

С.М. Єсаулов, М.В. Хворост, О.Ф. Бабічева, М.О. Найдюнов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ

Представлений варіант автоматичного налаштування уставок ПІД-регулятора в системі автоматизації об'єктів зі змінювальними динамічними властивостями. Моделювання системи автоматики з класичним та нечітким ПІД-регуляторами виконувались у середовищі Matlab&Simulink. Виявлено переваги та недоліки пристрою з нечіткою логікою для зміни уставок налаштувань регулятора. Отримані результати моделювання дозволяють реалізувати пристрої за допомогою мікроконтролера сімейства Arduino.

Ключові слова: електромеханіка, автоматизація, регулятор, мікроконтролер, моделювання, електронна модель, нечітка логіка, алгоритм, налаштування регулятора.

Постановка проблеми

У даний час різноманітність популярних автоматичних систем можна розділити на автомати, що виконують однотипні операції, та автоматичні системи, які тривалий час належним чином підтримують фізичні величини в заданих інтервалах.

На муніципальному транспорті та об'єктах комунального господарства технологічні процеси реалізуються спільно зі спеціальними керуючими пристроями, що забезпечують стабілізацію змінних координат, до яких можна віднести швидкість руху, витрати рідин і газів, нагрівання та охолодження компонентів електромеханічних систем та різні довільно мінливі фізичні величини.

Основні цілі керування будь-якими об'єктами реалізуються через показники чи керовані параметри за певним законом. У практиці побудови систем автоматизації об'єктів широкого застосування знайшли системи автоматичного регулювання (САР) тепловими процесами. Переважна більшість контурів керування технологічними процесами побудовані на основі застосування пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів. Цей факт пов'язаний з тим, що закон керування привертає до себе увагу зрозумілою реалізацією і надійністю у роботі. Однак, володіючи цими перевагами, пристрій залишається лінійним, тоді як більшість реальних об'єктів керування (ОК) характеризуються нелінійними характеристиками. У зв'язку із цим застосування ПІД-регуляторів для багатьох об'єктів пов'язане з певними труднощами.

Наприклад, різні електромеханічні пристрої та установки не можна віднести до детермінованих систем, тому що виконуються зміни завдання, графіки завдань, змінний характер навантаження тощо. При постійних налаштуваннях ПІД-регулятора САР

виконується зростання енерговитрат, оскільки на технологічному обладнанні неефективно використовується примусове охолодження та інші додаткові керовані заходи. Щоб уникнути подібних неточностей в механізмах, доводиться застосовувати ручне керування, яке знижує переваги автоматики при керуванні процесами та установками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Типове завдання налаштування більшості застосовуваних САР може бути сформульоване, виходячи зі знайденої аналітично або в результаті обробки даних експерименту передавальної функції об'єкта регулювання та обраного на стадії проектування комплексу засобів автоматики із законом регулятора (П, ПІ, ПІД та ін.) [1]. У кожному випадку визначення параметрів налаштування керовального пристрою залежить від динамічних властивостей об'єкта керування і обов'язково відрізняється оригінальністю, що дозволяє досягти стійкості і задану якість роботи САР.

Стійкість, тобто згасання процесу регулювання, є необхідною, але далеко не достатньою вимогою, яка пред'являється системам автоматичного регулювання. Процесам регулювання в САР пред'являються також додаткові вимоги, до яких відносяться мінімальна тривалість перехідного процесу, інтенсивність згасання варіювального параметра, обмежене значення граничного відхилення контрольованої ординати від задавального впливу тощо. Щоб керувати складною технічною системою доцільно враховувати сукупність факторів, що впливають на технологічний процес, і вміти точно вимірювати технологічні величини. При кількох взаємопов'язаних параметрах контролю використовують функціональні залежності таких змінних, включаючи структурні, технічні, апаратні та експлуатаційні

характеристики, що викликає значні складнощі при практичній реалізації. Зазначені фактори вказують на те, що для кожного стану ОК необхідно правильно підбирати закон регулювання, значення коефіцієнтів регулятора і це треба виконувати доволі часто у повній згоді з подіями на об'єкті. У реаліях використовується лише один набір коефіцієнтів для всіх режимів, який перетворює ПІД-регулятор у штучний формувач ненормованих збурень керованого технологічного процесу.

Для вирішення зазначеної проблеми потрібна побудова системи керування, яка виключає штучні збурення технологічного процесу. Для створення таких систем нині привабливими стали інтелектуальні пристрої. Серед них можна виділити інженерні підходи, що здійснюються за допомогою нечіткої логіки [2]. Це приклади безмодельних методів налаштування ПІД-регулятора та експертні системи аналогічного виконання [3, 4]. Зокрема, в експертних системах в базі правил вказується на скільки відсотків слід змінити амплітудне значення того чи іншого коефіцієнта регулятора залежно від поточної ситуації, враховуючи опис умов конкретного правила. Оскільки спочатку ступінь нелінійності ОК важко оцінити, то в основу правил нечіткої системи вносять зміни у процесі роботи обладнання [5]. Привабливість даного інженерного прийому обумовлена тим, що таку систему можливо підключити до існуючого пристрою автоматики, а це незначною мірою впливає на вартість впровадження таких пристроїв у діючому обладнанні, за бажанням його модернізації [6].

Сучасні пристрої автоматики, що містять у своїй структурі мікроконтролери, стежальні системи, автопілоти, обчислювальні компоненти, засоби дистанційного керування тощо, часто мають визначений набір елементів, здатних на їх удосконалення, і це дозволяє формувати резерви електронних ресурсів, які можна задіяти для вирішення важливих інженерних задач у системах автоматизації технологічними об'єктами (ТО). Із зростанням обчислювальної потужності компактної мікропроцесорної техніки розширилися можливості застосування програмних рішень, що використовують принципи збереження даних, обробки та формування керуючих величин у засобах автоматики.

Формулювання мети статті

Метою цієї роботи є дослідження об'єкта керування з пропорційно-інтегрально-диференціальним керуючим пристроєм, налаштування якого коригуються на основі аналізу динамічних властивостей теплових процесів діючого електромеханічного обладнання (ЕМО).

Виклад основного матеріалу

1. Дослідження теплових процесів у електромеханічному обладнанні.

При експлуатації електромеханічного обладнання з електричними приводами останні в тепловому відношенні є складним об'єктом, що включає в себе розосереджені джерела теплоти, нагрівання яких залежить від режиму роботи, напряму теплових потоків усередині електродвигунів і в навколишнє середовище, які носять змінний характер. При цьому багато факторів, що змінюються, варіюють щодо температури навколишнього середовища та умов експлуатації обладнання при змінних навантаженнях. Для спрощення аналізу теплових процесів в ЕМО приймають припущення, серед яких можна виділити однорідність та велику теплопровідність генераторів тепла (електродвигунів), навантаження виконавчої частини привода, втрати потужності, температуру навколишнього середовища, які розглядають незмінними. Теплотою, що віддається випромінюванням нехтують через невелику кількість цього параметра. Такий підхід дозволяє використовувати закон збереження енергії для складання рівняння теплового балансу:

$$\Delta P dt = \Delta A \tau dt + c d\tau, \quad (1)$$

де P – втрати потужності в електроприводі;

A – тепловіддача двигуна у навколишнє середовище;

c – теплоємність двигуна;

τ – перевищення температури двигуна над температурою довкілля;

t – час.

Перетворення виразу (1) дозволяє отримати постійну часу нагрівання:

$$T_n = c / A, \quad (2)$$

перевищення температури, що встановилося:

$$\tau_y = \Delta P / A, \quad (3)$$

або

$$\tau_y = \left(-\frac{\tau}{t} \right) + \tau, \quad (4)$$

і остаточно вираз набуде наступного вигляду:

$$\tau = \tau_y \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_n} \right) \right] + \tau_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_n} \right). \quad (5)$$

Вираз (5) придатний для аналітичного дослі-

дження перехідних характеристик нагрівання двигуна. Отримані таким чином експоненційні залежності вказують, що процеси нагріву та охолодження двигуна можуть бути розраховані з урахуванням параметрів двигуна, а приблизний облік різних компонентів, що входять до складу ЕМО, завжди матимуть змінний характер, тому що при постійних масі, ККД та потужності двигуна складно врахувати зовнішні фактори, що впливають на самовентильовання та умови примусового охолодження електричного приводу. При незмінних закритому виконанні, класі ізоляції та навантаженні на валу характеристики тепловіддачі однотипних електродвигунів (ЕД) відрізняються між собою [5] при нагріванні обладнання в часі (рис. 1).

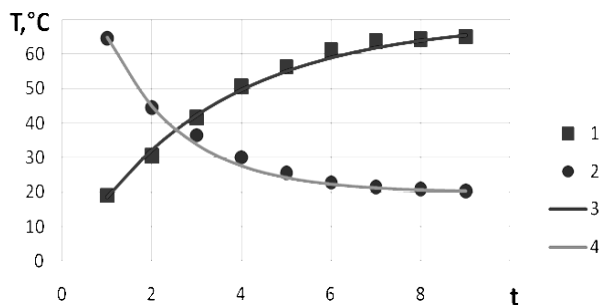


Рис. 1. Характеристики нагрівання (1) та охолодження (2) двигуна: 1, 2 – експериментальні; 3, 4 – аналітичні; T – температура; t – час

Застосування аналітичних прийомів для опису процесів нагрівання (криві 1, 3) та охолодження (криві 2, 4) підтверджують монотонність аналізованих процесів з протилежною спрямованістю, що відображають також хаотичний характер динамічних властивостей процесу теплообміну в ЕМО (рис. 2).

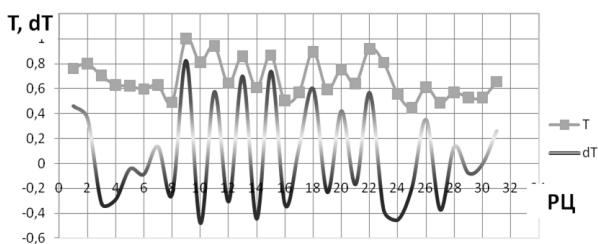


Рис. 2. Варіювання нагріву та градієнта температури ЕД при змінних навантаженнях: T – температура; dT – градієнт нагрівання; РЦ – робочий цикл

Різноманітність робочих циклів обладнання комунального господарства з динамічними параметрами, що змінюються, в системах автоматики повинна враховуватися уставками настроювальних параметрів керуючого пристрою. Оскільки класичні системи стабілізації технологічних величин орієнтовані на хід основного технологічного процесу, то

процеси теплообміну контролюють лише з метою виключення критичних подій нагріву обладнання, здатних вивести з ладу дороги його частини. Разом з цим не виключені ТО, в яких інтелектуальний облік теплових процесів може сприяти суттєвому підвищенню економічних показників за рахунок скорочення енерговитрат на тепловиділення.

2. Моделювання та керування перехідних процесів в електромеханічних пристроях.

Для побудови інтелектуальної системи керування технологічним процесом розроблено досить багато методів [7, 8]. При вирішенні завдань керування за допомогою інтелектуальних методів дослідники виділяють пристрої, що реалізують нечіткі алгоритми керування (НАК) технологічними процесами. Оскільки НАК володіють нелінійними властивостями, то завдяки цьому з'являється можливість здійснювати зміну керуваної величини, впливаючи на настроювальні параметри керуваного контролера. Для схеми керування з ПІД-регулятором [8, 9] подібне рішення може мати такий вигляд:

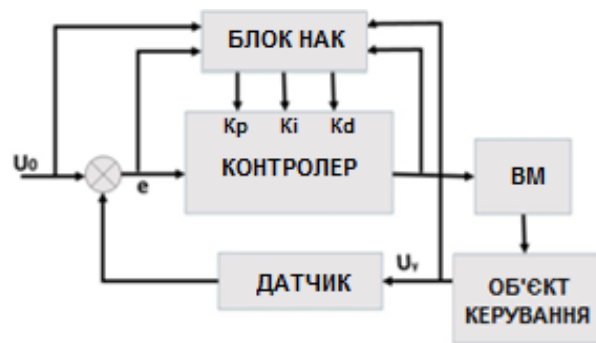


Рис. 3. Схема керування з блоком НАК для коригування параметрів налаштування K_p , K_i , K_d ПІД-контролера: ВМ – виконавчий механізм; U_0 – сигнал задання; e – неузгодженість; U_u – вихідна величина

Для отримання заданих результатів роботи такого пристрою необхідно враховувати специфічні властивості ОК, які передбачаються наборами експлуатаційних подій, що розглядаються при розробці НАК. Нажаль, на ОК зі стохастичними властивостями здійснити бажаний набір ситуацій є досить складним.

Аналіз робочих циклів (рис. 2) свідчить про те, що при керуванні об'єктом з тепловиділенням необхідно враховувати два різних за своєю природою процеси. До першого слід віднести нагрівання, коли нові значення параметра контролю більші за попередні, а до другого – охолодження, коли контрольована величина зменшується. На ЕМО з примусовим охолодженням обидва ці процеси відбуваються зі змінними швидкостями, і тому задані якісні показники перехідних характеристик при постійних налаштуваннях регулятора отримати неможливо (рис. 4).

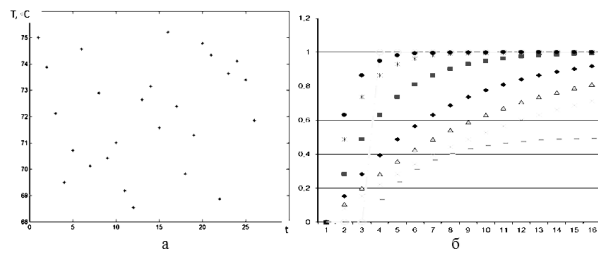


Рис. 4. Варіювання температури (а) та перехідних характеристик нагріву (б) при різних навантаженнях експлуатації ЕМО

У зв'язку з цим доцільно реалізовувати блок НАК для коригування керованої величини U_y шляхом зміни налаштувань регулятора K_p , K_i , K_d у вигляді двох наборів, кожен з яких відповідає за керування процесами при нагріванні та охолодженні.

Як експериментальну установку було використано комплект тягового та навантажувального електродвигунів із системою контролю температури нагрівання тягового електроприводу, ПІД-контролер з електронним регулюванням параметрів налаштування (рис. 5).

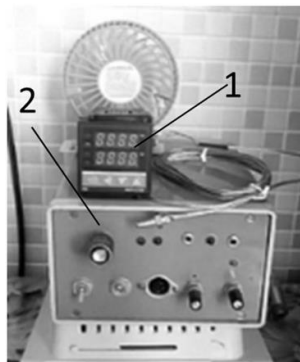


Рис. 5. Компоненти дослідного комплексу обладнання: 1 – цифровий ПІД-контролер; 2 – експериментальний блок керування

Досвідченим шляхом було визначено транспортне запізнення інформаційного сигналу від датчиків контролю температури в різних частинах обладнання, яке досягало 8...77 с (на корпусі електроприводу, підшипниках, суміжних компонентах тощо).

Дослідження робочого циклу ЕМО на ділянках з характерними тенденціями зростання та зниження температури нагріву (рис. 2) дозволяють укласти, що варіювання тепла завжди супроводжується стохастичними перехідними процесами (рис. 4), що залежать від багатьох неконтрольованих зовнішніх факторів. Аналіз експериментальних даних (рис. 4) дозволив отримати передавальні функції каналу керування у вигляді:

$$W(p) = k \cdot \exp \frac{(-\tau p)}{Tp + 1}, \quad (6)$$

$$W(p) = k \cdot \exp \frac{-\tau p}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (7)$$

для різноманітних компонентів обладнання. Аналіз даних дослідів (рис. 4, б) дозволив отримати параметри кривих розгону Ti (2,36–16,83), k (0,42–0,97), τ (8–77 с), які мають змінний характер. В ідеальному випадку доцільно застосовувати роздільні засоби керування температурами нагріву та охолодження.

Оскільки найбільш важливим показником якості системи керування є точність, параметром контролю ефективності системи був обраний мінімум середньоквадратичного відхилення вихідної величини U_y [10]. Для дослідження системи керування з блоком НАК було використано моделювання ЕМО за допомогою пакету Matlab. У середовищі Simulink використовувалася структура ПІД-регулятора (рис. 6), описана в роботі [11].

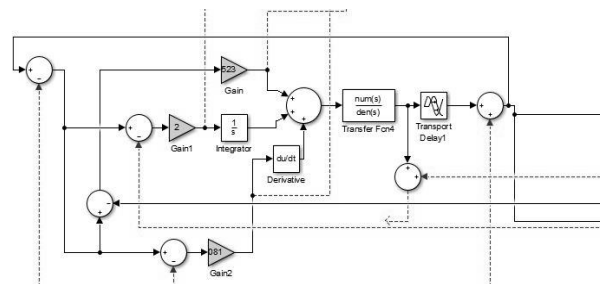


Рис. 6. Фрагмент моделі об'єкта ЕМО з ПІД-регулятором

А з використанням середовища Fuzzy Logic Toolbox створювалася структура ПІД-регулятора, що включає блок НАК (рис. 7).

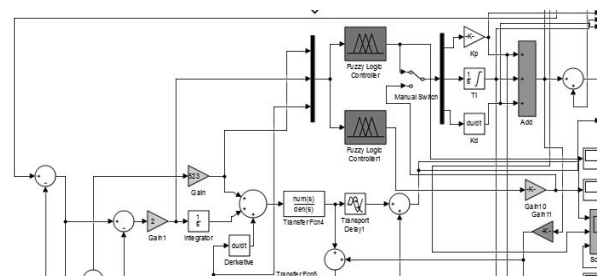


Рис. 7. Фрагмент моделі ПІД&НАК-регулятора

Як впливає з рис. 6, 7, при регулюванні теплових процесів ЕМО з використанням примусового охолодження формується керуючий сигнал для виконавчого органу, виходячи з сигналу неузгодженості (помилки регулювання) – різниці вхідного сигналу (уставки) та сигналу зворотного зв'язку. Керу-

ючий сигнал ПІД-регулятора (рис. 6) є сумою Пропорційного, Інтегрального та Диференціального доданків. Вклад кожного доданку в підсумковий керуючий сигнал задається коефіцієнтами. Коефіцієнт K_p – пропорційний доданок визначає внесок сигналу неузгодженості в керуючий сигнал, K_i – інтегральний доданок визначає внесок інтеграла від сигналу неузгодженості за весь час роботи системи керування, K_d – диференціальний доданок визначає внесок похідної сигналу неузгодженості. Модель ПІД-регулятора допускає відсутність окремих доданків у керуючій величині, що дозволяє змінювати та порівнювати ефективність законів регулювання при експериментах зі змінними динамічними властивостями ОК.

Для забезпечення заданих технічних завданням властивостей системи автоматичного керування (швидкості реакції, величини перерегулювання, стабільності) проводилася попередня оцінка діапазону значень коефіцієнтів керуючого контролера за допомогою математичної моделі та виконання ручного доналаштування уставок коефіцієнтів, що на практиці завжди виконується в процесі пуско-налагоджувальних робіт.

Функціонування блоку нечіткого алгоритму керування (рис. 7) засноване на використанні знань експериментів. Оскільки безліч ситуацій під час керування об'єктом не постійні через нестабільності і непередбачуваності якостей об'єкта, використання аналітичних моделей у разі просто недоцільно і тому перевага надається структурним моделям реальної системи, на яку створювався макет блоку НАК. Блок фазифікації (НАК) перетворює чіткі величини, виміряні на виході технологічного об'єкта, на нечіткі змінні, які описані лінгвістичними даними в основі знань. Весь алгоритм нечіткого набору створювався з допомогою популярного алгоритму Сугено [7, 9].

Структурна схема блоку фазифікації створювалася у середовищі Simulink за допомогою інструмента Fuzzy Logic Toolbox [7, 11]. У редакторі системи (Fuzzy Inference System Editor) використано тип системи Мамдані із завданням вхідних параметрів: $\varepsilon(k)$ – значення помилки, $\Delta\varepsilon(k)$ – швидкість зміни помилки (похідна), $\text{integrate}(\varepsilon(k))$ – інтеграл помилки. Виходи моделі – коефіцієнти регулятора формувалися за допомогою пристрою на рис. 8.

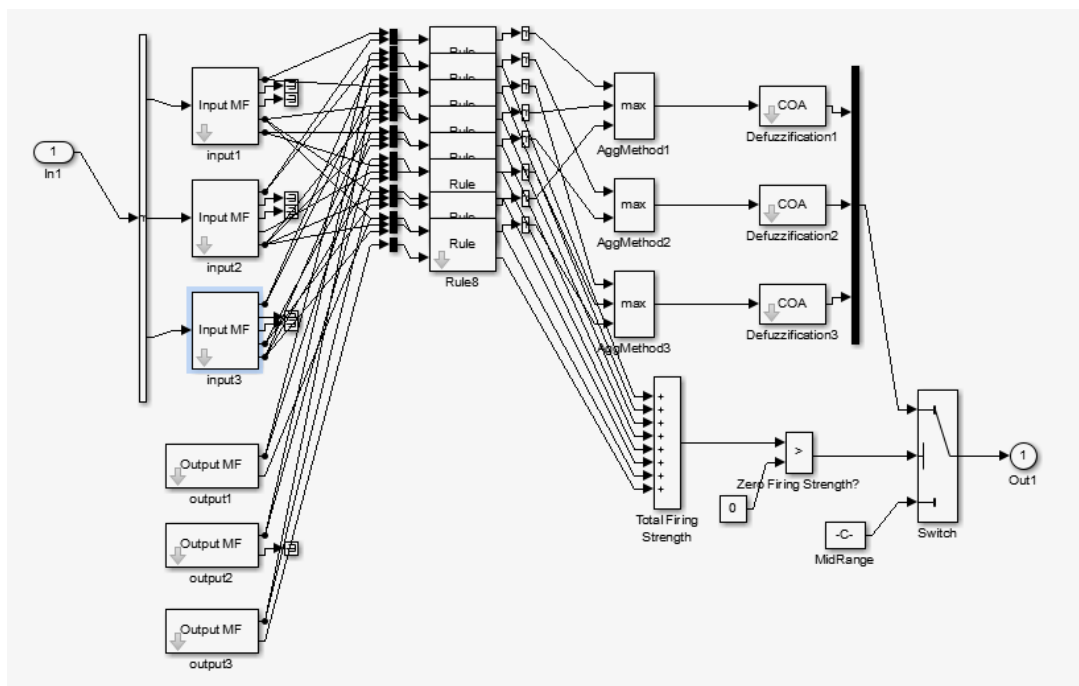


Рис. 8. Структура блоку фазифікації у середовищі Simulink за допомогою інструментарію Fuzzy Logic Toolbox

При незмінній моделі об'єкта на рис. 8 представлені результати роботи досліджуваних систем керування, що ілюструють ефективність роботи класичного ПІД-регулятора та із застосуванням його разом із блоком НАК.

З рис. 9а видно, що передбачене нагрівання обладнання з ретельним настроюванням класичного ПІД-регулятора в системі керування дозволяє про-

тягом ~ 20 с вийти на режим із заданим значенням вихідного параметра (крива 2). Помилка регулювання не перевищувала 0,35%. Аналогічний тепловий режим обладнання з системою керування ПІД&НАК (крива 1) супроводжується уповільненою реакцією регулювання зі змінною помилкою регулювання 0,32–0,76% протягом ~ 30 с.

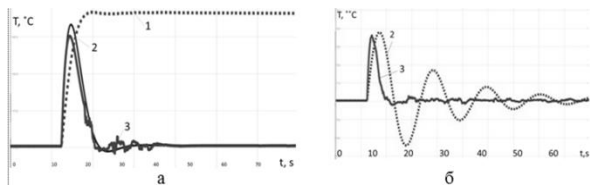


Рис. 9. Результати моделювання систем автоматики:
а – нормований перехідний процес 72–95 °C;
б – випадковий перехідний процес 92–110 °C;
1 – перехідний процес нагрівання ЕМО; 2 – система примусового охолодження з ПІД-регулятором;
3 – система примусового охолодження із блоком фазифікації

З рис. 9б можна зробити висновок, що налаштування ПІД-регулятора при збуреннях не узгоджуються з динамічними властивостями керованого процесу і характеризуються істотним перерегулюванням (крива 2) тривалий час. Коливання вихідної ординати можна усунути лише перенастроюванням уставок, але це завдання складно виконати на діючому обладнанні. Разом з цим, ПІД&НАК для таких самих умов на об'єкті нетривалий час виконує пошук рішення, що відповідає заданому значенню вихідної ординати (крива 3). При цьому поступовий вихід на заданий режим супроводжується незначними відхиленнями вихідної величини (менше 0,27%) без істотного перерегулювання. Оскільки пошук настроювальних параметрів у часі був виконаний автоматично, а незначні зміни вихідної величини не перевищували припустимої помилки, розглянутий варіант ПІД-регулятора з блоком фазифікації відрізняється помітними перевагами від комплексу класичного ПІД-контролера.

Експериментально було встановлено, що при розширенні інтервалу нагріву до 120 °C система автоматики з ПІД-контролером завжди потребувала перенастроювання, тому що коливальний процес вихідної ординати у часі тривав тривалий час (кілька хвилин). Робота системи автоматики з ПІД&НАК відрізнялася достатньою стійкістю із змінюваною вихідною ординатою 0,2–1,3%, що не перевищувало припустиму помилку для аналізованого процесу (рис. 10).

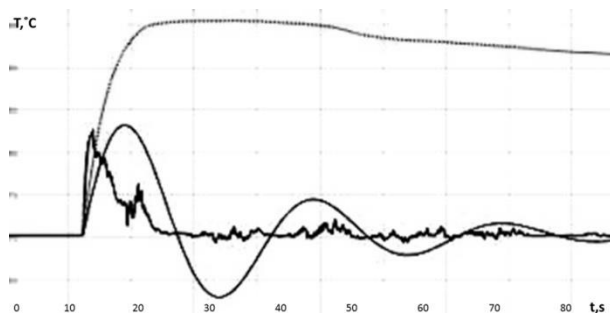


Рис. 10. Моделювання САР для переходів від 90 до 120 °C

3. Пропозиції реалізації блоку НАК.

На базі Matlab & Simulink for Fuzzy Logic Toolbox було створено пробну систему керування з нечіткою логікою. Модель керування включала п'ять датчиків контролю температури в різних частинах електроприводу з інформаційними сигналами в реальному часі. ПІД-регулятор був оснащений трьома датчиками контролю струму у схемі формування сигналів K_p , K_i , K_d . В системі використовувався двопараметричний виконавчий механізм для експериментів з аналого-дискретними приводами, наприклад, вентилятора та приводу жалюзі приточного повітроводу.

Використовуючи експериментальні дані інтервалів значень всіх уставок, була обрана система вхідних функцій, при яких визначалася логіка формування вихідних величин, що дозволяють реалізувати прописані правила шляхом перемикання та зміни передбачених режимів. Як базовий варіант використовувався комплект САР з класичним ПІД-контролером.

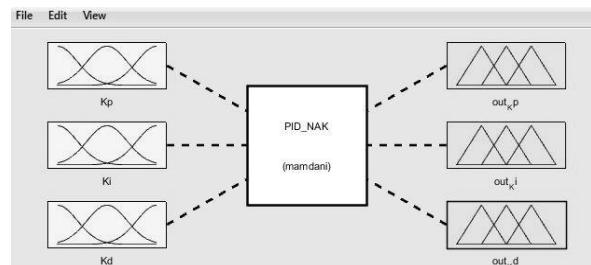


Рис. 11. Стартова сторінка Fuzzy Logic Designer

При розробці блоку НАК використовувалися експерименти з багаторівневими трикутними та Гаусовими функціями. Вибір обумовлений можливістю дискретно і плавно змінювати режими зміни параметрів налаштування.

Початковий проєкт блоку НАК виконувався за допомогою Control System Toolbox™. Для налаштування FIS застосовувалася поверхня керування від вхідних параметрів до виходу з урахуванням проєктних рішень [12]. Нормування області значень вхідних величин виконувалося в інтервалі [-5 5] з використанням вхідних функцій приналежності, які перекривали сусідні функції значення 0,5, що дозволило задавати вихідні функції приналежності. Нечіткі правила формувалися як:

1. IF 'Помилка' IS 'ПомилкаНегативна' THEN 'Вплив' IS 'Зменшити'.
2. IF 'Помилка' IS 'ПомилкаПозитивна' THEN 'Вплив' IS 'Збільшити'.
3. IF 'Інтеграл' IS 'ІнтегралНегативний' THEN 'Вплив' IS 'Зменшити'.
4. IF 'Інтеграл' IS 'ІнтегралПозитивний' THEN 'Вплив' IS 'Збільшити'.
5. IF 'Похідна' IS 'ПохіднаНегативна' THEN 'Вплив' IS 'Зменшити'.
6. IF 'Похідна' IS 'ПохіднаПозитивна' THEN 'Вплив' IS 'Збільшити'.

```

rulelist = {1 1 1 1 1; % Rule 1
           1 2 2 1 1; % Rule 2
           1 3 3 3 1; % Rule 3
           2 1 2 1 1; % Rule 4
           ..... і т.д.
FIS = addRules(FIS,rulelist).

```

Масштабні коефіцієнти від K_p , K_i , K_d мали такі рішення:

$$U = 5; \quad (8)$$

$$U_{kp} = U \cdot \left(K_p - \sqrt{K_p^2 - \frac{4K_i \cdot K_d}{2/K_i}} \right); \quad (9)$$

$$U_{Ki} = \frac{K_i}{U}; \quad (10)$$

$$U_{Kd} = \frac{K_d}{U_{kp}}. \quad (11)$$

На рис. 12 ілюструється набір правил експериментального блоку НАК.

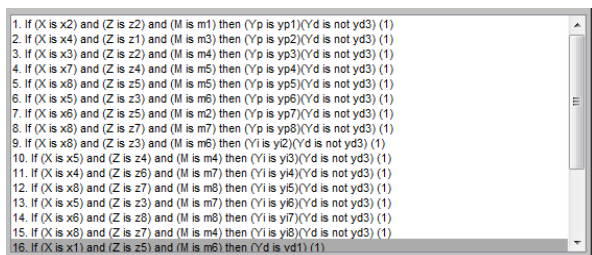


Рис. 12. Вікно редактора правил НАК

Оскільки нелінійні поверхні керування мають змінні значення посилення, це вказує, що помилку регулювання можна істотно змінювати. Якщо помилка має тенденцію до зменшення, ефективність процесу пошуку вихідних величин можна підвищити, застосувавши оновлення вихідних даних в інтерполяційній таблиці. При реалізації цього процесу доцільно передбачити запам'ятовування та вибірку середніх значень поточних величин у точках контролю за температурою реального ОК.

Графічні фрагменти бази правил для розглянутого пристрою (рис. 13) мають змінний характер, але дозволяють зробити певні висновки.

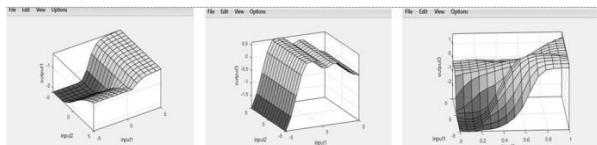


Рис. 13. Фрагменти графічних інтерпретацій вихідних сигналів блоку фазифікації

Оскільки набір правил створюється за допомогою досвідчених даних, будь-яке правило легко перевірити, користуючись, наприклад, двоканальним осцилографом. Зручність візуального аналізу обумовлена можливістю контролю та порівняння вихідних сигналів у варіантах класичного ПД- і нечіткого НАК-регуляторів. При задовільній згоді результатів вимірювань компоненти, що реалізують нечітку логіку, зручно уявити програмними засобами за допомогою додаткового мікроконтролера, що включає не менше 8 портів введення вихідних даних і не менше 3 аналогових виходів. Зважаючи на характеристики популярних мікроконтролерів Arduino, очевидно, що в цьому сімействі є зразки, що відповідають зазначеним вимогам. Наприклад, мікроконтролери ATmega328 або ATmega32U4 з робочою напругою 5 В мають такі характеристики: напруга живлення 6 – 20 В; цифрові входи / виходи 14; аналогові виходи 6; максимальний струм із одного виходу 40 мА; максимальний вихідний струм виводу 3,3, 50 мА; Flash-пам'ять 32 Кб, із яких 0,5 Кб використовують завантажувачем (SRAM 2 Кб; EEPROM 1 Кб; тактова частота 16 МГц) [13].

Враховуючи помірні швидкості обробки даних, збереження розрахункових електричних величин та коригування уставок ПД-регулятора, очевидно, що тактова частота менше 20 МГц цілком придатна для вирішення подібних завдань. Крім відповідності вимог з представленими технічними характеристиками компонентів, слід враховувати змінний характер динамічних властивостей розглянутого ОК, які обов'язково спричинять безперервність процесу пошуку уставок K_p , K_i , K_d в блоці НАК. Щоб виключити такий небажаний режим, слід обмежити інтервали температури, для яких доцільно виконувати пошук уставок з обов'язковим запам'ятовуванням вихідних даних від датчиків контролю до повного завершення налаштування ПД-регулятора відповідного контуру керування. Як показали експерименти, вимушена зупинка САР під час пошуку уставок може тривати від часток до кількох секунд, але такі зупинки найчастіше на результати роботи комплексу ПД&НАК з інерційними тепловими процесами позначаються незначно.

Крім того, якщо мимовільні процеси охолодження обладнання (рис. 2) можна визнати задовільними, то при розробці НАК керування такими подіями в ЕМО можна знехтувати і не створювати автономного контуру керування процесом охолодження. Однак у холодильному обладнанні контур керування процесом охолодження слід обов'язково синтезувати. Очевидно, що доцільність синтезу багатоконтурної системи керування з автономними блоками фазифікації як при нагріванні, так і охолодженні компонентів устаткування завжди визначатиметься розробником.

Експерименти показали, що на реалізацію правил витрачаються невисокі обчислювальні ресурси, і тому блок НАК можна реалізувати за допомогою мікроконтролерів, що випускаються серійно. Якщо виникає брак обсягу Flash-пам'яті, що є в мікроконтролері, то в цьому випадку доцільно використувати модуль для підключення карти SD Arduino. SD-модуль як зовнішній накопичувач дозволить суттєво наростити пам'ять і багаторазово збільшити місце для зберігання корисної інформації, яка отримувалася в реальному часі. Знімний універсальний накопичувач SD є звичайною платою, на якій вміщені слот для карти, що має приблизно такі технічні характеристики: діапазон робочих напруг 4,5 – 5 В; підтримка карти SD до 2 Гб; струм 80 мА; файлова система FAT 16 [13].

Оскільки запропоноване рішення спочатку потребує реальних вихідних даних та попереднього ретельного налаштування класичного ПІД-регулятора, то ці вимоги слід віднести до недоліків комплексу ПІД&НАК, тому що реальну вибірку уставок можна отримати, експериментуючи з конкретним технологічним об'єктом. У табл. 1 наведено приклад результатів експериментів з ПІД-контролерами.

До переваг аналізованого блоку фазифікації слід віднести: відсутність необхідності мати адекватну математичну модель керованого ТО; можливість мимовільного моделювання алгоритму функціонування на основі правил, що відповідають керованим подіям; можливість застосування додаткового кана-

лу керування без взаємодії з основним ПІД-контролером, але за допомогою автономного виконавчого пристрою, що реалізує плавне варіювання коефіцієнта посилення вихідної величини.

Зазначений аналіз може бути привабливим при розробці інтелектуальної системи автоматики з урахуванням існуючої системи з традиційним ПІД-регулятором.

Таблиця 1
Результати моделювання САР

Параметр оцінки	ПІД-регулятор	ПІД&НАК-регулятор
Перерегулювання нормованого перехідного процесу, %	0,9	1,7
Перерегулювання ненормованого перехідного процесу, %	28	4,6
Інтегральний показник якості, с	79	42
Тривалість перехідного процесу, с	91,15	36,62
Транспортне запізнення, с	12	12

У табл. 2 представлені експериментальні дані функціонування комплексу фазифікації, що формує електричні величини UK_n , UK_i , UK_d з нормованим рівнем вихідного сигналу від 0 до 5 вольт.

Таблиця 2
Результати автоматичного формування коригувальних сигналів блоку НАК

Температура нагріву, °С	Налаштовувальні параметри ПІД			Вихідні сигнали НАК			Характеристика вихідного сигналу
	K_n	K_i	K_d	$UK_n, В$	$UK_i, В$	$UK_d, В$	
60	12	$1,7 \cdot 10^{-4}$	11,7	3,11	1.210	2,7	нестабільний
80	12	$1,7 \cdot 10^{-4}$	11,7	4,10	1.105	0,6	монотонний
90	12	$1,7 \cdot 10^{-4}$	11,7	3,52	2.035	1,9	монотонний
100	37	$29,7 \cdot 10^{-4}$	0,7	4,72	3.045	2,9	нестабільний
110	37	$29,7 \cdot 10^{-4}$	0,7	3,81	2.225	2,4	нестабільні
120	26	$29,7 \cdot 10^{-4}$	0,7	4,39	3.305	0,4	монотонний

Зазначена в табл. 2 нестабільність вихідного сигналу, обумовлена низькою стійкістю перешкод електронної схеми в блоці НАК, формує сигнал UK_d . Оскільки не існує систем автоматики, які переважали б над аналогічними за всіма показниками, то вибір розглянутої архітектури комплексу пристрою з ПІД-контролером може привернути до себе увагу розробників, орієнтованих на технологічний регламент та економічне забезпечення апаратного оформлення процесу, коли переслідується підхід, що передбачає доцільність покращення роботи окремих компонентів, що формують керуючу вели-

чину, наприклад, у блоці фазифікації для автоматичного керування конкретним технологічним процесом [14].

Висновки

У роботі розглянуто моделі двох типів регуляторів у середовищі Matlab. Нечіткий регулятор з автономним блоком фазифікації, що реалізує нечіткий алгоритм вибору налаштовувальних параметрів, дозволяє покращити якість керування класичного ПІД-регулятора, застосування якого можливе без взаємодії з виконавчою частиною комплексу засобів

діючої автоматики, але з додатковим виконавчим пристроєм для плавного впливу на тепловий режим кошовного обладнання. Отримані результати експериментів дозволяють зробити такі висновки:

1. При мінливих динамічних властивостях технологічного об'єкта САР із нечітким регулятором ефективно скорочує час перехідного процесу.

2. Керувальна величина САР з ПД-регулятором супроводжується гармонійними коливаннями, коли виникає невідповідність налаштувань регулятора динамічним властивостям, що змінилися в ТО.

3. Зміни керувальної величини САР з ПД&НАК-регулятором залишаються незначними тривалий час, що обумовлено необмеженим у часі пошуком значень параметрів ПД-регулятора в експериментальному пристрої.

4. Найменше перерегулювання у САР з нечітким регулятором пояснюється повільним і поступовим виходом на режим, що встановився, який супроводжується несуттєвим варіюванням положення виконавчого пристрою.

5. Переваги перехідного процесу САР з ПД&НАК обумовлено автоматичним налаштуванням уставок регулятора.

Література

- Yesil E. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of pid controllers / E. Yesil, M. Guzelkaya, I. Eksin // *Proceedings of the Biannual World Automation Congress, Seville (Spain), June 28 – July 01, 2004 yr.* – New Jersey : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2017. – Vol. 17 – P. 501–506. – Regime of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1439416>, free (date of the application: 23.10.2023).
- Єсаулов С. М. Дослідження, моделювання і проектування компонентів штучного нейронного модуля для дистанційної теплової діагностики електродвигунів / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, Х. О. Рогожина // *Комуніальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура.* – 2019. – № 5 (151). – С. 13–22. – Режим доступу: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5438/5362>, вільний (дата звернення: 23.10.2023).
- Lamamra K. A new technique with improved control quality of nonlinear systems using an optimized fuzzy logic controller / K. Lamamra, F. Batat, F. Mokhtari // *Expert Systems with Applications.* – 2020. – Vol. 145. – Article 113148. – DOI: [10.1016/j.eswa.2019.113148](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113148).
- Mann G. K. I. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures / G. K. I. Mann, B.-G. Hu, R. G. Gosine // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics).* – 1999. – Vol. 29 (3). – P. 371–388. – DOI: [10.1109/3477.764871](https://doi.org/10.1109/3477.764871).
- Єсаулов С. М. Підвищення ефективності теплового діагностичного контролю справності електродвигунів / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, М. М. Ковалик // *Комуніальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура.* – 2020. – № 4 (157). – С. 163–171. – DOI: [10.33042/2522-1809-2020-4-157-163-171](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-4-157-163-171).
- Єсаулов С. М. Синтез компонентів теплового діагностичного експерта зі штучним нейроном / С. М. Єсаулов, О. Ф. Бабічева, Д. О. Акіншин // *Комуніальне господарство міст. Серія: Технічні науки та архітектура.* – 2021. – № 1 (161). – С. 148–156. – DOI: [10.33042/2522-1809-2021-1-161-148-156](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-148-156).
- Mamdani E. H. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // *International Journal of Man-machine Studies.* 1975. – Vol. 7. – P. 1–13. – Regime of access: https://www.academia.edu/3384327/An_Experiment_in_Linguistic_Synthesis_with_a_Fuzzy_Logic_Controller, free (date of the application: 23.10.2023).
- Astrom K. J. Advanced PID control / K. J. Astrom, T. Hagglund. – Research Triangle Park, NC (USA) : ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 460 p. – Regime of access: <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:001975694>, free (date of the application: 23.10.2023).
- Sabri L. A. Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level System using LabView / L. A. Sabri, H. A. Al-Mshat // *International Journal of Computer Applications.* – 2015. – Vol. 116 (11). – P. 6–10. – DOI: [10.5120/20378-2599](https://doi.org/10.5120/20378-2599).
- MATLAB. The Language of Technical Computing. Getting Started with MATLAB / The Math Works, Inc. – Version 5. – Natick, MA (USA) : The Math Works, 1996. – 105 p. – Regime of access: <http://www.eio.upc.es/iceio/manuals/matlab/TECHDOC/PDFDOCS/GETSTART.PDF>, free (date of the application: 23.10.2023).
- Model-Based Design with Simulink [Electronic resource] / The Math Works, Inc. : website. – Natick, MA (USA), 1994–2023. – Regime of access: <https://www.mathworks.com/help/simulink/gs/model-based-design.html>, free (date of the application: 23.10.2023).
- Talbi N. Design of Fuzzy Controller rule base using Bat Algorithm / N. Talbi // *Energy Procedia.* – 2019. – Vol. 162. – P. 241–250. – DOI: [10.1016/j.egypro.2019.04.026](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.026).
- Arduino Documentation. Arduino as ISP and Arduino Bootloaders I [Electronic resource] / Arduino : website. – Ivrea (Italy), 2023. – Regime of access: <https://docs.arduino.cc>, free (date of the application: 23.10.2023).
- Chen J. Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control / J. Chen, T.-C. Huang // *Journal of Process Control.* – 2004. – Vol. 14 (2). – P. 211–230. – DOI: [10.1016/S0959-1524\(03\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(03)00039-8).

References

- Yesil, E., Guzelkaya, M., & Eksin, I. (2004). Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of pid controllers. *Proceedings of the Biannual World Automation Congress: Vol. 17* (pp. 501–506). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/document/1439416>
- Yesaulov, S. M., Babicheva, O. F., & Rohozhyna, Kh. O. (2019). Control and modeling parameters for heat diagnostics of power electrical equipment failure. *Municipal Economy of Cities. Series: Engineering science and architecture*, 5(151), 13–22. Retrieved from <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/view/5438/5362/> [in Ukrainian]
- Lamamra, K., Batat, F., & Mokhtari, F. (2020). A new technique with improved control quality of nonlinear systems using an optimized fuzzy logic controller. *Expert Systems with Applications*, 145, 113148. DOI: [10.1016/j.eswa.2019.113148](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113148)
- Mann, G. K. I., Hu, B.-G., & Gosine, R. G. (1999). Analysis of direct action fuzzy PID controller structures. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 29(3), 371–388. DOI: [10.1109/3477.764871](https://doi.org/10.1109/3477.764871)
- Yesaulov, S. M., Babicheva, O. F., & Kovalyk, M. M. (2020). Increasing the efficiency of thermal diagnostic control of electric motors. *Municipal Economy of Cities. Series: Engineering science and architecture*, 4(157), 163–171.

- DOI: [10.33042/2522-1809-2020-4-157-163-171](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-4-157-163-171) [in Ukrainian]
6. Yesaulov, S. M., Babicheva, O. F., & Akinshyn, D. O. (2021). Synthesis of thermal diagnostic expert components with an artificial neuron. *Municipal Economy of Cities. Series: Engineering science and architecture*, 1(161), 148–156. DOI: [10.33042/2522-1809-2021-1-161-148-156](https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-1-161-148-156) [in Ukrainian]
7. Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-machine Studies*, 7, 1–13. Retrieved from https://www.academia.edu/3384327/An_Experiment_in_Linguistic_Synthesis_with_a_Fuzzy_Logic_Controller
8. Astrom, K. J., & Hagglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. Retrieved from <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:001975694>
9. Sabri, L. A., & Al-Mshat, H. A. (2015). Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level System using LabView. *International Journal of Computer Applications*, 116(11), 6–10. DOI: [10.5120/20378-2599](https://doi.org/10.5120/20378-2599)
10. The Math Works, Inc. (1996). *MATLAB. The Language of Technical Computing. Getting Started with MATLAB (Version 5)*. The Math Works. Retrieved from <http://www-eio.upc.es/lceio/manuals/matlab/TECHDOC/PDFDOCS/GETSTART.PDF>
11. The Math Works, Inc. (2023). *Model-Based Design with Simulink*. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/simulink/gs/model-based-design.html>
12. Talbi, N. (2019). Design of Fuzzy Controller rule base using Bat Algorithm. *Energy Procedia*, 162, 241–250. DOI: [10.1016/j.egypro.2019.04.026](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.04.026)
13. Arduino. (2023). *Arduino Documentation. Arduino as ISP and Arduino Bootloaders I*. Retrieved from <https://docs.arduino.cc>
14. Chen, J., Huang, T. (2004). Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control. *Journal of Process Control*, 14(2), 211–230. DOI: [10.1016/S0959-1524\(03\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(03)00039-8)

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Клепиков, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

Автор: ЄСАУЛОВ Сергій Михайлович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричного транспорту
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – ut9li@ukr.net
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3274-716X>

Автор: ХВОРОСТ Микола Васильович
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – mykola.khvorost@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2606-8228>

Автор: БАБІЧЕВА Ольга Федорівна
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричного транспорту
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – olga.babicheva@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1294-2740>

Автор: НАЙДЬОНОВ Максим Олександрович
студент навчально-наукового інституту енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – maksym.naidonov@kname.edu.ua

APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN THE CONTROL SYSTEM OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT

S. Yesaulov, M. Khvorost, O. Babicheva, M. Naidonov

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article considers the option of solving the problem of automatic selection of settings of proportional-integral-differential (PID) regulators to control the thermal process with chaotically changing dynamic properties. Based on analytical and experimental data, it illustrates the influence of various factors on changes in the dynamic properties of electromechanical equipment (EME) when heated during operation. The work of classical and fuzzy PID controllers was investigated using simulation models in Matlab and Simulink environments. The article illustrates the expediency of changing the configuration charts of the PID regulator when controlling the process, which can be carried out with the help of a phasing unit that implements variants of the rules for controlling the signals of the charts. The Control System Toolbox™ application was used to determine the application rules for adjusting electrical values. The attractive nature of the changes in the transition processes reflects the graphical and tabular data. Transient processes in a nonlinear control algorithm (NCA) are characterised by improved parametric characteristics. To increase the accuracy of the chart settings, it is advisable to use data from actual thermal events that determine perturbing variables. Realisation of the above-mentioned intelligent device for automatic setting of the real-time regulator, providing the formation of a more accurate output of the control signal, determines the advantages of the proposed engineering solution and the feasibility of its use at similar technological facilities. In the article, the practical implementation of fuzzy logic with the help of the Arduino family microcontroller is recommended. In addition, the stand-alone NCA unit can be used with an additional actuator for smoother thermal control during the operation of EM components, while maintaining the same basic automation system with a classic PID controller.

Keywords: electromechanics, automation, controller, microcontroller, modelling, electronic model, fuzzy logic, algorithm, controller settings.