simio, проаналізовані базові можливості симулятора з ілюстрацією можливих результатів.

Створена спрощена модель імітаційного моделювання АТК виробничої логістики на ділянці методичних печей прокатного стану в програмі Simio, придатна для промислового і навчального використання.

ВИСНОВКИ. Результати і рекомендації щодо імітаційного моделювання і цифрового твінінгу автоматизованих технологічних комплексів та інформаційно-вимірювальних систем.

Імітаційне SIL-моделювання є дієвим інструментом імітаційного моделювання АТК – полігонних випробувань реальних розроблених АСУТП на програмно змодельованому ТОУ. SIL-моделювання дозволяє як змодельовати промисловий ТОУ, так і випробувати на змодельованому ТОУ функціональність розробленої дворівневої АСУТП. Ефективність SIL-моделювання досягається використанням сучасних програмних засобів – СКМ (наприклад, SimuLink), софтПЛК (наприклад, CoDeSys), HMI/SCADA-системи (наприклад, InTouch). Методика імітаційного моделювання рекомендується для використання як в навчальному процесі, так і для випробувань АТК ще на стадії техно-робочого проектування.

Розроблений програмно-технічний SIL-симулятор є ефективним програмно-модельним інструментарієм розробки полігонів імітаційного SIL-моделювання АТК. Розроблені полігони імітаційного

SIL-модельовання АТК можуть бути використані як в навчальному процесі (основне призначення), так і техно-робочому проєктуванні чи модернізації АТК (опція). Ідеологія імітаційного моделювання АТК може бути реалізована для будь-якого АТК, а також в MES-системах на зовсім іншій програмно-технічній платформі.

Найважливішою функцією первинної обробки вимірних сигналів в програмованих логічних контролерах є функція фільтрації сигналів і даних. Теплоенергетичні агрегати – «повільні» технологічного об'єкту управління, які самі є фільтрами низьких частот. Оптимальна фільтрація даних на теплоенергетичних об'єктах в умовах значних промислових перешкод – актуальна технічна задача.

Фільтри низької частоти в програмованих логічних контролерах неефективні в замкненому контурі регулювання, так як вносять додаткову інерційність в контур регулювання. Фільтри низької частоти в програмованих логічних контролерах ефективні для фільтрації сигналу перед його візуалізацією або перед його передачею в систему людинно-машинного інтерфейсу. Фільтри високої частоти, як зовнішні, так і внутрішні, практично не можуть бути реалізовані, так як мають в своєму складі ланку реального диференціювання.

АНОТАЦІЯ

Імітаційне моделювання динамічних систем – актуальний напрямок і ефективний інструментарій програмного моделювання динаміки з використанням як універсальних, так і спеціалізованих програмних продуктів. Імітаційне моделювання технологій, агрегатів, виробництв і кібер-фізичних систем – це програмне (віртуальне) моделювання фізичних (реальних) активів. Імітаційне моделювання автоматизованого технологічного комплексу – це програмно-технічне моделювання контролерної і супервізорної функціональності автоматизованої системи управління з використанням програмних (не фізичних і не математичних) моделей (цифрових двійників) технологічного об'єкту управління. Функціональне імітаційне моделювання динамічної системи – імітаційне моделювання функцій динамічної системи. Структурне імітаційне моделювання динамічної системи – моделювання взаємодії структурних частин динамічної системи.

На кафедрі автоматизації енергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського розроблюються полігони імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів теплоенергетичних

режимних параметрів. Програмно-модельним інструментарієм розробки полігону імітаційного SIL-моделювання автоматизованого технологічного комплексу є: 1) альбом моделей «Моделювання елементів і структур промислових систем автоматичного регулювання в Matlab Simulink» для імітаційного функціонального моделювання систем автоматичного регулювання; 2) програмно-технічний SIL-симулятор автоматизованих технологічних комплексів на платформі Matlab Simulink – CoDeSys – WebStudio для імітаційного структурного моделювання автоматизованих технологічних комплексів.

Розроблений програмно-технічний SIL-симулятор є ефективним програмно-модельним інструментарієм розробки полігонів імітаційного SIL-моделювання автоматизованих технологічних комплексів. Розроблені полігони імітаційного SIL-моделювання автоматизованих технологічних комплексів можуть бути використані як в навчальному процесі (основне призначення), так і техно-робочому проектуванні чи модернізації автоматизованих технологічних комплексів (опція). Ідеологія імітаційного моделювання автоматизованих технологічних комплексів може бути реалізована для будь-якого автоматизованого технологічного комплексу, а також в MES-системах на зовсім іншій програмно-технічній платформі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Санкт-Петербург, 2005. 400 с.
2. Рыбалев А.Н. Имитационное моделирование АСУ ТП. Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. 408 с.
3. Батюк С.Г., Лядишев Д.К. Імітаційне моделювання теплоенергетичних автоматизованих технологічних комплексів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. Том 33 (72). № 4. С. 39-47.
4. Батюк С.Г., Лядишев Д.К. Моделювання фільтрації в теплоенергетичних системах автоматичного регулювання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2022. Том 33 (72). № 4. С. 48-55.
5. Батюк С.Г., Лобзов Н.С. Функціональне моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного

барабанового котла. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2021. Том 32 (71). № 5. С. 65-73.

6. Батюк С.Г., Лобзов Н.С. Структурне (імітаційне) моделювання автоматизованого технологічного комплексу енергетичного барабанового котла. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2021. Том 32 (71). № 5. С. 74-82.

7. Батюк С.Г., Федь Т.І. Імітаційне моделювання АТК промислової логістики на основі програмного забезпечення Simio. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* 2020. Том 31 (70). № 6. С 149-155.

Information about the author:

Batiuk Serhii Georgiiovych,

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Energy Processes Automation

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

37, Peremohy Ave, Kyiv, 03056, Ukraine