https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-21
УДК 004

ЮХИМЧУК Марія
Вінницький національний технічний університет
umc1987@vntu.edu.ua
СТРЕМБІЦЬКИЙ Павло
Вінницький національний технічний університет
Mateyuk2@gmail.com
ЛЕЩЕНКО Юлія
Вінницький національний технічний університет
ytaraniuk@gmail.com
МОРОЗ Ігор
Вінницький національний технічний університет
Igor3003moroz@gmail.com
ПЕРЕПЕЛИЦЯ Станіслав
Вінницький національний технічний університет
stanislau3@gmail.com

КООРДИНАЦІЯ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

У даній статті розглянуто проблему координації РКФС в умовах комбінованої стохастичної та нечіткої невизначеності. Досліджено вплив різних факторів на ефективність координації РКФС і запропоновано оптимізаційний критерій для оцінки стану системи.

Ключові слова: Розподілена кібер-фізична система (РКФС), операторні моделі, нечітка координація, оптимізація.

YUKHYMCHUK Mariya, STREMBITSKYI Pavlo,
LESHCHENKO Yuliya, MOROZ Ihor, PEREPELYTSIA Stanislav
Vinnytsia national technical university

COORDINATION UNDER CONDITIONS OF COMBINED UNCERTAINTY

In this publication, we consider the problem of coordination of industrial control systems (ICS) under combined uncertainty, which includes stochastic and fuzzy uncertainty. Uncertainty can arise from various sources, such as expert forecasts, changes in the production program over time, and statistical identification of the parameters of the mutual influence of objects. The nonlinearity of the control law adds to the complexity of the study.

The paper considers the case of a DCPS with combined fuzzy and relay control on the example of a thermal control system for a multi-zone facility. A block diagram of such a system is presented and key components, such as a fuzzy coordinator and relay controllers, are described. The adjustable parameters of the system are the heater power and the width of the hysteresis zone of the local relay controllers.

To achieve optimal control under conditions of uncertainty, the paper uses operator models and generalizing uncertainty functions. The authors propose an optimization criterion based on the standard deviation of the uncertainty functions from the set temperature parameters.

The study was performed using the Scilab/Xcos software system, where the generalizing functions were calculated in parallel in one simulation cycle. Experimental data show that there is an optimal value of the width of the hysteresis zone for each level of random effects, which ensures minimal control uncertainty. In addition, increasing the power of the energy source reduces the uncertainty, but leads to an increase in the frequency of self-oscillations and, as a result, to a decrease in system reliability.

The paper also addresses the issue of coordination of DCPS under uncertainty, investigating the robustness of these systems and the possibility of decentralized coordination under uncertainty.

As a result, the paper provides an important contribution to the understanding of the problems of coordinating DCPS under combined uncertainty and provides useful insights into the optimal management of such systems.

Keywords: Distributed cyber-physical system (DCPS), operator models, fuzzy coordination, optimization

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Постановка проблеми в даній статті полягає у вивченні координації РКФС (розподілені керуючі фазові системи) в умовах комбінованої невизначеності, що включає стохастичну та нечітку невизначеність. Дослідження орієнтоване на вирішення проблем, які виникають у процесі керування складними технічними системами, особливо тими, які мають нелінійні закони керування.

Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [1] наведено дані про проблему створення високоточних та надійних систем керування з використанням елементів штучного інтелекту. Робота також включає розробку алгоритму, який дозволяє

формулювати рекомендації щодо зміни гідравлічних та температурних параметрів системи опалення та параметрів налаштування системи керування.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: оцінка енергоспоживання в системах релейного керування з елементами штучного інтелекту та використання цієї інформації для керування тепловим об'єктом.

Виклад основного матеріалу

РКФС часто працюють в умовах комбінованої стохастичної та нечіткої невизначеності. Така невизначеність може виникнути, зокрема, в результаті поєднання експертного прогнозу змін виробничої програми у часі $\mathbf{X}(t)$ і статистичній ідентифікації параметрів взаємного впливу елементів об'єкта $\mathbf{\Lambda}$. Дослідження РКФС додатково ускладнюється нелінійністю закону керування ЛСК.

Розглянемо РКФС з комбінованим нечітким та релейним керуванням на прикладі системи теплового керування багатозональним об'єктом.

Структурна схема двохзональної РКФС з нечітким координатором і релейним регулятором для двохзонального об'єкта зображено на рис. 1. На схемі: FC – нечіткий координатор; H – джерело енергії; Z1, Z2 – зони; S – сенсори; R1, R2 — локальні релейні регулятори.

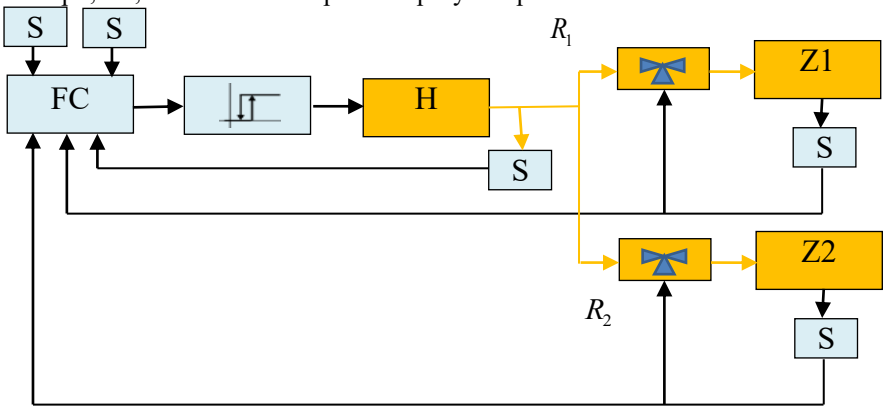

Рис. 1 – Структурна схема системи нечіткого термостатування

Регульованими параметрами системи є потужність нагрівача H і ширина зони гістерезису місцевих реле-регуляторів R1, R2. При нечіткому алгоритмі керування розрахунок оптимальної потужності джерела енергії і частоти спрацьовування реле-регуляторів виконується нечітким координатором. [1].

Використовуючи операторні моделі [2] та структурну схему системи регулювання температури в зонах, імітаційна схема системи на рис. 1 набуває вигляду, зображеного на рис. 2.

Складені оператори нечіткого регулятора FC, нагрівача H та елементів об'єкта Z1 і Z2 з урахуванням динамічних і нелінійних властивостей відповідних об'єктів є

$$\Phi_{FC} = \Phi_{FC}^{(n)}\Phi_{FC}^{(1)}; \tag{1}$$

$$\Phi_{H} = \Phi_{H}^{(n)}\Phi_{H}^{(1)}; \tag{2}$$

$$\Phi_{Z_i} = \Phi_{Z_i}^{(n)}\Phi_{Z_i}^{(1)}, \tag{3}$$

де нелінійні властивості описує оператор $\Phi^{(1)}$, а динамічні властивості - оператор $\Phi^{(n)}$.

Критерій оптимізації можна оцінити як стандартне відхилення функцій невизначеності щодо заданих температур.

$$K = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \sqrt{\int_{D_t} \left(t - t_{pi}\right)^2 \beta_{ti}(t)dt} \tag{4}$$

де $\beta_{ti}(t)$ - узагальнюючі функції невизначеності [2]; n - кількість зон; t_{pi} - задана температура в i-й зоні; w_i - вагові коефіцієнти: $w_i > 0$, $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$.

Для моделювання використовувалася система Scilab/Xcos.

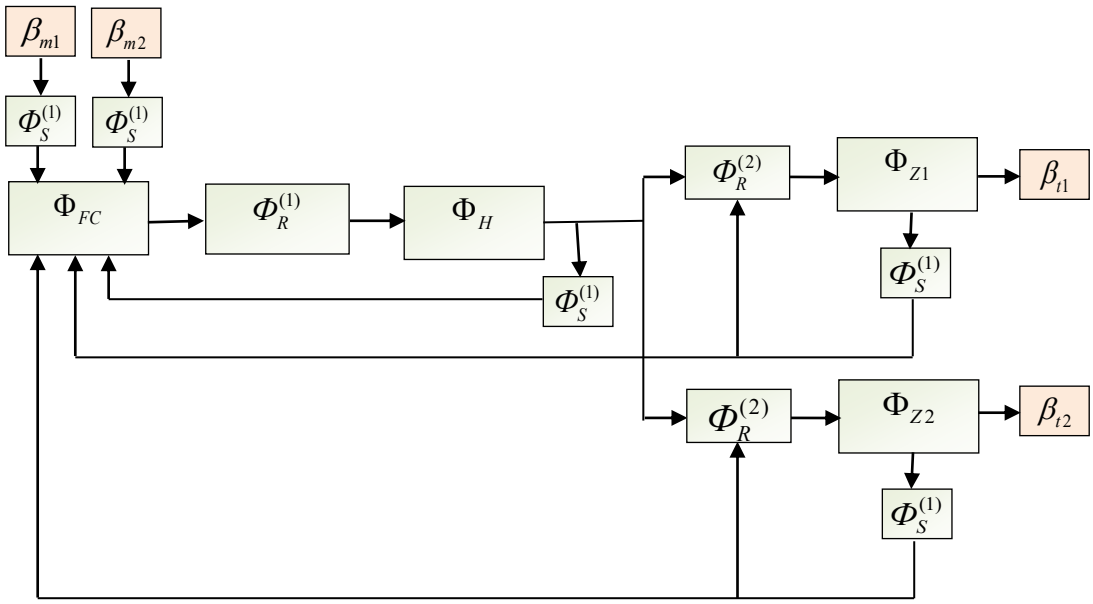

Рис. 2– Імітаційна схема системи регулювання температури; (v_1, v_2)сигнали датчиків стану; (t_1, t_2)задані температури зон.

Для паралельного обчислення всіх значень узагальнюючих функцій в одному циклі моделювання узагальнюючі функції були визначені як вектори значень на заданій сітці аргументів. Блок визначення початкових узагальнюючих функцій для 5 значень аргументу наведено на рис.3а. Вибір кількості значень аргументів і функцій зумовлений використанням у структурі системи нечіткого регулятора для оцінки узагальненої функції невизначеності керування нагрівачем. Це впливає на кількість правил. Правила бази знань передбачають використання 5 лінгвістичних термінів: «низький», «нижче середнього», «середній», «вище середнього», «високий».

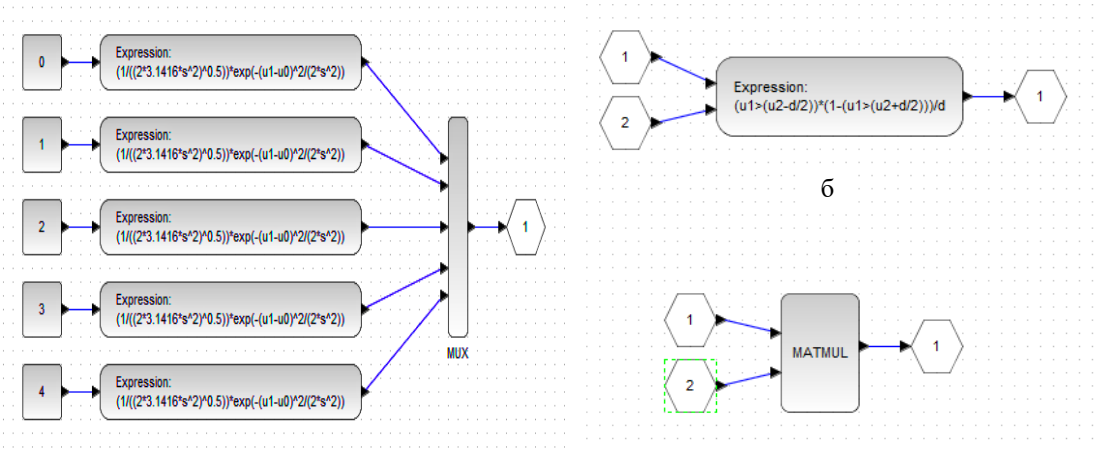

Рис. 3. Основні блоки моделі: а – Блок визначення початкових узагальнюючих функцій; б – діаграма розрахунку для дельта-функції; в - згорткове перетворення

При дискретності представлення узагальнюючої функції дельта-функція Дірака представляється у вигляді імпульсу шириною Δ та висотою $1/\Delta$, де Δ – крок дискретної зміни аргументу. Структурна схема для обчислення дельта-функції показана на рис.3б.

Інтегральне перетворення згортки, на якому базується розрахунок усіх операторів, виконується у векторно-матричній формі:

$$\hat{\beta}(y) = F[x, y] \times \hat{\beta}^T(x),$$

де $\hat{\beta}(y)$ вектор-рядок дискретних значень узагальнюючої функції; $\hat{\beta}(x)$ вектор-рядок дискретних значень узагальнюючої функції вхідного процесу; $F[x, y]$ матриця дискретних значень ядра перетворення; T це операція транспонування. Блок виконання перетворення показаний на рис.3.

У результаті чисельного моделювання визначено залежності показника невизначеності (тобто критерію оптимізації) стану багатозонального об'єкта керування від ширини зони гістерезису локальних регуляторів (рис. 4) та потужності джерела енергії (рис. 5) отримані для різних рівнів випадкових впливів на об'єкт σ.

Залежності $K(\sigma, b)$ показують, що для кожного рівня випадкових впливів існує оптимальне значення ширини зони гістерезису b_{opt}, яке забезпечує мінімальну невизначеність керування. Крім того, наявність залежності від рівня впливу говорить про те, що релейне керування повинно мати змінні параметри для досягнення оптимальної роботи.

Залежності $K(\sigma, H)$ показують, що збільшення потужності джерела енергії зменшує невизначеність. Однак, це також призводить до збільшення частоти автоколивань і, як наслідок, до зниження надійності системи [1].

Залежність на рис. 5а отримано для об'єкта з однією зоною, а на рис. 5б з трьома зонами. Ці дані свідчать про те, що збільшення кількості зон згладжує критерій оптимізації.

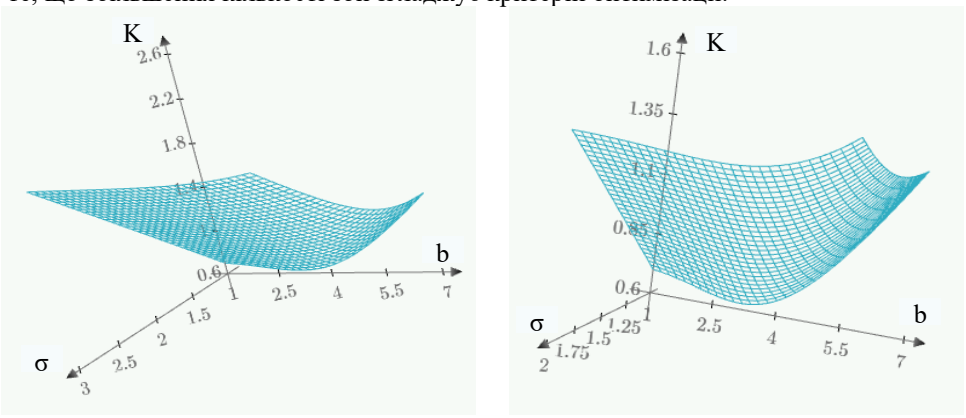

Рис. 4. Залежності показника невизначеності стану багатозонального об'єкта керування від ширини зони гістерезису локальних регуляторів та рівня випадкових впливів

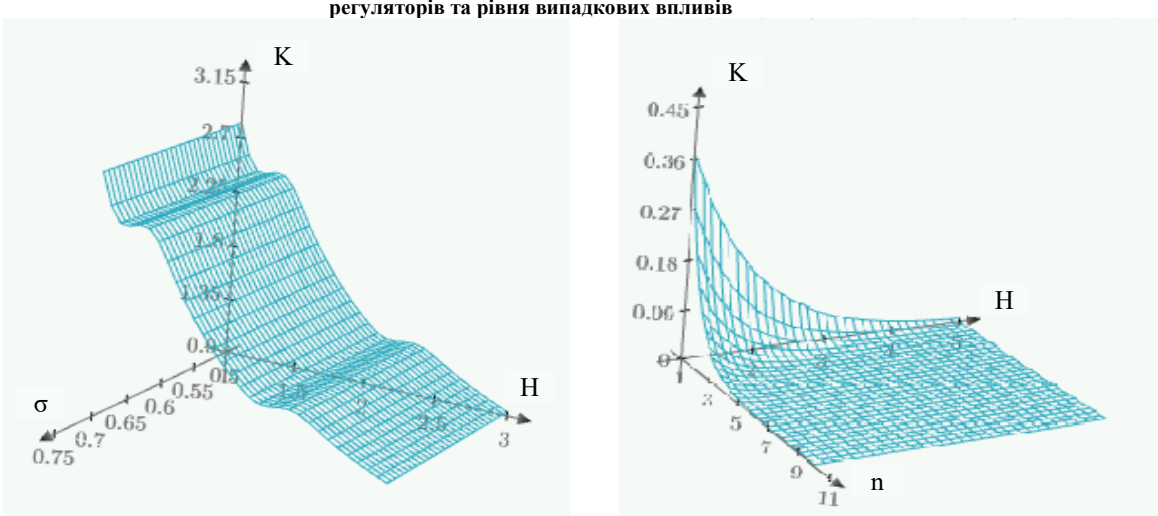

Рис. 5. Залежності показника невизначеності стану багатозонного об'єкта керування від потужності джерела енергії та рівня випадкових впливів

У складних системах з дискретними станами і логічною функцією переходів керування здійснюється в основному на основі ситуаційного підходу [3]. Множина ситуацій і переходів між ними

утворюють ситуативну мережу. Для динамічних систем, керованих на основі ситуаційних моделей, був запропонований ситуаційно-подієвий підхід [4]. У [5] досліджено вплив ймовірностей переходу та надійності виявлення ситуацій на ефективність системи. Використання нечіткої логіки для ідентифікації ситуації керування у поєднанні з статистичним прогнозуванням її зміни дає змогу підвищити достовірність ідентифікації і скоротити втрати.

Процес керування станом системи супроводжується витратами $q_{rij}(\boldsymbol{V}_{0i}, \boldsymbol{V}_{0j}, \boldsymbol{V}, W(s_i, s_j))$, де $\boldsymbol{V}_0$ є матрицею параметрів заданих станів системи; $\mathbf{V}$ - вектор керованих параметрів системи; W - закон (алгоритм) керування; $s(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{F}, \boldsymbol{\Theta})$ - ситуація керування; S_i, S_j, $\boldsymbol{V}_{0i}$, $\boldsymbol{V}_{0j}$ - початкова і кінцева ситуації процесу керування і відповідні вектори керованих параметрів.

Неправильна ідентифікація ситуації призводить до додаткових втрат для переведення системи в адекватний стан. Процес у цьому випадку показаний у вигляді графа на рис.4.18. На рисунку початкова ситуація S_i, нова ситуація S_j, але внаслідок неправильної ідентифікації ситуації система керування почала змінювати параметри стану відповідно до ситуації S_k. Протягом часу τ_1 вдосконалення оцінки ситуації і процес керування переходить у режим зміни параметра відповідно до ситуації S_j.

Оскільки процес використання ресурсів є адитивним, то за теоремою про трикутник

$$q_{rik}\left[\mathbf{V}_{0i}, \mathbf{V}_{0k}, \mathbf{V}, W(s_i, s_k)\right] + q_{rkj}\left[\mathbf{V}_{0k}, \mathbf{V}_{0j}, \mathbf{V}, W(s_k, s_j)\right] > q_{rij}\left[\mathbf{V}_{0i}, \mathbf{V}_{0j}, \mathbf{V}, W(s_i, s_j)\right], \quad (4)$$

і додаткові втрати складатимуть

$$\Delta q_r = q_{rik} + q_{rkj} - q_{rij} \ .$$

Неправильна ідентифікація ситуації зазвичай пов'язана з невизначеністю оцінок параметрів ситуації. Під час перехідного процесу $(0, \tau_1)$ інтервал оцінок скорочується. RMSE зменшується до

$$\sigma_{at} = \frac{\sigma_s(t=0)}{\tau_1 / T} \ ,$$

де σ_{at} - радіус кластеру у просторі оцінок ситуації, в межах якої ситуація правильно ідентифікується; $\sigma_s(t=0)$ - RMSE оцінки ситуації в початковий момент; T - період оцінювання ситуації (для випадку дискретного оцінювання) або інтервал кореляції (для випадку безперервного оцінювання).

Звідси отримуємо час ідентифікації ситуації із заданою вірогідністю

$$\tau_1 = T\frac{\sigma_s(t=0)}{\sigma_{at}} \quad (5)$$

Процес прийняття рішення щодо ідентифікації ситуації передбачає операції вимірювання параметрів, визначення належності їх до певного діапазону і прийняття рішення з використанням логічних правил.

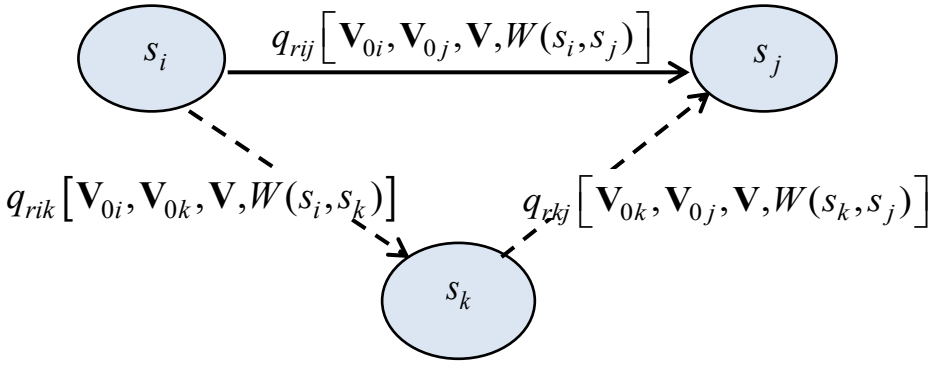

Рис. 7. Випадок неправильної ідентифікації ситуації

На рис. 6 показана структурна схема, на якій сенсор S вимірює параметри стану об'єкта ОМ. Вимірювальний сигнал надходить на компаратор для контролю належності параметра до зони допуску. Якщо стан об'єкта характеризується вектором параметрів, то для визначення стану об'єкта необхідна логічна обробка його параметрів за допомогою логічного пристрою.

Логічний пристрій СА (ситуаційний аналізатор) має n входів і $M = \prod_{i=1}^{n} m_i$ виходів, де m_i кількість станів *i*-го параметра. Наявність збурень *f* призводить до періодичних змін результатів ідентифікації. Схема системи включає фільтр *F*, щоб уникнути цього явища.

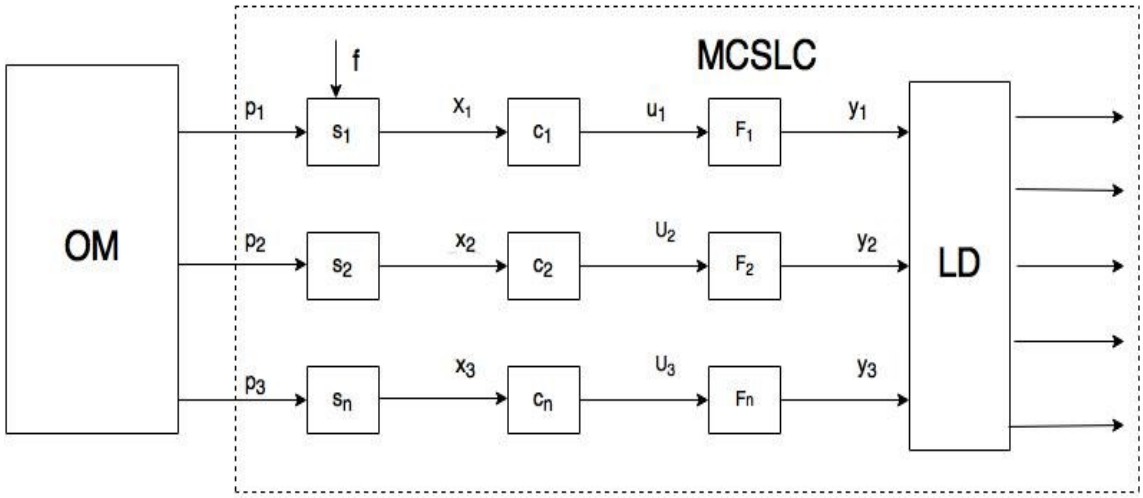

Рис. 6. Узагальнена схеми ідентифікації ситуації

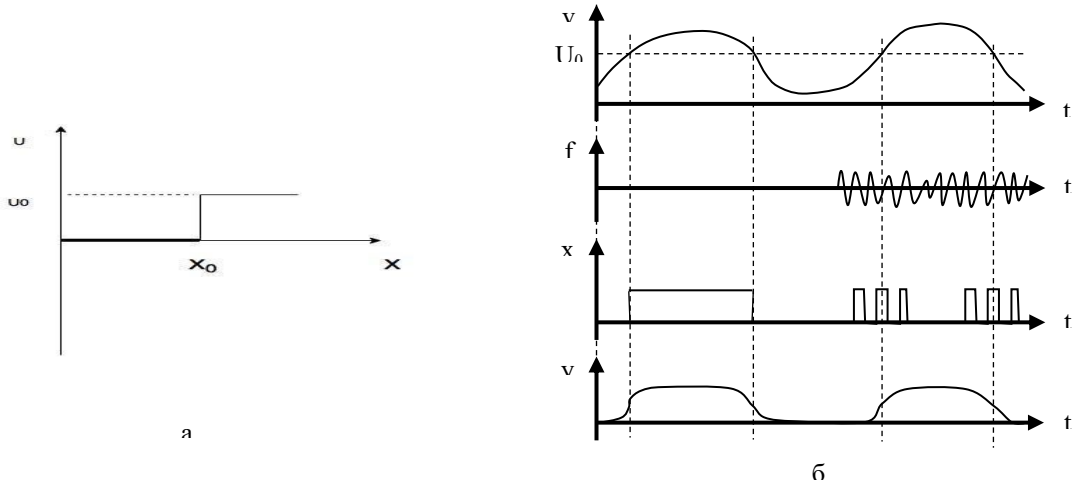

Рис. 8. Перетворення аналогового вхідного сигналу в дискретну форму за допомогою компаратора

Процес релейної стабілізації стану об'єкта характеризується періодичним спрацьовуванням реле, в результаті зміна стану об'єкту є коливальним процесом. На рис. 8а зображено приклад характеристики елементного реле з двома вихідними станами, а на рис. 4.20б показано випадок зміни сигналу в системі.

Така система моделюється нелінійними, яку важко розв'язати та дослідити. Тому для спрощення дослідження використано гармонічну лінеаризацію. Особливістю методу гармонічної лінеаризації для таких систем є знаходження коефіцієнтів гармонічної лінеаризації шляхом розкладання вихідного сигналу таких систем у кратний ряд Фур'є.

Зробимо перетворення Фур'є вихідних сигналів, в результаті отримуємо систему рівнянь. Розв'язавши систему рівнянь, отримуємо наступну функцію лінеаризації входу/виходу:

$$F(x,\dot{x},y,\dot{y},R)=\frac{a_{10}(A,\omega,\phi,R)}{A_y\omega}A_y\omega\cos\omega t+\frac{a_{01}(A,\omega,\phi,R)}{A_x\omega}A_x\omega\cos\omega t+$$
$$+\frac{b_{01}(A,\omega,\phi,R)}{A_x}A_x\sin(\omega t+\phi)+\frac{c_{10}(A,\omega,\phi,R)}{A_y}A_y\sin\omega t. \quad (4.39)$$

Коефіцієнти $a_{10},a_{01},b_{01},c_{10}$ є функціями параметрів вхідного сигналу A,ω,φ та параметрів компаратора С.

Якщо позначити:

$$\frac{c_{10}(A,\omega,\varphi,R)}{A_y}=q_y(A,\omega,\varphi,R); \quad (4.40)$$

$$\frac{a_{10}(A,\omega,\varphi,R)}{A_y\omega}=q_y'(A,\omega,\phi,R), \quad (4.41)$$

отримаємо:

$$F(x,\dot{x},y,\dot{y},R)=q_y(A,\omega,c_x,c_y,b_x,b_y)y+\frac{q_y'(A,\omega,c_x,c_y,b_x,b_y)}{\omega}\dot{y}, \quad (4.42)$$

де $q_y(A,\omega,\phi,c_x,c_y,b_x,b_y)$, $q_y'(A,\omega,\phi,c_x,c_y,b_x,b_y)$ – коефіцієнти гармонічної лінеаризації.

Лінеаризація ситуаційного аналізатора СА здійснюється шляхом переходу від логічних операцій до арифметичного базису (додавання; множення на -1). Тоді основні операції диз'юнкції та інверсії, за допомогою яких будь-яке логічне перетворення можна розкласти на арифметичні операції:

$$\bar{l}\Rightarrow 1-a,\ l_1\vee l_2\Rightarrow a_1+a_2-a_1a_2.$$

У цьому базисі можна записати всі логічні операції. Деякі з них наведені в таблиці 1.

Завдяки множенню в цьому арифметичному розкладанні кінцеве арифметичне перетворення підлягає лінеаризації.

Таблиця 1.

Декомпозиція логічних операцій

Логічна операція	Операція у базісі АБО-НІ	Арифметичне розкладання
$\bar{l}$	$\bar{l}$	$1-a$
$l_1\wedge l_2$	$l_1\vee l_2$	$a_1+a_2-a_1a_2$
$l_1\wedge l_2$	$\overline{\bar{l}_1\vee\bar{l}_2}$	$a_1\cdot a_2$
$l_1\oplus l_2$	$\overline{l_1\vee l_2}\vee\overline{\bar{l}_1\vee\bar{l}_2}$	$1-a_1-a_2+2a_1a_2$
…	…	…

Невизначеність результату контролю залежить від статистичних характеристик збурень. Для лінеаризованої системи с.к.в. результату контролю є лінійною комбінацією середньоквадратичних відхилень збурень з коефіцієнтами, рівними коефіцієнтам лінеаризації. Оцінимо невизначеність результату контролю лінеаризованої системи, за відомою формулою:

$$\textit{якщо } y=\sum_{i=1}^{n}a_ix_i \ \textit{ тоді } \delta_y=\sum_{i=1}^{n}a_i\delta_i,$$

де a_i – коефіцієнти лінеаризації, δ_{xi} - с.к.в. вхідних збурень, δ_y - с.к.в. вихідних результатів.

Для дослідження відповідності математичних моделей використовувався пакет програм для моделювання Simulink. Модель автоматичної системи з СА у середовищі Simulink, наведена на рис. 9.

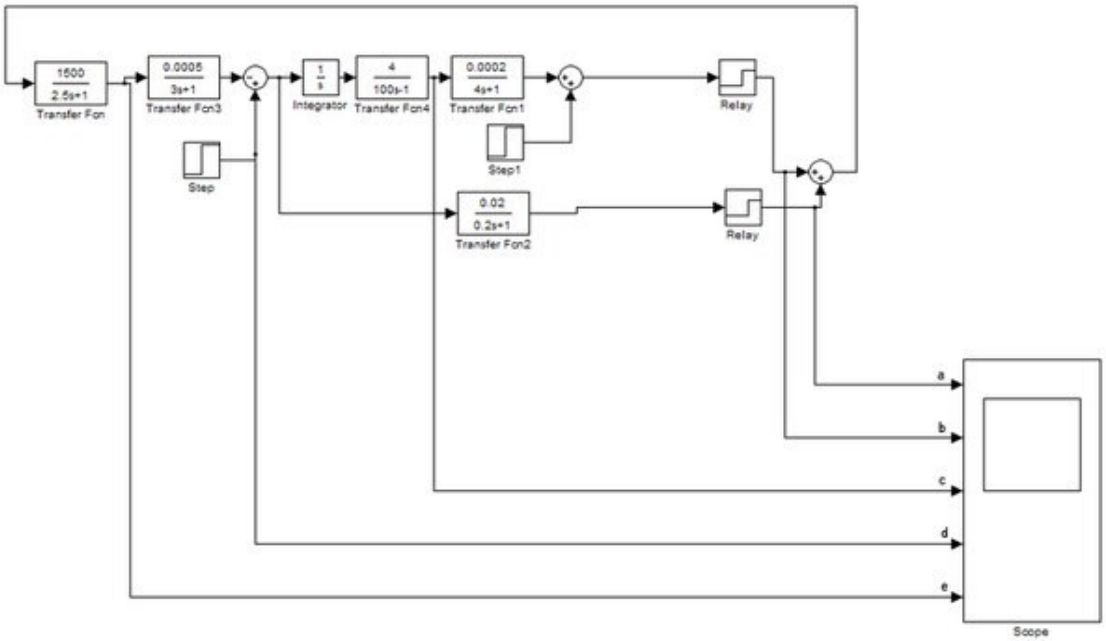

Рис. 9. Модель ЛСК з ситуаційним аналізатором в середовищі Simulink

Результати моделювання наведені на рис. 10: а, б, г – ступінчасті вихідні сигнали компараторів, на рис. 10в – перша гармоніка розкладу сигналу, на рис. 10д – імпульсний сигнал.

Межі параметрів, що забезпечують допустиму невизначеність, визначалися за сукупністю результатів моделювання. Результати представлені в таблиці 2.

а

б

в

г

д

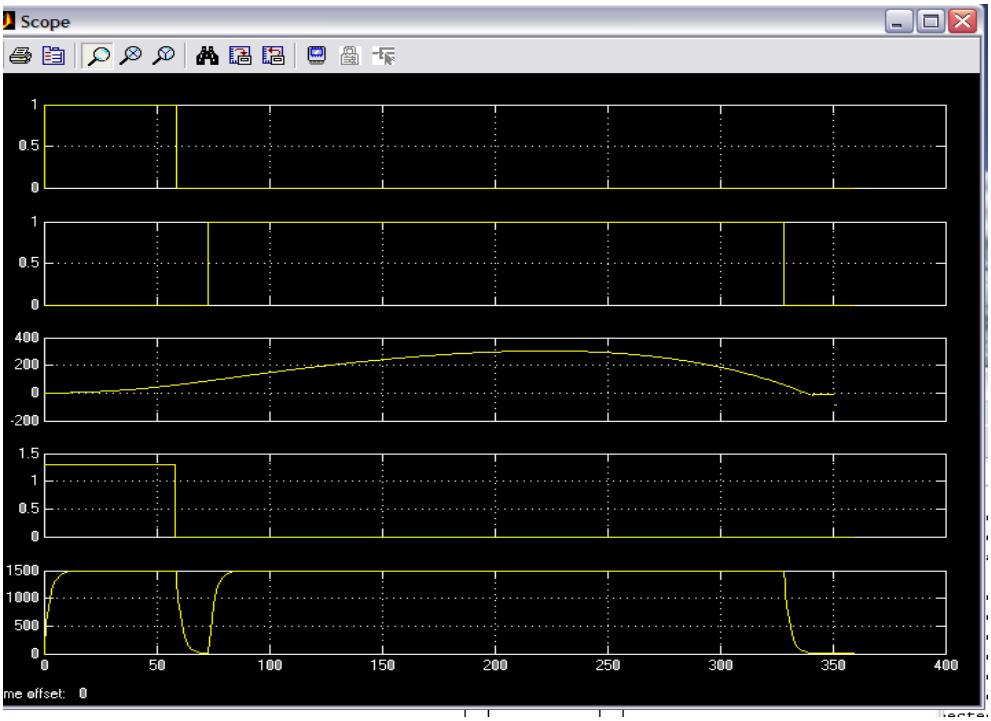

Рис. 10. Результати автоматичної системи моделювання з логічними умовами при

$$U_1 = 1, U_2 = 0.8, b_x = 10^{-2}, b_y = 5 \cdot 10^{-2}$$

Таблиця 2.

Результати аналізу адекватності

Результати аналітичного оцінювання границь допустимої системної невизначеності		**Результати оцінювання меж допустимої системної невизначеності шляхом моделювання в Simulink**		**Оцінка помилок**	
$b_y \cdot 10^{-2}$	U_2	$b_y \cdot 10^{-2}$	U_2	Δb_y	ΔU_2
0.5	0.8	0.55	0.77	0.05	0.03
0.5	0.5	0.52	0.46	0.03	0.04
0.4	0.8	0.42	0.79	0.02	0.01
0.3	0.8	0.33	0.81	0.03	0.01
0.2	0.8	0.21	0.83	0.01	0.03
0.15	0.4	0.17	0.44	0.02	0.04

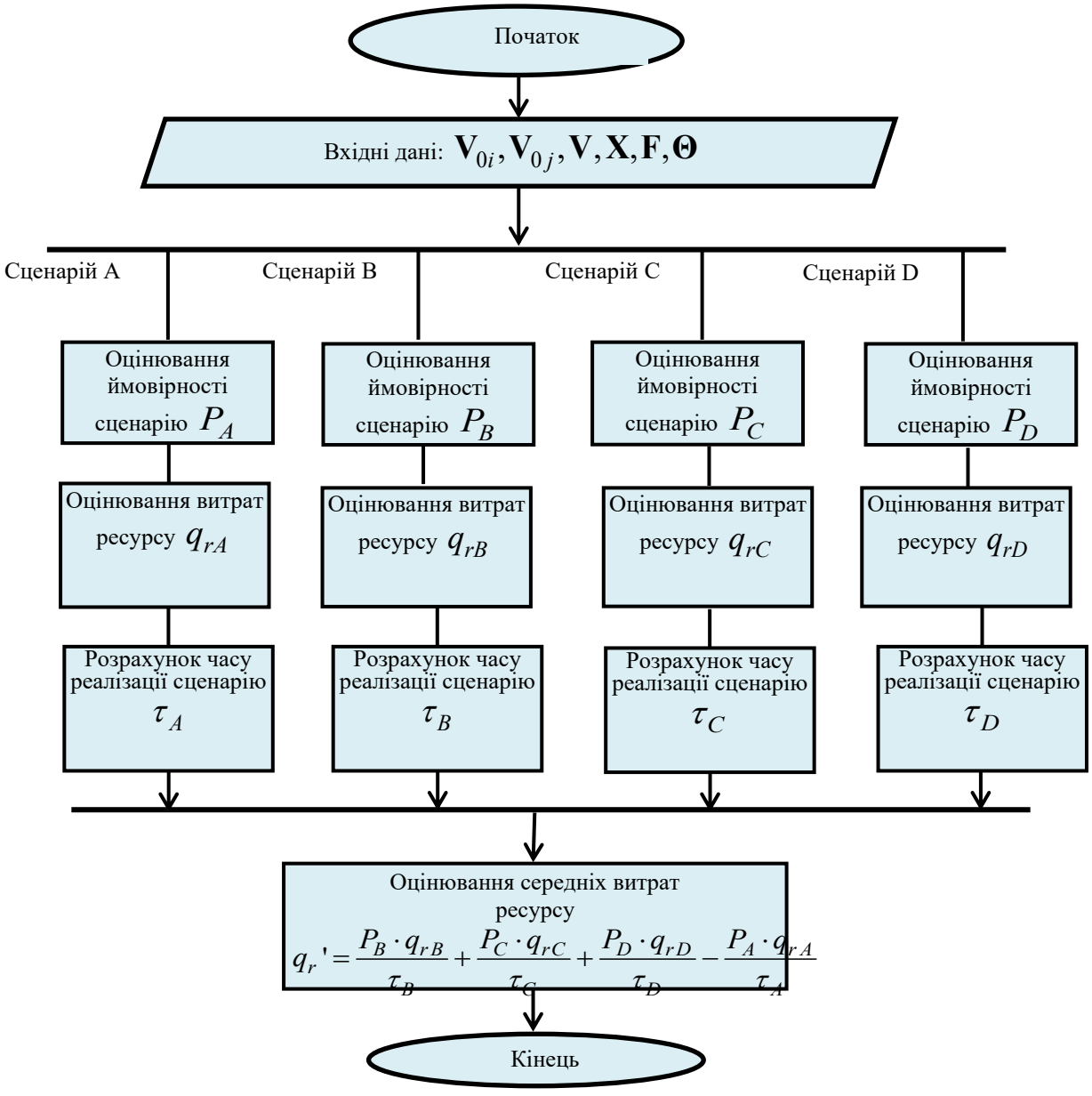

Рис. 11. Алгоритм керування в умовах комбінованої невизначеності із застосуванням сценарно-подійного підходу

У двох правих стовпцях таблиці показано відхилення результатів аналітичного моделювання шляхом розкладання логічного перетворення на арифметичні операції та гармонічну лінеаризацію та

моделювання в Simulink. Аналіз адекватності запропонованих моделей і методик моделювання, проведений за допомогою програмного комплексу Simulink, показав, що зведена похибка моделювання δ=9.8%.

Алгоритм керування в умовах комбінованої невизначеності із застосуванням сценарно-подійного підходу (рис.11) передбачає мінімізацію ризику (середнього збитку $\overline{\Delta q_r} = \sum_S P'(s,\tau_1)\cdot \Delta q_r$), де ймовірність збитку залежить від сценарію:

Сценарій A: Ситуація не змінюється. Ймовірність реалізації сценарію P_A;

Сценарій B: Ситуація змінюється та визначається правильно. Перехід до нової ситуації повністю здійснено. Після цього система деякий час функціонує в новій ситуації. Ймовірність реалізації сценарію P_B;

Сценарій C: Ситуація змінюється та визначається правильно. Перехід до нової ситуації повністю не здійснений. Після цього ситуація знову змінюється. Ймовірність реалізації сценарію P_C;

Сценарій D: Ситуація змінюється і не визначається правильно. Перехід відбувається до параметрів неправильної ситуації. Цей процес триває, поки ідентифікація не стане правильною або ситуація не зміниться. Ймовірність реалізації сценарію P_D.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Наявність випадкових збурень, похибки оцінювання стану РКФС, невизначеність прогнозу результатів впливу на об’єкт призводять до зниження ефективності координації. В роботі досліджена координація в умовах невизначеності, а саме статистична координація, нечітка координація, координація в умовах комбінованої невизначеності. Показано, що координація РКФС за обраними критеріями характеризується робастністю, що забезпечує можливість оптимальної децентралізованої координації в умовах невизначеності.

Література

1. Dubovoi V. M. A Model of Self-oscillations in Relay Outputs Control Systems with Elements of Artificial Intelligence. (2018) Rovira R. H., Dubovoi V. M., Yukhimchuk M. S. et al. Proceedings of the International Conference on Information Technology & Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing, [Rocha Á., Guarda T. (eds)] vol 721. Springer, Cham. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_33.

2. Глонь О. В. Моделювання систем керування в умовах невизначеності : монографія / О. В. Глонь, В. М. Дубовой – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. – 170 с.

3. Seyranian V. Contingency Theories of Leadership. (2009) Seyranian V .Encyclopedia of Group Processes & Intergroup Relations. Edited by John M. Levine and Michael A. Hogg. Thousand Oaks, California: SAGE, , pp. 152-56.

4. N. Ashish. An Event Based Approach To Situational Representation (2009) / N. Ashish, D. Kalashnikov, S. Mehrotra, N. Venkatasubramanian. arXiv:0906.4096 [cs.DB]

5. Dubovoi V.M. Energy Efficiency of Smart Control Based on Situational Models. In: Dubovoi V.M., Yukhymchuk M.S, V.M. Kuntsevich, V.F. Gubarev, Y.Kondratenko, D.V. Lebedev, V.P. Lysenko (Eds.), Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics. River Publishers, pp. 145-167, 2018.

References

1. Dubovoi V. M. A Model of Self-oscillations in Relay Outputs Control Systems with Elements of Artificial Intelligence. (2018) Rovira R. H., Dubovoi V. M., Yukhimchuk M. S. et al. Proceedings of the International Conference on Information Technology & Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing, [Rocha Á., Guarda T. (eds)] vol 721. Springer, Cham. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_33.

2. Hlon O. V. Modeliuvannia system keruvannia v umovakh nevyznachenosti : monohrafiia / O. V. Hlon, V. M. Dubovoi – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2004. – 170 s.

3. Seyranian V. Contingency Theories of Leadership. (2009) Seyranian V .Encyclopedia of Group Processes & Intergroup Relations. Edited by John M. Levine and Michael A. Hogg. Thousand Oaks, California: SAGE, , pp. 152-56.

4. N. Ashish. An Event Based Approach To Situational Representation (2009) / N. Ashish, D. Kalashnikov, S. Mehrotra, N. Venkatasubramanian. arXiv:0906.4096 [cs.DB]

5. Dubovoi V.M. Energy Efficiency of Smart Control Based on Situational Models. In: Dubovoi V.M., Yukhymchuk M.S, V.M. Kuntsevich, V.F. Gubarev, Y.Kondratenko, D.V. Lebedev, V.P. Lysenko (Eds.), Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics. River Publishers, pp. 145-167, 2018.