

# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 62-533.66

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/03>

**Батюк С.Г.**

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

**Васянович В.М.**

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

**Ворошилов А.І.**

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

## СТРУКТУРНЕ ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ І СИСТЕМ ПРОГРАМНО-ЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

*Імітаційне моделювання динамічних систем є ефективним інструментом налагодження і модернізації промислових систем автоматичного регулювання (САР), які реалізують неперервне регулювання режимних параметрів технологічних процесів і агрегатів з використанням ПІД-регуляторів (та інших регуляторів). Розроблений на кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ полігон імітаційного моделювання дає можливість реалізувати функціональне імітаційне моделювання (моделювання функцій і перехідних процесів замкнених САР) і структурне імітаційне моделювання (взаємодію контролерної і супервізорної функціональностей, реалізованих реальними ПЛК і HMI/SCADA-системами, з технологічним процесом, змодельованим в системі комп'ютерної математики) САР режимних параметрів технологічних (теплоенергетичних) процесів і агрегатів (печі, котли, інженерні системи життєзабезпечення будівель тощо).*

*Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) в складі САР містять вимірювальні канали (сенсори, нормуючі перетворювачі, вторинні вимірювальні прилади) режимних параметрів технологічних (теплоенергетичних) процесів і агрегатів.*

*Системи програмно-логічного управління (СПЛУ) в складі систем автоматизації реалізують програмно-логічне управління (технологічна сигналізація; аварійна сигналізація; блокування механізмів і агрегатів; старт-стопне управління рольгангами, конвеєрами, освітленням, підігріванням тощо; програмне і календарне управління механізмами) технологічними (теплоенергетичними) процесами і агрегатами.*

*В статті викладені результати виконаних на кафедрі АЕП досліджень з імітаційного структурного моделювання теплоенергетичних ІВС і СПЛУ. Показано, що структурне імітаційне моделювання СПЛУ ефективно так само, як і моделювання САР. Зроблено висновок, що ідеологія та інструментарій структурного імітаційного моделювання поширюються на всю функціональність систем автоматизації – як на неперервне регулювання (САР), так і на технологічні вимірювання (ІВС) і програмно-логічне управління (СПЛУ).*

**Ключові слова:** автоматизована система управління, система автоматичного регулювання, інформаційно-вимірювальна система, система програмно-логічного управління, автоматизація технологічних процесів, програмно-технічні засоби автоматизації, імітаційне моделювання, теплоенергетичні вимірювання, контролерна функціональність, супервізорна функціональність.

**Постановка проблеми.** Імітаційне моделювання динамічних систем є ефективним інструментом налагодження і модернізації промислових систем автоматичного регулювання (САР). Розроблений на кафедрі автоматизації енергетичних процесів (АЕП) НТУУ КПІ полігон імітаційного моделювання дає можливість реалізувати функціональне імітаційне моделювання (моделювання функцій і перехідних процесів замкнених САР) і структурне імітаційне моделювання (взаємодію контролерної і супервізорної функціональностей, реалізованих реальними ПЛК і HMI/SCADA-системами, з технологічним процесом, змодельованим в системі комп'ютерної математики) теплоенергетичних САР. Теплоенергетичні САР – це САР режимних параметрів теплоенергетичних технологічних процесів і агрегатів (печі, котли, інженерні системи життєзабезпечення будівель тощо). Імітаційне моделювання – це програмне (не фізичне і не математичне) моделювання (імітація) фізичних (реальних) активів. Ефективність імітаційного моделювання визначається можливістю реалізувати налагодження і випробування промислової САР в робочих умовах ще до інсталяції розробленої системи автоматизації на майданчику замовника; тобто, фактично, на стадії робочого проектування перед впровадженням і потім на стадії модернізації перед тиражуванням. Таку можливість випробування розробленої системи автоматизації в робочих умовах дає моделювання реального технологічного процесу в системі комп'ютерної математики і використання змодельованого технологічного процесу замість реального фізичного технологічного процесу. Розробник системи автоматизації може перевірити і налагодити контролерну і супервізону функціональності системи автоматизації ще до інсталяції її на майданчику замовника – на розробленій комп'ютерній моделі технологічного процесу. Реалізація такого структурного моделювання потребує вирішення певних програмно-технічних задач (обмін даними Модель – ПЛК – HMI/SCADA-система) і певних задач в моделюванні технологічного процесу в системі комп'ютерної математики (правильна апроксимація динаміки технологічних процесів).

САР режимними параметрами реалізують неперервне регулювання (стабілізацію режимних параметрів на заданих значеннях – уставках) з використанням ПІД-регуляторів (та інших регуляторів).

В складі САР є інформаційно-вимірювальні системи (ІВС), до складу яких входять вимірю-

вальні канали (сенсори, нормуючі перетворювачі, вторинні вимірювальні прилади) режимних параметрів, і регулювально-виконавчі системи (РВС), до складу яких входять регулювально-виконавчі канали (блоки ручного управління, пускачі, виконавчі механізми, регулюючі органи).

Крім неперервного регулювання, системи автоматизації реалізують також програмно-логічне управління (технологічна сигналізація; аварійна сигналізація; блокування механізмів і агрегатів; старт-стопне управління рольгангами, конвеєрами, освітленням, підігріванням тощо; програмне і календарне управління механізмами). Такі системи називаються системами програмно-логічного управління (СПЛУ).

В статті викладені результати виконаних на кафедрі АЕП досліджень з імітаційного структурного моделювання теплоенергетичних ІВС і СПЛУ.

Термінологія і аббревіатури в тексті статті. Технологічний об'єкт управління (ТОУ) – технологічний агрегат (піч, котел, інженерна система тощо), який автоматизується. Автоматизований технологічний комплекс (АТК) – ТОУ, керований АСУ. ТОУ – комплекс ОУ (каналів передачі дії «зміна регулювальної дії – зміна регульованого параметру»). АСУ – комплекс автоматичних систем регулювання (АСР). АТК – комплекс САР режимних параметрів. АТК – кібер-фізична система (КФС). Теплоенергетична САР – САР теплоенергетичного ОУ. Теплоенергетичні ОУ в складі теплоенергетичного ТОУ – це «повільні» і «дуже повільні» ОУ (аперіодичні ланки високого порядку; бак з рідиною – інтегральна ланка). 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). Сучасна АСУ функціонально структурується на дві підсистеми: інформаційно-вимірювальну систему (ІВС) і регулювально-виконавчу систему (РВС). ІВС – сукупність вимірювальних

каналів (ВК) технологічних параметрів (сенсори або давачі Д; реєструючі прилади РП; вхідні модулі – аналогово-цифрові перетворювачі АЦП і дискретно-цифрові перетворювач ДЦП в ПЛК). РВС – сукупність регулювально-виконавчих каналів (РВК) технологічних параметрів (ФБ в ПЛК; вихідні модулі – цифро-аналогові перетворювачі ЦАП і цифро-дискретні перетворювачі ЦДП в 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 – сукупність ВК і РВК в складі АСР (коректно буде також сказати – в складі САР). ФНЧ – фільтр нижніх частот. ФВЧ – фільтр верхніх частот. ФСЧ – фільтр смуги частот. СКМ – система комп’ютерної математики.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як зазначено і продемонстровано в [1], моделювання промислової логістики, задач програмно-логічного управління та інформаційних функцій АСУ є надзвичайно важливою задачею промислової автоматизації і ефективно здійснюється спеціалізованими програмними засобами (наприклад, в системі моделювання Simio).

Актуальною задачею є перевірка ефективності структурного імітаційного моделювання теплоенергетичних ІВС і СПЛУ. Основною проблемою є питання моделювання логіки роботи специфічних програмно-технічних компонентів реальних фізичних технологічних ліній і агрегатів в системі комп’ютерної математики. Якщо структурне імітаційне моделювання СПЛУ ефективне так саме, як і моделювання САР, це означає, що ідеологія структурного імітаційного моделювання поширюється на всю функціональність систем автоматизації – як на неперервне регулювання, так і на програмно-логічне управління.

Підвищення ефективності ІВС САР теплоенергетичних ОУ є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування алгоритмів зовнішньої і внутрішньої фільтрації в ІВС САР теплоенергетичних ОУ.

Підвищення ефективності систем програмно-логічного управління (СПЛУ) є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування структурного імітаційного моделювання для тестування і модифікації типових СПЛУ.

### Теплоенергетичні інформаційно-вимірювальні системи

Вимірювання технологічних параметрів в автоматизації технологічних процесів має дві мети: 1) використання в САР режимних параметрі 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 вимірюваних сигналів в ПЛК і вторинної обробки вимірюваних даних в ЛМІ.

Первинна обробка в ПЛК сигналів від сенсорів технологічних параметрів реалізує такі функції: 1) фільтрація сигналів і даних (апаратна фільтрація вимірюваних сигналів від технологічних сенсорів і програмна фільтрація даних в ПЛК); 2) апроксимація (кусочно-лінійна апроксимація – лінеаризація нелінійної характеристики вимірювання); 3) обмеження мінімального і максимального значень (нелінійність типу насичення); 4) масштабування – лінійне перетворення діапазону (шкали) вимірювання; 5) сповільнення – обмеження швидкості зміни параметру (нелінійність типу насичення); 6) порівняння (порівняння з уставкою РІВНО, БІЛЬШЕ, МЕНШЕ, ДІАПАЗОН); 7) гістерезис – реалізація зони нечутливості і зони повернення (двопозиційна нелінійність – двопозиційна релейна сигналізація і двопозиційне релейне регулювання); 8) алармування – формування події тривоги (аларму) технологічної (попереджувальної) або аварійної; 9) аналітика – статистичний аналіз (виділення найменшого, найбільшого і середнього значень; розрахунок середньоквадратичного відхилення); 10) інтегрування – лінійне інтегрування параметру (площа під графіком зміни параметру); 11) лічильник – математична інкрементація і декрементація (обрахування дискретних подій до уставки лічильника); 12) таймування – реалізація таймерами часових затримок на величину уставки; 13) генерація аналогових і дискретних даних константних і періодичних; 14) логічні операції NOT (логічне НІ – значення виходу протилежне значенню входу), AND (логічне І – вихід = 1, якщо два входи = 1, OR (логічне АБО – вихід = 1, якщо хоча б один з входів = 1), XOR (логічне виключне ТІЛЬКИ АБО – вихід = 1, якщо тільки один з входів = 1).

Найважливішою функцією первинної обробки вимірюваних сигналів в ПЛК є функція фільтрації сигналів і даних. Теплоенергетичні ТОУ – «повільні» ТОУ, які самі є фільтрами низьких частот. Опти-

мальна 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.

#### Теплоенергетичні системи програмно-логічного управління

Рівень L1 прийняття рішень (рівень регулювання; рівень контролерної автоматизації) в інтегрованій АСУ масштабу підприємства за стандартом ISA-95 відповідає за реалізацію задач неперервного регулювання і задач програмно-логічного управління. Програмно-технічні засоби автоматизації рівня L1 – ПЛК.

Задачі неперервного регулювання – це задачі стабілізації режимних параметрів ТОУ (підтримання режимних параметрів на заданих значеннях – уставках). Реалізуються ПІД-регуляторами (та іншими неперервними регуляторами) в САР режимних параметрів ТОУ. ПЛК входять до складу АСУ неперервним виробництвом (Continuous Production Control) і порційним виробництвом (Batch Production Control).

Задачі програмно-логічного управління реалізуються СПЛУ. ПЛК входять до складу АСУ дискретним виробництвом (Discrete Production Control). Виділяють такі задачі програмно-логічного управління: 1) технологічні і аварійні захисти; 2) взаємне блокування машин і операцій; 3) старт-стопне управління транспортними операціями (управління конвеєрами, рольгангами тощо); 4) управління переміщенням (motion control); 5) системи доступу і безпеки (гвард-системи).

АСУ неперервним і порційним виробництвом реалізують інформаційні, управляючі і захисні функції. Інформаційні функції – вимірювання технологічних параметрів, первинна обробка сигналів і візуалізація даних. Управляючі функції – стабілізація режимних параметрів. Захисні функції – технологічні і аварійні захисти обладнання і взаємне блокування операцій. Захисні функції реалізуються саме СПЛУ в складі АСУ. СПЛУ є такою ж необхідною і важливою частиною промислових автоматизованих технологічних комплексів (АТК – це ТОУ, керований АСУ), як і САР режимних параметрів.

Рівень L2 прийняття рішень (рівень управління; рівень супервізорної автоматизації) в інте-

грованій АСУ масштабу підприємства за стандартом ISA-95 відповідає за реалізацію задач людинно-машинного інтерфейсу (HMI). Програмно-технічні засоби автоматизації рівня L2 – SCADA-системи. SCADA-системи реалізують супервізорне управління як «неперервними» САР, так і «дискретними» СПЛУ.

Структурне імітаційне моделювання ефективно використовується для тестування і модифікації АСУ неперервним і порційним виробництвом. Перспективним є використання ідеології і засобів структурного імітаційного моделювання для тестування і налагодження СПЛУ на стадії робочого проектування і в процесі модифікації.

#### **Постановка завдання:**

1. Розробити полігон структурного імітаційного моделювання теплоенергетичних ІВС. Змоделювати і дослідити зовнішню і внутрішню фільтрації сигналів і даних в теплоенергетичних ІВС.

2. Розробити полігон структурного імітаційного моделювання типових СПЛУ. Змоделювати і дослідити типові СПЛУ. Мета дослідження – з'ясувати можливість ефективного моделювання дискретного ТОУ засобами полігону імітаційного SIL-моделювання (ТОУ моделюється в СКМ; контролерна функціональність реалізується в софтПЛК; супервізорна функціональність реалізується HMI/SCADA-системою).

**Виклад основного матеріалу.** Розроблені полігони структурного імітаційного моделювання реалізовані на платформі СКМ Matlab Simulink – софтПЛК CoDeSys – HMI/SCADA-система AVEVA Web Studio як структурна частина полігону імітаційного SIL-моделювання промислових АТК [2].

#### Структурне імітаційне моделювання теплоенергетичних інформаційно-вимірювальних систем

Моделювались і досліджувались алгоритми зовнішньої фільтрації сигналів від сенсорів технологічних параметрів і алгоритми внутрішньої фільтрації даних в теплоенергетичних ІВС.

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.

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.

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 иризняють постійну (систематичну) і стохастичну (випадкову) похибки вимірювання.

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.

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.

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

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.

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.

Внутрішня СПВ компоненту ВК виникає внаслідок стохастичних похибок внутрішніх елементів приладу (механічних, електричних і електронних схем приладу). Розподілення значень вимірювання підкоряється, так як їх є дуже багато, нормальному закону розподілення Гауса. Кожний компонент ВК має внутрішню СПВ, яка характеризується класом точності компонента. Внутрішня СПВ компоненту ВК принципово ніяк не може бути пригнічена, вона може бути тільки врахована (знаючи паспортний клас точності при-

ладу) при виборі приладу і метрологічному розрахунку всього ВК.

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; правило «наводить струм, а не напруга; але наводиться напруга, а не струм»).

Зовнішня СПВ ВК пригнічується фільтрацією вхідних (вимірних) сигналів від сенсорів і власне даних в ПЛК. Використовуються фільтри низьких частот (ФНЧ), фільтри високих частот (ФВЧ) і фільтри смуги частот (ФСЧ).

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.

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.

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).

Зовнішня фільтрація – екранування компонентів ВК і ПЛК від електромагнітних наведень шляхом; здійснюється встановлення програмно-технічних засобів в спеціалізовані металеві шафи з їх заземленням, прокладання сигнальних кабелів окремо від силових кабелів, використання скручених пар, заземлення екранів кабелів.

Внутрішня фільтрація – програмна фільтрація в ПЛК; здійснюється або ФБ (графічна технологічна мова ПЛК), або різницевиими рівняннями (текстова технологічна мова ПЛК).

Задача зовнішньої фільтрації сигналів до ПЛК – пригнітити високочастотну і низькочастотну зовнішні перешкоди (результат електромагнітного наведення шкідливих перешкод на корисний сигнал). Реалізується виключно апаратними фільтрами. Моделюється як ланки ФНЧ і ФВЧ.

Задача внутрішньої фільтрації даних в ПЛК – відфільтрувати корисний низькочастотний сигнал (значення регульованого параметру; корисний сигнал завжди низькочастотний, так як ми маємо справу з «повільними» і «дуже повільними» теплоенергетичними ОУ) і пригнітити шкідливу високочастотну перешкоду.

На рис. 1 представлена функціональна модель фільтрації виміряного сигналу в ПЛК в СКМ Matlab Simulink. Зовнішні і внутрішні фільтри моделювались як ланки ФНЧ і ФВЧ.

Зовнішня і внутрішня низькочастотна фільтрація практично не мають ніякого сенсу для САР з замкненим контуром регулювання. Зовнішній ФНЧ не має практичного сенсу тому, що: пригнічена високочастотна перешкода не є небезпечною для ОУ, який сам є ФНЧ і сам фактично майже не реагує (не встигає реагувати) на високочастотну перешкоду; непригнічена низькочастотна перешкода накладається на корисний високочастотний сигнал виміряного регульованого параметру і спотворює ефект регулювання, «змушуючи» регулятор хибно реагувати на низькочастотну перешкоду як на корисний сигнал і хибно стабілізувати параметр на «неправильних» значеннях. Внутрішній ФНЧ в замкненому контурі є шкідливим для САР, так як, за рахунок включення в контур регулювання додаткових аперіодичних ланок ФНЧ, штучно погіршується динаміка ОУ (сам ОУ є аперіодичною ланкою; включення низькочастотного фільтру в контур регулювання означає послідовне включення додаткових аперіодичних ланок послідовно з аперіодичною ланкою ОУ); використання ФНЧ в замкненому контурі регулювання САР означає, фактично, зміну передатної функції ОУ (це еквівалентно дрейфу характеристик ОУ).

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, продукувані електромагнітним 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).

Структурне імітаційне моделювання теплоенергетичних систем програмно-логічного управління

Моделювались і досліджувались наступні СПЛУ: СПЛУ ліфтовою системою; СПЛУ системою замовлень; СПЛУ насосною групою; СПЛУ системою перекидання факелу.

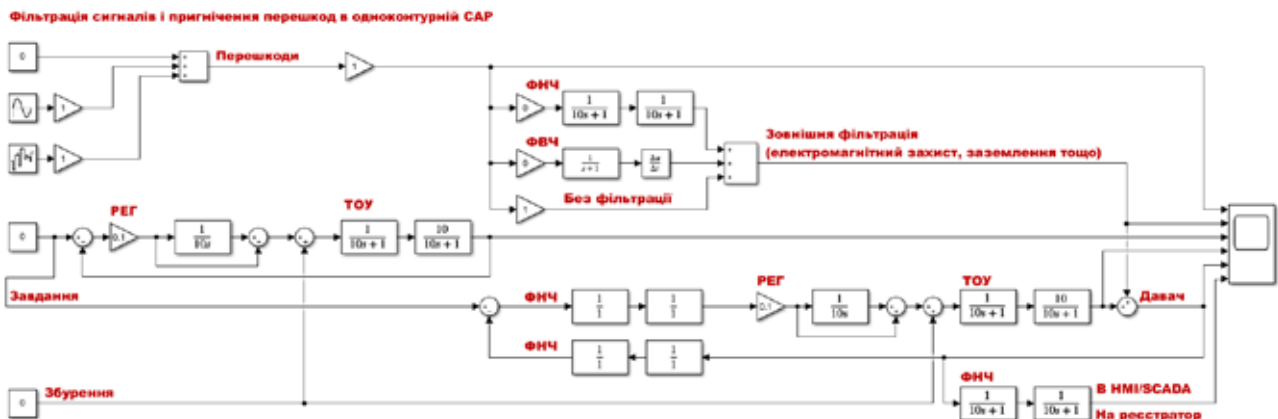


Рис. 1. Моделювання фільтрації в САР режмового параметру в СКМ Matlab Simulink

Ліфтова система (ТОУ) в СПЛУ ліфтовою системою змодельована в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Система замовлень (ТОУ) в СПЛУ системою замовлень змодельована в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Насосна група (ТОУ) в СПЛУ насосною групою змодельована в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Система перекидання факелу є необхідним технологічним компонентом промислових регенеративних камерних печей. Класичний приклад – скловарна піч. Моделювання СПЛУ системою перекидання факелу передбачає моделювання в СКМ процесів нагрівання та охолодження повітря в регенераторах і переміщень запірних клапанів. Процеси нагрівання і охолодження повітря в регенераторах і переміщення запірних клапанів змодельовані в СКМ інтегруючими ланками, ланками транспортного запізнення, елементами порівняння і логічними елементами.

Подача газу та повітря в скловарній печі з поперечним напрямком полум'я здійснюється по черзі або на праву, або на ліву сторону печі. Для підвищення ефективності процесу варки скла використовуються регенератори. Для нормальної роботи скловарних печей необхідно, щоб в робочу камеру постійно надходило нагріте повітря і газ. З цією метою на печі встановлюють дві пари регенераторів, насадка яких по черзі то нагрівається газами, то передає закумуляоване насадкою тепло повітря. Тривалість подачі повітря або період відведення димових газів 30 хв. Протягом 30 хв через насадки регенераторів проходять димові гази, віддаючи цегляній кладці своє тепло. Через 30 хв в нагріті насадки замість димових газів надходить холодне повітря. Закумуляоване насадкою тепло передається повітря, і воно нагрівається до необхідної температури. Поступово, в процесі віддачі тепла, насадка охолоджується і після досягнення певної межі (через 30 хв) процес повторюється. Через регенератор знову пропускаються димові гази, насадка акумулює тепло, потім передає його повітря і т. д. Димові гази надходять в регенератори з температурою 1350–1500 °С і йдуть з них з температурою 300–500 °С.

Формування команди на перекидання факелу виконується автоматично за такими ознаками: за максимально допустимим інтервалом часу між перекиданнями факелу зазвичай до 30 хвилин); за

максимально допустимою температурою верхніх частин регенераторів; за мінімально допустимою температурою нижніх частин регенераторів.

Циклограма перекидання факелу наведена на рис. 2 (перекидання зліва направо; для перекидання факелу зправа наліво циклограма аналогічна).

В циклограмі використані наступні позначення:  $\tau_1$  – початок перекидання факелу;  $\tau_8$  – закінчення перекидання факелу;  $\tau_\phi$  – тривалість перекидання факелу (до 60 с);  $\tau_1^u$  – тривалість переміщення виконавчих механізмів, які закриваються ( $\tau_1^u$ ;  $\tau_{21}^u$ ) або відкриваються ( $\tau_{22}^u$ ;  $\tau_3^u$ ), діапазон значень 2–5 с;  $\tau_1^n$  – тривалість програмно організованих пауз ( $\tau_1^n$  – на продування топки повітрям;  $\tau_2^n$  – на заповнення топки повітрям;  $\tau_3^n$  – на спрацювання всіх кінцевих вимикачів і давачів реле тиску), діапазон значень 5–10 с.

Дослідження змодельованих СПЛУ здійснювалось нанесенням старт-стопних команд, які запускали або зупиняли роботу СПЛУ.

**Результати і висновки.** Дослідження змодельованих типових ІВС щодо зовнішньої фільтрації сигналів і внутрішньої фільтрації даних дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Зовнішня низькочастотна фільтрація (апаратно реалізоване екранування від електромагнітних наведень) перешкод (апаратні ФНЧ) в САР є неефективною, так як вона пропускає на вхід регулятора низькочастотну перешкоду, яку регулятор не може «відрізнити» від низькочастотного вимірюваного регульованого параметру, сприймає як зміну регульованого параметру і відповідно реалізує регульовальну дію, яка, в даному випадку, є зайвою і помилковою. Екранування (тобто апаратний ФВЧ) має сенс виключно як засіб запобігання електромагнітних уражень апаратури САР;

2. Зовнішня фільтрація, взагалі-то, має бути високочастотною (апаратні ФВЧ) – фільтрувати нешкідливу для САР високочастотну перешкоду (пропускати її на вихід без зменшення амплітуди) і пригнічувати шкідливу для САР низькочастотну перешкоду (пропускати на вихід зі зменшеною в багато разів амплітудою). Але апаратна високочастотна фільтрація не може бути реалізована, так як апаратний ФВЧ принципово не може бути реалізований технічно, бо має мати в своєму складі ланку реального диференціювання, що принципово не можливо реалізувати апаратно;

3. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК (програмно реалізованого ФНЧ в ПЛК) в замкненому контурі регулювання є неефективним, так як

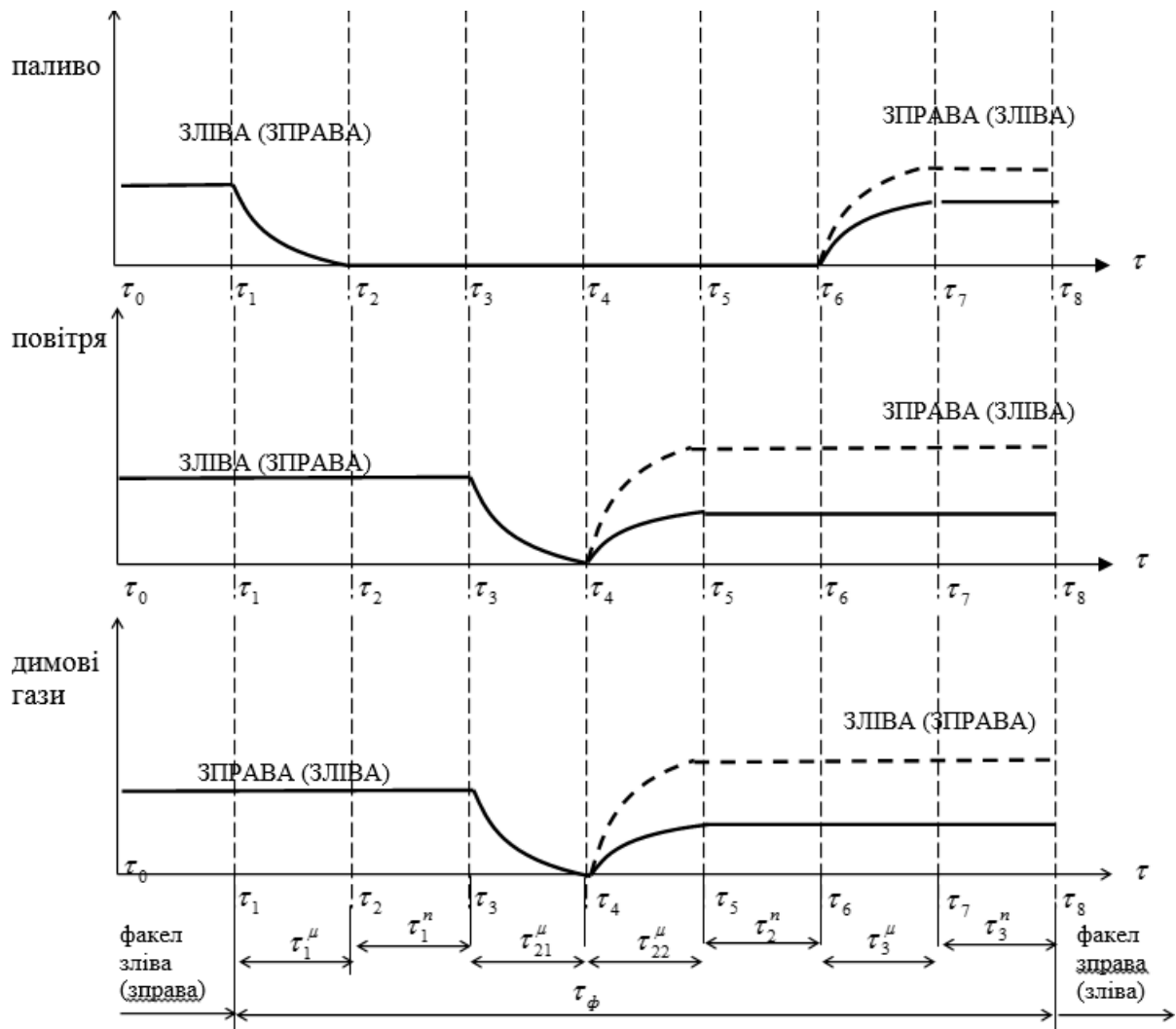


Рис. 2. Циклограма перекидання факелу в топці печі

фактично вносить додаткову інерційність в контур регулювання (додаткову аперіодичну ланку першого або високого порядку). Так як ОУ сам є ФНЧ, то високочастотні перешкоди практично не впливають на якість регулювання в САР;

4. Використання внутрішнього ФНЧ в ПЛК є ефективним для фільтрації сигналу, який передається для візуалізації на реєструючий прилад або в HMI/SCADA-систему;

5. Внутрішній програмний ФВЧ в ПЛК не потрібен принципово, бо не має сенсу пригнічувати шкідливу низькочастотну перешкоду (яку неможливо пригнітити зовнішнім апаратним ФВЧ, який технічно неможливо реалізувати), бо в низькочастотному сигналі завжди є корисний низькочастотний вимірний регульований параметр (який принципово не можна пригнічувати, бо саме це вимірювання і реалізує принцип регулювання за відхиленням в замкненому контурі, тобто принцип зворотного зв'язку). Крім того,

взагалі-то, програмний ФВЧ неможливо реалізувати, бо він має мати в своєму складі ланку реального диференціювання, що практично неможливо ефективно реалізувати програмно (як і апаратно).

Дослідження змодельованих типових СПЛЮ дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Полігон структурного імітаційного SIM-модельовання так само ефективно може бути використаний для тестування СПЛЮ, як і для САР режимних параметрів. Дискретні ТОУ, так само як і неперервні ТОУ, ефективно моделюються в СКМ. Для моделювання динамічних елементів в дискретних ТОУ достатньо використовувати інтегруючі ланки і ланки транспортного запізнення. Аперіодичні ланки, практично, не використовуються (немає перехідної динаміки). Контролерна функціональність реалізується в софтПЛК. Супервізорна функціональність реалізується HMI/SCADA-системою;



2. Ефективність структурного імітаційного SIL-моделювання СПЛУ продемонстрована для типових СПЛУ: СПЛУ ліфтовою системою; СПЛУ системою замовлень; СПЛУ насосною групою; СПЛУ системою перекидання факелу;

3. Перспективним є використання полігону структурного імітаційного SIL-моделювання для тестування СПЛУ технологічними і аварійними захистами на теплових і атомних електричних станціях.

#### Список літератури:

1. Joines, J.A., S.D. Roberts. Simulation Modeling with Simio: A Workbook. 2nd ed. Pittsburgh: Simio LLC. 2012.

2. Батюк С.Г. Імітаційне моделювання і цифровий твінінг енергетичних кібер-фізичних систем (кібер-енергетичних систем) // Досягнення України та країн ЄС у сфері інновацій і винахідництва в галузі техніки : колективна монографія. С. 44-109. Рига, Латвія : Izdevniecība "Baltija Publishing", 2022. 544 с. 65 с.

#### **Batiuk S.G., Vasianovych V.M., Voroshylov A.I. STRUCTURAL IMITATION MODELING OF THERMAL ENERGY INFORMATION-MEASURING SYSTEMS AND SYSTEMS OF PROGRAM-LOGIC**

*Imitation modeling of dynamic systems is an effective tool for setting up and modernizing industrial system of automatic control (SAR), which implement continuous control of regime parameters of technological processes and aggregates using PID-controllers (and other controllers). The platform for imitation modeling developed at the Department of Power Process Automation (AEP) of NTUU KPI makes it possible to implement functional imitation modeling (imitation of functions and transient processes of closed-loop SAR) and structural imitation modeling (interaction of controller and supervisor functionalities implemented by real PLCs and HMI/SCADA systems, with the technological process modeled in the system of computer mathematics) SAR of regime parameters of technological (thermal energy) processes and aggregates (stoves, boilers, engineered life support systems of buildings, etc.).*

*Information-measuring systems (IMS) as part of the SAR contain measurement channels (sensors, normalizing converters, secondary measuring devices) of regime parameters of technological (thermal energy) processes and units.*

*Systems of program-logic control (SPLC) as part of automation systems implement software-logic control (technological signaling; emergency signaling; locking of mechanisms and units; start-stop control of roller conveyors, conveyors, lighting, heating, etc.; program and calendar control of mechanisms) by technological (thermal energy) processes and aggregates.*

*The article presents the results of the imitation structural modeling of thermal power IMS and SPLC carried out at the AEP department. It is shown that the structural imitation modeling of SPLC is as effective as the modeling of SAR. It was concluded that the ideology and toolkit of structural imitation modeling extends to the entire functionality of automation systems – both continuous regulation (SAR), technological measurements (IMS) and program-logic control (SPLC).*

**Key words:** *automated control system, system of automatic regulation, information-measuring system, system of program-logic control, automation of technological processes, software-technical means of automation, imitation modeling, thermal energy measurements, controller functionality, supervisory functionality.*