

УДК 681.5

Ю. П. Кондратенко, д-р техн. наук,
О. В. Козлов

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ ПІРОЛІЗНОЇ УСТАНОВКИ ЯК БАГАТОКООРДИНАТНОГО ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Анотація. Представлено багатозв'язну математичну модель рециркуляційної піролізної установки (РПУ) як багатокоординатного об'єкту керування у складі технологічного комплексу екопірогенезису. Розроблена математична модель дає змогу досліджувати поведінку даного об'єкту керування в усталеному та перехідному режимах при врахуванні взаємозв'язку між його вихідними координатами, які раніше, при синтезі окремих моделей компонентів РПУ, вважались незалежними одна від одної. Отримані результати комп'ютерного моделювання можуть бути використані при подальшому синтезі та дослідженні багатозв'язної системи автоматичного керування основними координатами РПУ.

Ключові слова: комплекс екопірогенезису, рециркуляційна піролізна установка, багатокоординатний об'єкт керування, математична модель, нечітка логіка

Y. P. Kondratenko, ScD.,
O. V. Kozlov

MATHEMATICAL MODEL OF RECIRCULATING PYROLYSIS PLANT AS A MULTI-COORDINATE CONTROL OBJECT

Abstract. This paper presents the multilink mathematical model of the recirculating pyrolysis plant (RPP) as a multi-coordinate control object as a part of ecopyrogenesis (EPG) technological complex. The developed model gives the possibility to study the control object behaviour in steady and transient modes, considering interrelation between the output coordinates, that considered to be independent at the synthesis of the separate RPP components models. The obtained results in the form of static and dynamic characteristics graphs of the RPP can be used in the further synthesis and research of the multilink automated control system of the main RPP coordinates.

Keywords: ecopyrogenesis complex, recirculating pyrolysis plant, multi-coordinate control object, mathematical model, fuzzy logic

Ю. П. Кондратенко, д-р техн. наук,
А. В. Козлов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ПИРОЛИЗНОЙ УСТАНОВКИ КАК МНОГОКООРДИНАТНОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. Представлена многосвязная математическая модель рециркуляционной пиролизной установки (РПУ) как многокоординатного объекта управления в составе технологического комплекса экопирогенезиса. Разработанная математическая модель дает возможность исследовать поведение данного объекта управления в установившемся и переходном режимах при учете взаимосвязи между его выходными координатами, которые раньше, при синтезе отдельных моделей компонентов РПУ, считались независимыми друг от друга. Полученные результаты компьютерного моделирования могут быть использованы при дальнейшем синтезе и исследовании многосвязной системы автоматического управления основными координатами РПУ.

Ключевые слова: комплекс экопирогенезиса, рециркуляционная пиролизная установка, многокоординатный объект управления, математическая модель, нечеткая логика

Вступ. Керування рециркуляційними піролізними установками (РПУ) та їх основними компонентами є однією з складних і важливих задач автоматизації теплоенергетичних технологічних процесів і технологічних комплексів екопірогенезису [1]. Зокрема, при проектуванні систем автоматичного керування (САК) основними координатами РПУ необхідно враховувати, що їх значення безперервно змінюється під дією різнотип-

них збурювальних факторів (теплообмін реактора з багатоконтурною циркуляційною системою (БЦС) і зовнішнім середовищем, вплив фізичних та хімічних процесів, що проходять всередині реактора та в БЦС та ін.) і безпосередньо залежать одна від одної. САК РПУ повинна компенсувати взаємовплив керованих координат та впливи основних збурень таким чином, щоб забезпечити стабілізацію заданих значень температури нагріву та рівня завантаженості реактора, а також температури на виході БЦС РПУ. Це дозволяє забезпечити ро-

боту РПУ в безперервному режимі та отримувати на виході рідкі фракції альтернативного палива високої якості з заданою молекулярною масою, що в свою чергу дає змогу значно підвищити ефективність роботи та економічні показники всього комплексу ЕПГ [4].

Для дослідження ефективності даної САК на стадії її проектування доцільно використовувати методи математичного та комп'ютерного моделювання, які в порівнянні з експериментальними та іншими підходами є досить ефективним та низько-вартісним інструментом. Наявність багатозв'язної математичної моделі РПУ дозволить досліджувати поведінку даного багатокоординатного об'єкту керування в установлених та перехідних режимах, а також проводити синтез та налагодження регуляторів його САК.

В науково-технічній літературі є певна кількість публікацій стосовно розробки математичних моделей окремих компонентів РПУ у складі технологічних комплексів ЕПГ [2, 3, 7, 8]. Що стосується розробки багатозв'язної математичної моделі РПУ як багатокоординатного об'єкту керування з урахуванням взаємозв'язку між його вихідними координатами, то ця задача на даний час залишається невирішеною.

Метою даної статті є розробка багатозв'язної математичної моделі РПУ як багатокоординатного об'єкту керування та її дослідження в установлених та перехідних режимах при певних заданих та збурювальних впливах.

Функціональна схема САК РПУ. Функціональна схема системи автоматичного керування основними координатами РПУ наведена на рис. 1, де прийнято наступні позначення: ЗП – задавальні пристрої; РТ, РР, РП – регулятори температури, рівня та положення поршня гідроприводу завантаження (ГПЗ), відповідно; ЛРВ – лінійні регулятори витрати газу; ДТ, ДР, ДП – датчики температури, рівня та положення, відповідно; КП – керуючий пристрій ГПЗ; ЕКЗ – електрокерований золотник ГПЗ; АГП – газовий пальник з автоматичним запалюванням; $T_{\text{БЦС}}$, $L_{\text{ЗР}}$, $T_{\text{ЗР}}$ – задані зна-

чення температури вихідної (контрольної) точки БЦС, рівня завантаженості та температури нагріву реактора, відповідно; $T_{\text{ДБЦС}}$, $L_{\text{ДР}}$, $T_{\text{ДР}}$ – дійсні значення температури вихідної точки БЦС, рівня завантаженості та температури нагріву реактора, відповідно; $u_{\text{ЗП}}$ – сигнали з задавальних пристроїв; ε_{T} , $\varepsilon_{\text{Р}}$, $\varepsilon_{\text{П}}$ – помилки керування температурою, рівнем і положенням поршня ГПЗ, відповідно; $u_{\text{РТ}}$, $u_{\text{РР}}$, $u_{\text{РП}}$ – сигнали керування регуляторів температури, рівня та положення, відповідно; $u_{\text{ДТ}}$, $u_{\text{Д}}$, $u_{\text{ДП}}$ – сигнали від датчиків температури, рівня та положення, відповідно; $u_{\text{КП}}$ – сигнал керуючого пристрою ГПЗ; $X_{\text{З}}$ та $Y_{\text{П}}$ – лінійні переміщення ЕКЗ та поршня ГПЗ, відповідно; $Q_{\text{ЗГ}}$ та $Q_{\text{П}}$ – витрати зрідженого газу та охолоджуючого повітря, відповідно; $Q_{\text{СГ}}$ – витрата синтез-газу, який виділяється в процесі роботи РПУ і подається на АГП в якості додаткового газоподібного палива; $P_{\text{АГП}}$ – потужність нагріву АГП; $P_{\text{Н}}$ – потужність нагріву парогазової суміші, що надходить до БЦС від реактора; $f_{\text{З}}(t)$ – різнотипні збурювальні впливи.

Система автоматичного керування РПУ (рис. 1) складається з трьох підсистем автоматичного регулювання (ПСАР), основною задачею яких є стабілізація заданих значень температури нагріву реактора $T_{\text{ЗР}}$, рівня завантаженості реактора $L_{\text{ЗР}}$ та температури контрольної точки БЦС $T_{\text{БЦС}}$, відповідно, в умовах дії різнотипних зовнішніх та внутрішніх збурювальних впливів $f_{\text{З}}(t)$. ПСАР рівня завантаженості реактора $L_{\text{ЗР}}$ є двоконтурною з внутрішнім підпорядкованим контуром керування положенням поршня ГПЗ $Y_{\text{П}}$.

В ПСАР РПУ значення похибок керування ε_{T} , $\varepsilon_{\text{Р}}$ та $\varepsilon_{\text{П}}$ обчислюються за допомогою суматорів і надходять до регуляторів РТ, РР та РП, відповідно. Регулятори даних підсистем, в свою чергу, виробляють певні керуючі впливи $u_{\text{РТ}}$, $u_{\text{РР}}$, $u_{\text{РП}}$, які надходять до відповідних виконавчих механізмів, таких як ЛРВ, ЕКЗ та КП. Детальний опис принципу дії вищенаведених ПСАР РПУ наведений у роботах [2, 3, 7].

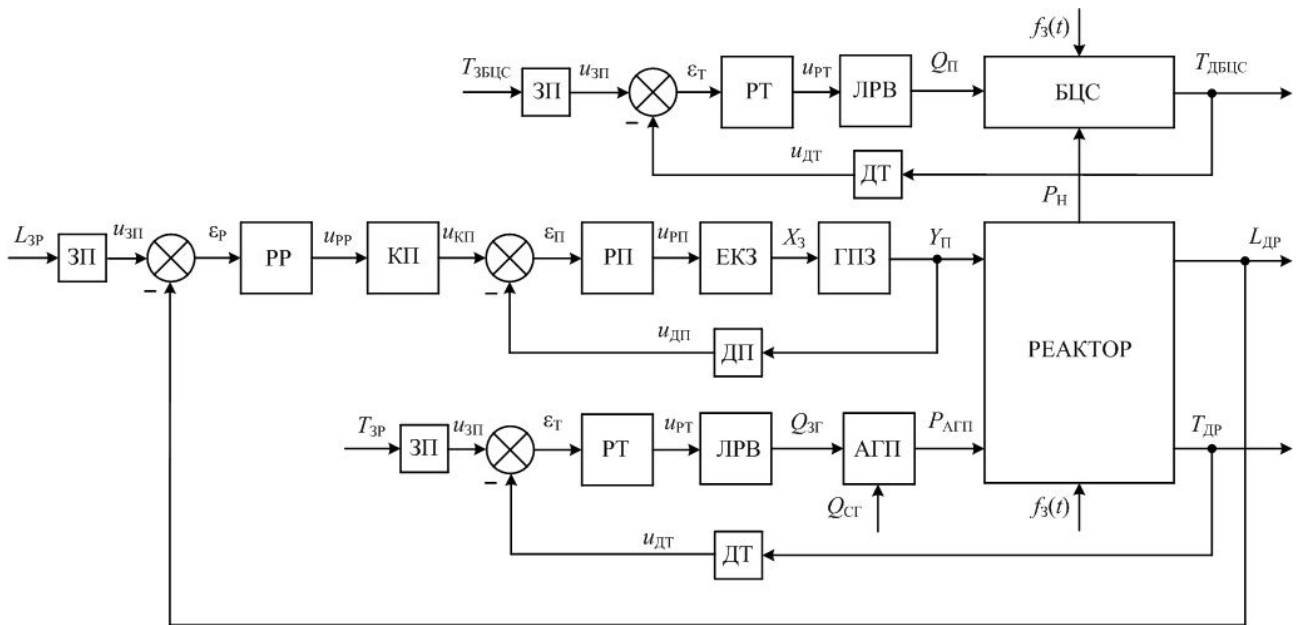


Рис. 1. Функціональна схема системи автоматичного керування основними координатами РПУ

Розробка багатозв'язної математичної моделі РПУ як багатокординатного об'єкта керування. На основі математичних моделей основних компонентів РПУ, наведених в [2, 3, 7, 8] можна синтезувати багатозв'язну математичну модель РПУ як багатокординатного об'єкта керування. Така математична модель має бути адекватною реальним процесам і потребує врахування взаємозв'язку між вихідними координатами, які раніше (при синтезі окремих моделей компонентів РПУ) вважались незалежними одна від одної. Так, наприклад, дійсне значення рівня завантаженості реактора $L_{др}$ суттєво впливає на розподілені значення температур в його різних точках в процесі нагріву. В свою чергу, від значення температури нагріву та агрегатного стану ТПВ, завантажених до реактора РПУ, залежить значення їх щільності $\rho_{ТПВ}$, яке прямим чином впливає на значення рівня $L_{др}$.

Також доцільним буде врахування зміни коефіцієнтів теплопровідності $\lambda_{ТПВ}$ та теплоємності $c_{ТПВ}$ ТПВ при зміні температури, додаткових втрат теплової потужності при плавленні $P_{пл}$, пароутворенні $P_{пр}$ та довантаженні ТПВ $P_{ВД}$, а також збільшенні теплової потужності АГП $P_{АГП}$ при виділенні синтез-газу в процесі роботи РПУ.

При врахуванні вищенаведених особливостей багатозв'язна математична мо-

дель РПУ як багатокординатного об'єкта керування матиме функціональну структуру, яка наведена на рис. 2.

Лінійні регулятори витрати зрідженого газу ЛРВГ та охолоджуючого повітря ЛРВП, а також ЕКЗ в даному випадку представлені передаточними функціями коливальних ланок з відповідними коефіцієнтами та сталими часу $k_{ЛРВГ}$, $k_{ЛРВП}$, $k_{ЕКЗ}$, $T_{ЛРВГ}$, $T_{ЛРВП}$, $T_{ЕКЗ}$, ζ [2, 3, 7].

Газовий пальник з автоматичним запалюванням (АГП), в свою чергу, має передаточну функцію аперіодичної ланки з коефіцієнтом підсилення $k_{АГП}$ та сталою часу $T_{АГП}$ [7]. Обчислювальний блок ОБ1 являє собою математичну модель реактора РПУ як об'єкта керування температурою, наведену в [8], з урахуванням додаткових втрат теплової потужності при плавленні $P_{пл}$ та пароутворенні $P_{пр}$ ТПВ, що знаходяться з наступних рівнянь, відповідно [6] реактора:

$$P_{пл} = \mu_{ТПВ} \frac{dm_{ТПВ}}{dt} = \mu_{ТПВ} \rho_{ТПВ} F_p \frac{dL_{др}}{dt}; \quad (1)$$

$$P_{пр} = \nu_{ТПВ} \frac{dm_{ТПВ}}{dt} = \nu_{ТПВ} \rho_{ТПВ} F_p \frac{dL_{др}}{dt}, \quad (2)$$

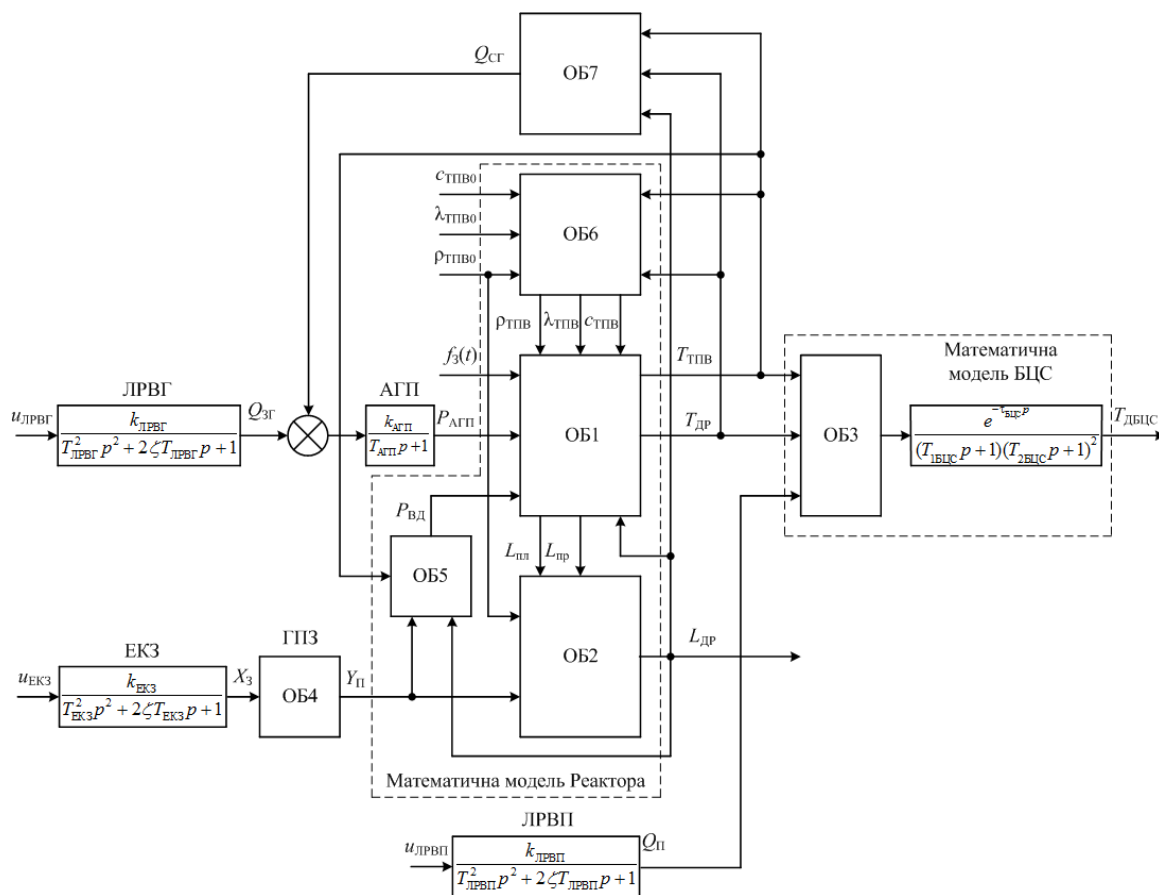


Рис. 2. Функціональна структура багатозв'язної математичної моделі РПУ як багатокоординатного об'єкта керування

де $\mu_{ТПВ}$ та $\nu_{ТПВ}$ – значення питомих теплоти плавлення та теплоти пароутворення ТПВ, відповідно; $m_{ТПВ}$ – значення маси ТПВ, завантажених до реактора; F_p – площа поперечного перерізу.

Обчислювальний блок ОБ1 – обчислює значення температури нагріву нижньої стінки реактора $T_{др}$ та температури на поверхні ТПВ $T_{ТПВ}$ на основі значення нагрівальної потужності АГП $P_{АГП}$ та збурювальних впливів $f_3(t)$.

Обчислювальний блок ОБ2 являє собою математичну модель реактора як об'єкта керування рівнем завантаженості, наведену в [2], з урахуванням плавлення та випаровування ТПВ в процесі нагріву. Дійсне значення рівня завантаженості реактора $L_{др}$ обчислюється за формулою (3), яка отримана на основі рівнянь масового балансу, наведених в [9],

$$L_{др} = L_3 - L_{пл} + L_{пл} \frac{\rho_{ТПВО}}{\rho_{ТПВ}} - L_{пр}, \quad (3)$$

де L_3 – значення рівня завантажених відходів до реактора за допомогою ГПЗ; $L_{пл}$ та $L_{пр}$ – значення рівня відходів, що вже розплавилися та випарувалися в процесі їх плавлення та пароутворення, відповідно; $\rho_{ТПВО}$ – щільність ТПВ при температурі оточуючого середовища; $\rho_{ТПВ}$ – щільність ТПВ при певній температурі їх нагріву. Значення рівня L_3 обчислюється за допомогою підходу, наведеного в [2], а $L_{пл}$ та $L_{пр}$ функціонально відображаються такими залежностями:

$$L_{пл} = \int \frac{P_{пл}}{\mu_{ТПВ} \rho_{ТПВ} F_p} dt; \quad (4)$$

$$L_{пр} = \int \frac{P_{пр}}{\mu_{ТПВ} \rho_{ТПВ} F_p} dt. \quad (5)$$

Обчислювальний блок ОБ3 та передаточна функція (6) утворюють математичну модель реактора БЦС РПУ як об'єкта керування температурою [3]. ОБ3 являє собою систему обчислення температури згідно залежності $T_{дбцс} = f(T_{др}, T_{ТПВ}, Q_{п})$, розробка якої на основі принципів нечіткої логіки наведена в [3].

$$W_{\text{БЦС}}(p) = \frac{e^{-\tau_{\text{БЦС}} p}}{(T_{1\text{БЦС}} p + 1)(T_{2\text{БЦС}} p + 1)^n}, \quad (6)$$

де $T_{1\text{БЦС}}$, $T_{2\text{БЦС}}$ та $\tau_{\text{БЦС}}$ – сталі часу та час запізнення БЦС як об'єкта керування температурою, відповідно.

Обчислювальний блок ОБ4 являє собою нелінійну математичну модель ГПЗ, розроблену та докладно розглянуту в [2]. Вхідним сигналом даної моделі є лінійне переміщення ЕКЗ X_3 , а вихідним – лінійне переміщення поршня ГПЗ $Y_{\text{П}}$.

Обчислювальні блоки ОБ5, ОБ6 та ОБ7 призначені для розрахунку наступних параметрів математичної моделі РПУ: теплових втрат $P_{\text{ВД}}$ при довантаженні нової партії ТПВ в процесі роботи РПУ згідно залежності (7), коефіцієнтів щільності $\rho_{\text{ТПВ}}$, теплопровідності $\lambda_{\text{ТПВ}}$ та теплоємності $c_{\text{ТПВ}}$ ТПВ згідно залежностей (8), (9) та (10), відповідно; витрати синтез-газу $Q_{\text{СГ}}$ згідно залежності (11).

$$P_{\text{ВД}} = f(Y_{\text{П}}, T_{\text{ТПВ}}, L_{\text{ДР}}); \quad (7)$$

$$\rho_{\text{ТПВ}} = f(T_{\text{ДР}}, T_{\text{ТПВ}}, \rho_{\text{ТПВ0}}); \quad (8)$$

$$\lambda_{\text{ТПВ}} = f(T_{\text{ДР}}, T_{\text{ТПВ}}, \lambda_{\text{ТПВ0}}); \quad (9)$$

$$c_{\text{ТПВ}} = f(T_{\text{ДР}}, T_{\text{ТПВ}}, c_{\text{ТПВ0}}); \quad (10)$$

$$Q_{\text{СГ}} = f(T_{\text{ДР}}, T_{\text{ТПВ}}, L_{\text{ДР}}), \quad (11)$$

де $\lambda_{\text{ТПВ0}}$ та $c_{\text{ТПВ0}}$ – коефіцієнти теплопровідності та теплоємності ТПВ при температурі оточуючого середовища.

При встановленні точних залежностей (7)-(11) на основі рівнянь, що описують фізичні та хімічні процеси, які проходять в РПУ, виникає ряд труднощів. Це викликано тим, що ТПВ, які завантажуються до реактора, складаються із неконтрольованої суміші різнотипних полімерних відходів і мають невідзначені фізичні та хімічні властивості [4]. Тому для вирішення даної проблеми розробку обчислювальних блоків ОБ5, ОБ6 та ОБ7 доцільно здійснювати на основі експертних даних, наведених в [7], із застосуванням принципів та алгоритмів, що спираються на теорію нечітких множин та нечітку логіку [5]. Математичні моделі, що базуються на нечіткій логіці, розробляються та успішно впроваджуються при дослідженні поведінки об'єктів

із нестаціонарними та невизначеними параметрами [3, 5].

Синтез обчислювальних блоків ОБ5, ОБ6 та ОБ7 на основі нечіткої логіки. Для максимального наближення результатів моделювання до характеру реальних процесів, що проходять в реакторі РПУ, обчислювальний блок ОБ5 має структуру, наведену на рис. 3.

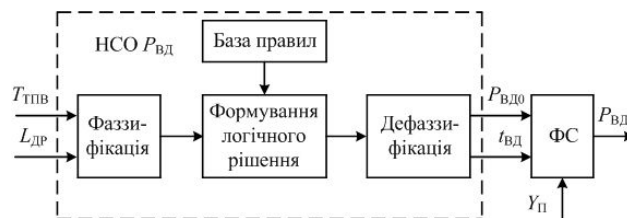


Рис. 3. Функціональна структура ОБ5

На виході ОБ5 формується сигнал $P_{\text{ВД}}$ у формі прямокутного трикутника з початковою амплітудою $P_{\text{ВД0}}$ та тривалістю $t_{\text{ВД}}$. Нечітка система обчислення (НСО) теплових втрат при довантаженні нової партії ТПВ $P_{\text{ВД}}$ (рис. 3) розраховує параметри трикутного сигналу $P_{\text{ВД0}}$ та $t_{\text{ВД}}$ згідно вхідних сигналів $T_{\text{ТПВ}}$ та $L_{\text{ДР}}$. В свою чергу, параметри $P_{\text{ВД0}}$ та $t_{\text{ВД}}$ подаються на формувач сигналу трикутної форми ФС, який формує вихідний сигнал $P_{\text{ВД}}$ на початку процесу дозавантаження ТПВ до реактора. ФС спрацьовує одноразово при кожному новому довантаженні в момент руху поршня ГПЗ ($Y_{\text{П}} > 0$).

Для обчислення параметрів $\rho_{\text{ТПВ}}$, $\lambda_{\text{ТПВ}}$ та $c_{\text{ТПВ}}$ обчислювальний блок ОБ6 доцільно будувати за функціональною структурою, наведеною на рис. 4. Температурні коефіцієнти змінення щільності k_{ρ} , теплопровідності k_{λ} та теплоємності k_c розраховуються при цьому на основі значень вхідних змінних $T_{\text{ДР}}$ та $T_{\text{ТПВ}}$ за допомогою НСО $\rho_{\text{ТПВ}}$, НСО $\lambda_{\text{ТПВ}}$ та НСО $c_{\text{ТПВ}}$, що мають таку ж структуру, як і НСО $P_{\text{ВД}}$.

Обчислювальний блок ОБ7, в свою чергу, являє собою нечітку систему обчислення значення витрати синтез-газу $Q_{\text{СГ}}$ на основі вхідних параметрів $T_{\text{ДР}}$, $T_{\text{ТПВ}}$ та $L_{\text{ДР}}$, яка має таку ж структуру як і НСО $P_{\text{ВД}}$ (рис. 3).

Розглянемо більш детально процедуру синтезу НСО $\rho_{\text{ТПВ}}$, НСО $\lambda_{\text{ТПВ}}$, НСО $c_{\text{ТПВ}}$, НСО $Q_{\text{СГ}}$ та НСО $P_{\text{ВД}}$ на основі нечіткого логічного висновку Мамдані типу (рис. 3), основними етапами якого є: фазифікація, агрегація, активізація, акумуляція та дефазифікація [5].

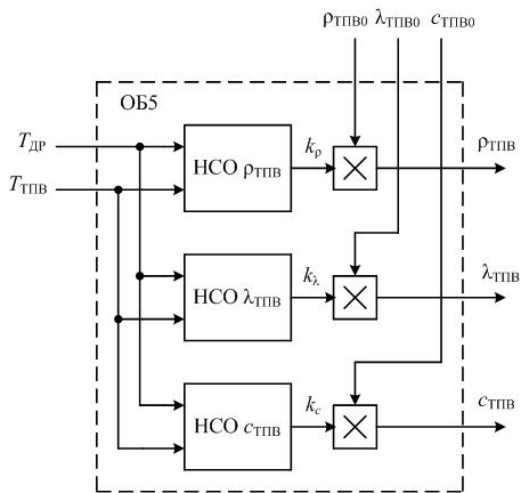


Рис. 4. Функціональна структура ОБ5

На етапі фазифікації для кожної вхідної змінної визначається відповідне їй лінгвістичне значення та ступінь належності відповідній нечіткій множині [5]. У цьому випадку доцільно вибрати наступні лінгвістичні терми для вхідних і вихідної змінних вищенаведених НСО, параметри яких зведені в таблицях 1-3, відповідно.

1. Параметри нечітких змінних НСО $r_{тпв}$, НСО $\lambda_{тпв}$ та НСО $c_{тпв}$

Терм	Тип функції належності	Діапазон значень
Для вхідної змінної $T_{др}$		
L – низька	Трикутна	[0 0 450]
M – середня	Трикутна	[350 600 850]
H – висока	Трикутна	[750 1000 1250]
Для вхідної змінної $T_{тпв}$		
L – низька	Трикутна	[0 0 160]
M – середня	Трикутна	[40 200 360]
H – висока	Трикутна	[240 400 560]
Для вихідної змінної k_r		
S – малий	Трикутна	[1 1 1,5]
M – середній	Трикутна	[1,1 1,5 1,9]
B – великий	Трикутна	[1,5 2 2,2]
Для вихідної змінної k_λ		
S – малий	Трикутна	[1 1 1,2]
M – середній	Трикутна	[1,05 1,2 1,35]
B – великий	Трикутна	[1,2 1,35 1,45]
Для вихідної змінної k_c		
S – малий	Трикутна	[1 1 1,5]
M – середній	Трикутна	[1 1,5 2]
B – великий	Трикутна	[1,5 2 2,5]

В НСО $Q_{сг}$ та НСО $P_{вд}$ для вхідних змінних $T_{др}$ та $T_{тпв}$ обрано такі ж самі лінгвістичні терми, як і для НСО $r_{тпв}$, НСО $\lambda_{тпв}$ та НСО $c_{тпв}$ (табл. 1).

2. Параметри нечітких змінних НСО $Q_{сг}$

Терм	Тип функції належності	Діапазон значень
Для вхідної змінної $L_{др}$		
Z – нульовий	Трикутна	[0 0 0,1]
NZ – ненульовий	Трапецієвидна	[0,05 0,1 1 1,2]
Для вихідної змінної $Q_{сг}$		
Z – нульовий	Трикутна	[0 0 0,1]
S – малий	Трикутна	[0 0,25 5]
M – середній	Трикутна	[0,25 0,5 0,75]
B – великий	Трикутна	[0,75 1 1]

3. Параметри нечітких змінних НСО $P_{вд}$

Терм	Тип функції належності	Діапазон значень
Для вхідної змінної $L_{др}$		
S – малий	Трикутна	[0 0 0,5]
M – середній	Трикутна	[0 0,5 1]
B – великий	Трикутна	[0,5 1 1]
Для вихідної змінної $P_{вдо}$		
Z – нульові	Трикутна	[0 0 0,1]
S – малі	Трикутна	[0 0,25 5]
M – середні	Трикутна	[0,25 0,5 0,75]
B – великі	Трикутна	[0,65 1 1]
Для вихідної змінної $t_{вд}$		
Z – нульова	Трикутна	[0 0 0,1]
S – мала	Трикутна	[0 0,25 5]
M – середня	Трикутна	[0,25 0,5 0,75]
B – велика	Трикутна	[0, 5 1 1]

Для вхідної змінної $L_{др}$ та вихідних змінних $Q_{сг}$, $P_{вдо}$, $t_{вд}$ діапазон значень визначається у відносних одиницях від максимального значення.

Для реалізації нечіткого логічного висновку НСО $r_{ТПВ}$, НСО $\lambda_{ТПВ}$, НСО $s_{ТПВ}$, НСО $Q_{СГ}$ та НСО $P_{ВД}$ сформуємо відповідні бази знань. Правила даних баз знань за алгоритмом Мамдані являють собою лінгвістичні твердження виду

ЯКЩО “ $T_{ДР} = a$ ” І “ $T_{ТПВ} = b$ ”, ТО “ $k_p = c$ ”;

ЯКЩО “ $T_{ДР} = a$ ” І “ $T_{ТПВ} = b$ ”, ТО “ $k_\lambda = c$ ”;

ЯКЩО “ $T_{ДР} = a$ ” І “ $T_{ТПВ} = b$ ”, ТО “ $k_c = c$ ”;

ЯКЩО “ $T_{ДР} = a$ ” І “ $T_{ТПВ} = b$ ” І “ $L_{ДР} = c$ ”,

ТО “ $Q_{СГ} = d$ ”;

ЯКЩО “ $T_{ТПВ} = a$ ” І “ $L_{ДР} = b$ ”, ТО “ $P_{ВД0} = c$ ”

І “ $t_{ВД} = d$ ”,

де a, b, c, d – відповідні значення лінгвістичних термів.

Бази знань НСО $r_{ТПВ}$, НСО $\lambda_{ТПВ}$, НСО $s_{ТПВ}$, та НСО $P_{ВД}$ складаються з 9 правил, які відповідають всім комбінаціям вхідних нечітких змінних. База знань НСО $Q_{СГ}$, в свою чергу, складається з 18 правил. Фрагменти баз правил розроблених НСО наведені в таблицях 4-6, відповідно.

4. Фрагменти баз правил НСО $r_{ТПВ}$, НСО $\lambda_{ТПВ}$ та НСО $s_{ТПВ}$

НСО $r_{ТПВ}$			
№ правила	Вхідні змінні		Вихідна змінна
	$T_{ДР}$	$T_{ТПВ}$	
1	L	L	S
5	M	M	B
9	H	H	M
НСО $\lambda_{ТПВ}$			
	$T_{ДР}$	$T_{ТПВ}$	k_λ
1	L	L	S
5	M	M	B
9	H	H	M
НСО $s_{ТПВ}$			
	$T_{ДР}$	$T_{ТПВ}$	k_c
1	L	L	S
5	M	M	M
9	H	H	B

На етапі агрегації визначаються ступені істинності для кожного з правил вищенаведених НСО, а на етапі активізації реалізується процедура знаходження ступенів істинності кожного з підзаключень правил нечітких продукцій.

5. Фрагменти бази правил НСО $Q_{СГ}$

№ правила	Вхідні змінні			Вихідна змінна
	$T_{ДР}$	$T_{ТПВ}$	$L_{ДР}$	
1	L	L	Z	Z
11	M	L	NZ	Z
14	M	M	NZ	S
17	H	M	NZ	M
18	H	H	NZ	B

6. Фрагменти бази правил НСО $P_{ВД}$

№ правила	Вхідні змінні		Вихідні змінні	
	$T_{ТПВ}$	$L_{ДР}$	$P_{ВД0}$	$t_{ВД}$
1	L	L	Z	Z
4	M	L	M	M
7	H	L	B	B
9	H	H	S	S

Подальшим етапом нечіткого логічного висновку є акумуляція, тобто процедура знаходження функцій належності для кожної з вихідних лінгвістичних змінних НСО [5]. Метою акумуляції є об'єднання всіх вихідних лінгвістичних термів з відповідними ступенями істинності кожного з правил для отримання функції належності вихідної змінної. Таким чином, на етапі акумуляції формується результуюча функція належності для нечіткого рішення, яке потрібно перетворити в чітке значення вихідного сигналу певної НСО. Процедура знаходження чітких числових значень $k_p, k_\lambda, k_c, Q_{СГ}, P_{ВД0}$ та $t_{ВД}$ являє собою процедуру дефазифікації.

Існує кілька методів дефазифікації: метод центру тяжіння, метод центру площини, метод лівого модального значення, метод правого модального значення та ін. [5]. Для даних НСО доцільним буде обрати метод центру тяжіння.

Результати моделювання РПУ як багатогоординатного об'єкту керування. За допомогою розробленої багатозв'язної математичної моделі проведено комп'ютерне моделювання експериментальної РПУ як багатогоординатного об'єкта керування. Робочий об'єм та максимальний рівень завантаженості піролізного реактора даної РПУ складає 100 літрів та 0,5 м, відповідно; максимальна потужність газового пальника – 25 кВт; максимальні потужність та хід поршня гідроприводу завантаження відходів складає

10 кВт та 0,4 м відповідно; номінальна потужність повітряного вентилятора 2-го контуру охолодження БЦС – 800 Вт. Моделювання проводилося при сталих значеннях температур плавлення та кипіння полімерних відходів, завантажених у реактор, $T_{\text{П}} = 200^{\circ}\text{C}$ та $T_{\text{К}} = 400^{\circ}\text{C}$, відповідно, а також при сталій температурі оточуючого середовища $T_{\text{ОС}} = 0^{\circ}\text{C}$.

Результати моделювання у вигляді графіків перехідних процесів нагріву та завантаження реактора, нагріву контрольної точки БЦС, а також виділення синтез-газу наведені на рис. 5 та 6, де прийнято наступні позначення: $t_{\text{ПЗ}}$ – час початкового завантаження ТПВ до реактора; $t_{\text{П}}$ – час плавлення ТПВ в реакторі; $t_{\text{К}}$ – час кипіння та випаровування ТПВ; $t_{\text{ПН}}$ – початок нагріву ТПВ в реакторі; $t_{\text{ПП}}$ – початок плавлення ТПВ; $t_{\text{КП}}$ – кінець плавлення ТПВ; $t_{\text{ПК}}$ – початок кипіння ТПВ; $t_{\text{ДВ}}$ – час довантаження ТПВ до реактора в процесі роботи РПУ; $t_{\text{ПД}}$ – початок процесу довантаження ТПВ до реактору; $t_{\text{КД}}$ – кінець процесу довантаження ТПВ.

Проаналізувавши результати моделювання, можна стверджувати, що при врахуванні взаємозв'язку вихідних координат, виділення синтез-газу, а також зміни параметрів $\rho_{\text{ТПВ}}$, $\lambda_{\text{ТПВ}}$, $c_{\text{ТПВ}}$ та агрегатного стану ТПВ в процесі роботи РПУ характер перехідних процесів розробленої математичної моделі з високою точністю повторює характер реальних процесів, що проходять в РПУ.

З графіку перехідного процесу нагріву ТПВ (рис. 5) видно, що під час процесу плавлення (протягом часу $t_{\text{П}}$) температура даної точки не зростає ($T_{\text{ТПВ}} = \text{const} = 200^{\circ}\text{C}$) незалежно від кількості підведеної енергії, так як уся надлишкова енергія витрачається на руйнування кристалічної структури та перетворення твердого тіла, утвореного з полімерних відходів, на рідину.

В процесі плавлення ТПВ починає виділятися синтез-газ, значення витрати якого поступово зростає при збільшенні температури $T_{\text{ТПВ}}$. Також через зміну значення щільності ТПВ $\rho_{\text{ТПВ}}$ під час цього процесу змінюється значення рівня завантаженості $L_{\text{ДР}}$.

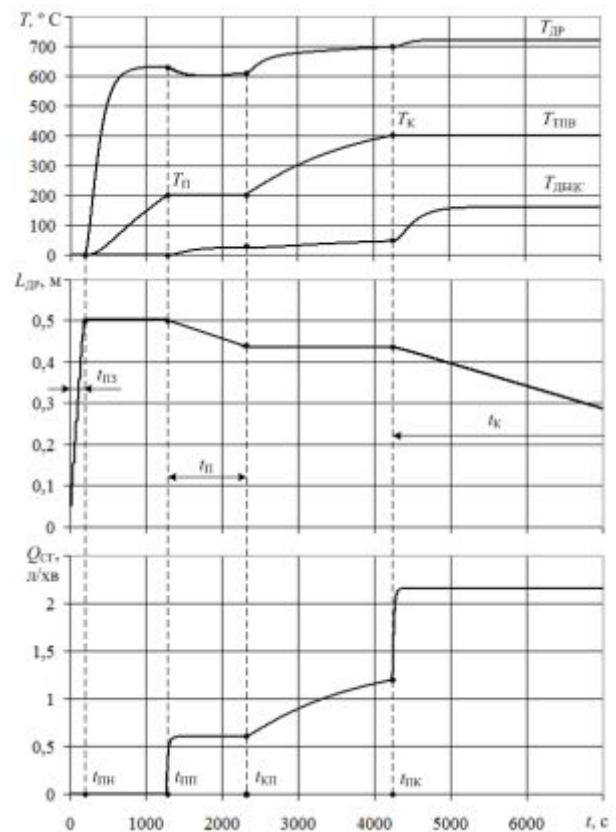


Рис. 5. Перехідні процеси РПУ при початковому завантаженні та нагріві

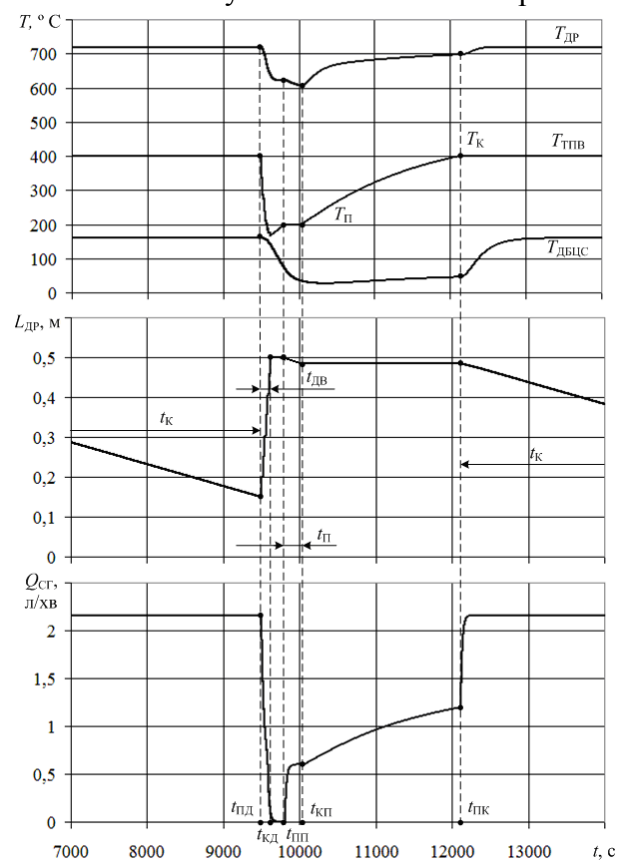


Рис. 6. Перехідні процеси РПУ при довантаженні ТПВ в процесі роботи

В свою чергу, при досягненні температури кипіння ($T_K = 400^\circ \text{C}$) починається процес інтенсивного пароутворення, і температура на поверхні ТПВ також залишається незмінною. В цей момент РПУ починає функціонувати в усталеному режимі, значення рівня ТПВ $L_{\text{ДР}}$ поступово зменшується, а витрата синтез-газу $Q_{\text{СГ}}$ набуває максимального значення.

Що стосується нагріву БЦС (рис. 5), то до початку кипіння відходів у реакторі цей процес проходить дуже повільно і здійснюється в основному за рахунок незначного пароутворення при нагріві та плавленні ТПВ. Потім, після початку кипіння ТПВ, за рахунок інтенсивного їх випаровування швидкість нагріву БЦС значно зростає.

З рисунків 5 та 6 видно, що за рахунок додаткової потужності від згорання синтез-газу збільшується температура нагріву реактора $T_{\text{ДР}}$, а також зменшується час процесів плавлення $t_{\text{П}}$ та випаровування $t_{\text{К}}$ ТПВ.

При довантаженні відходів до реактора в процесі роботи РПУ в момент часу $t_{\text{ПД}}$ (рис. 6) температура $T_{\text{ТПВ}}$ стрибкоподібно зменшується за рахунок появи втрат теплової потужності $P_{\text{ВД}}$, що йде на нагрів нової партії ТПВ. При цьому певним чином падають значення температур нагріву реактора $T_{\text{ДР}}$ та БЦС $T_{\text{ДБЦС}}$, процеси кипіння ТПВ та виділення синтез-газу зупиняється, що тягне за собою вихід РПУ з усталеного режиму роботи.

Висновки. В даній статті представлена багатозв'язна математична модель РПУ як багатокоординатного об'єкту керування у складі технологічного комплексу ЕПГ.

Розроблена математична модель дає змогу досліджувати поведінку даного об'єкту керування в усталеному та перехідному режимах із врахуванням взаємозв'язку між його вихідними координатами, які раніше (при синтезі окремих моделей компонентів РПУ) вважались незалежними одна від одної. Застосування математичного апарату нечіткої логіки при розробці певних компонентів даної моделі дозволяє з досить високою точністю відобразити її властивості та особливості як об'єкта керування з суттєво нелінійними та невизначеними параметрами.

Отримана математична модель може бути використана при подальшому синтезі та

дослідженні багатозв'язної САК основними координатами РПУ.

Список використаної літератури

1. Кондратенко Ю. П. Аналіз комплексу задач та координат керування технологічним процесом екопірогенезису / Ю. П. Кондратенко, О. В. Козлов // *Технічні вісті*. – 2011. – Вип. 1(33), 2(34), – С. 13 – 16.
2. Кондратенко Ю. П. Синтез системи керування рівнем завантаженості реактора технологічного комплексу екопірогенезису на базі нейрорегуляторів / Ю. П. Кондратенко, О. В. Козлов // *Праці Одеського політехнічного університету*. – 2013. – Вип. 1(40). – С. 122 – 131.
3. Кондратенко Ю. П. Синтез та дослідження математичної моделі багатоконтурної циркуляційної системи комплексу екопірогенезису на нечіткій логіці / Ю. П. Кондратенко, О. В. Козлов // *Вестник ХНТУ*. – 2013. – № 1(46). – С. 28 – 35.
4. Маркіна Л. М. Розробка новітньої технології енергозбереження та екологічної безпеки при утилізації органічних відходів методом екопірогенезису / Л. М. Маркіна // *Збірник наукових праць НУК*. – 2011. Вип.4, – 8 с.
5. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. – М. : БИНОМ, 2012. – 798 с.
6. Савельев И. В. Курс общей физики, том 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Наука, 1973. – 512 с.
7. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V. Fuzzy Controllers in Reactors Control Systems of Multiloop Pyrolysis Plants: Proceedings of 19th Fuzzy Colloquium, (2012), Zittau /Goerlitz Publ, Germany, Pp. 15 – 22.
8. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V. Mathematic Modeling of Reactor's Temperature Mode of Multiloop Pyrolysis Plant, (2012), Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management. Lecture Notes in Business Information Processing, Springer, Vol. 115, Pp. 178 – 187, doi: 10.1007/978-3-642-30433-0_18. URL: <http://scihub.org/pdfcache/3f8fdbe495fe1217133611934ae03b61.pdf>.

9. Kondratenko Y. P., Kozlov O. V. Multi-Sensor's Monitoring and Fuzzy System for Load Level Control of the Pyrolysis Reactor, (2013), *Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management: Proceedings of International Conference on Modeling and Simulation 2013*, China, Crete, Greece, Pp. 15 – 16.

Отримано 05.11.2013

References

1. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V. Analiz Kompleksu Zadach ta Koordinat Keruvannya Tekhnologichnim Protsesom Ekopirogenезису [Analysis of Complex of Tasks and Controlled Coordinates of Technological Process of Ecopirogenезис], (2011), *J. Technical News Publ.*, Ukraine, 1(33) – 2(34), pp. 13 – 16 (In Ukrainian).

2. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V. Sintez Sistemi Keruvannya Rivnem Zavantazhenosti Reaktora Tekhnologichnogo Kompleksu Ekopirogenезису na Bazi Neiroregulyatoriv [Synthesis of the Reactor Load Level Control System of Ecopirogenезис Technological Complex Based on the Neural Network Controllers], (2013), *J. Proceedings ONPU Publ.*, Odessa, Ukraine, vupusk 1(40), pp. 122 – 131 (In Ukrainian).

3. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V. Sintez ta Doslidzhennya Matematichnoї Modeli Bagatokonturnoї Tsirkulyatsiinoї Sistemi Kompleksu Ekopirogenезису na Nechitkii Logitsi [Synthesis and Research of Mathematical Model of Ecopirogenезис Complex Multi-circuit Circulatory System on the Basis of Fuzzy Logic], (2013), *J. Bulletin KNTU Publ.*, Ukraine, 1(40), pp. 122 – 131 (In Ukrainian).

4. Markina L.M. Rozrobka Novitn'oї Tekhnologii Energozberezhennya ta Ekologichnoї Bezpeki pri Utilizatsii Organichnikh Vidkhodiv Metodom Ekopirogenезису [Development of New Energy-saving and Environmental Safety Technology at the Organic Waste Disposal by Ecopirogenезис], (2011), *J. Collected Works of NUS Publ.*, vupusk 4, 8 p. (In Ukrainian).

5. Piegat A. Nechetkoe Modelirovanie i Upravlenie [Fuzzy Modelling and Control],

Trans. from engl. (2012), Moscow, Russian Federation, *BINOM Publ.*, 798 p. (In Russian).

6. Saveliev I.V. Kurs Obshchei Fiziki, tom 1. Mekhanika, Kolebaniya i Volny, Molekulyarnaya Fizika [Course of General Physics, Volume 1. Mechanics, Oscillations and Waves, Molecular Physics], (1973), Moscow, Russian Federation, *Science Publ.*, 512 p. (In Russian).

7. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V. Fuzzy Controllers in Reactors Control Systems of Multiloop Pyrolysis Plants: *Proceedings of 19th Fuzzy Colloquium*, (2012), *Zittau/Goerlitz Publ.*, Germany, pp. 15–22.

8. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V. Mathematic Modeling of Reactor's Temperature Mode of Multiloop Pyrolysis Plant, (2012), *Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management. Lecture Notes in Business Information Processing*, Springer, Vol. 115, pp. 178–187, doi: 10.1007/978-3-642-30433-0_18, url: <http://sci-hub.org/pdfcache/3f8fdbe495fe1217133611934ae03b61.pdf>

9. Kondratenko Y.P., Kozlov O.V. Multi-Sensor's Monitoring and Fuzzy System for Load Level Control of the Pyrolysis Reactor, (2013), *Modeling and Simulation in Engineering, Economics and Management: Proceedings of International Conference on Modeling and Simulation*, China, Crete, Greece, pp. 15 – 16.



Кондратенко
Юрій Пантелійович,
д.т.н., професор, каф.
інтелектуальних ін-
формаційних систем Чор-
номорського держ. ун-ту
ім. П. Могили, вул. 68
Десантників 10,
м. Миколаїв, Україна,
тел.: (0512)76-55-72



Козлов
Олексій Валерійович,
аспірант каф.
комп'ютеризованих систем
управління НУК ім. адм.
Макарова, пр. Героїв Ста-
лінграда 9,
м. Миколаїв, Україна,
тел.: (0512) 36 22 21