

*У статті розглядається можливість використання моделей управління ефективним споживанням обсягу електричної енергії аеропортами з нечітким регулятором. Розглянуті варіанти реалізації нечітких регуляторів. Виходячи з аналізу нечіткого управління, на підставі існуючих нечітких регуляторів запропоновані відповідні моделі і вирази передавальних функцій. Авторами визначені експерти та об'єкти управління моделі управління ефективним споживанням обсягу електричної енергії аеропортами*

**Ключові слова:** моделювання, управління, нечіткий регулятор система, електрична енергія, аеропорт

*В статье рассматривается возможность использования моделей управления эффективным потреблением объема электрической энергии аэропорта с нечетким регулятором. Рассмотрены варианты реализации нечетких регуляторов. Исходя из анализа нечеткого управления, на основании существующих нечетких регуляторов предложены соответствующие модели и выражения передаточных функций. Авторами определены эксперты и объекты управления модели управления эффективным потреблением объема электрической энергии аэропорта*

**Ключевые слова:** моделирование, управление, нечеткий регулятор система, электрическая энергия, аэропорт

УДК 519.714:335.5.02:621.317.38:656.71(045)  
DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30843

# ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБСЯГОМ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ АЕРОПОРТАМИ

**О. Л. Лещинський**  
Кандидат фізико-математических наук, доцент  
Кафедра економічної кібернетики\*

**Д. О. Бугайко**  
Кандидат економічних наук, доцент, провідний  
науковий співробітник НДЧ НАУ\*

**Н. П. Соколова**  
Старший викладач  
Кафедра автоматизації та енергоменеджменту\*  
E-mail: NataSokolova@bigmir.net  
\*Національний авіаційний університет  
пр. Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058

## 1. Вступ

Наявність світових кризових явищ, фактичний стан паливно-енергетичного комплексу України та перспективи його подальшого розвитку примушують розробляти та впроваджувати енергозберігаючі технології, енергоефективне виробництво, широко використовувати поновлювальні джерела енергії, що у сукупності потребує комплексного підходу та вимагає інтегрованого автоматизованого системного управління процесом і є найбільш діючим інструментом у подоланні енергозалежності, світових енергетичних і економічних криз. Постійний моніторинг процесу споживання електричної енергії, нормування питомих витрат та прогнозування обсягу споживання електричної енергії аеропорту з урахуванням особливостей обладнання та режимів роботи об'єктів дозволить отримати практичні рекомендації щодо якісного управління ефективністю споживання електричної енергії з метою удосконалення енергетичної безпеки.

Відомим є той факт, що система управління є динамічною системою, яка поводить себе бажаним чином, як правило, без втручання суб'єкта. Теорія управління [1–3] вивчає питання аналізу та синтезу систем управління. Основними компонентами системи управління (рис. 1) є: об'єкт, яким система повин-

на управляти, датчик (або система датчиків), який забезпечує отримання інформації про об'єкт, регулятор – один з найважливіших компонентів системи управління, який порівнює виміряні та бажані значення і регулює вхідні змінні об'єкта.

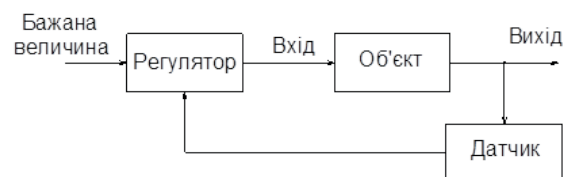


Рис. 1. Схема системи управління

В класичній теорії управління (зокрема лінійного оптимального) [4, 5] дуже часто робиться припущення, що об'єкт може бути представлений системою диференціальних (зокрема лінійних) рівнянь, в яких деякі компоненти вхідної змінної є стохастичними процесами. Для лінійного випадку диференціальне рівняння стану системи при вказаному припущенні може мати вигляд:

$$\dot{x}(t) = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t) + v_p(t),$$

$$x(t_0) = x_0,$$

де  $x(t)$  – стан об’єкта;  $u(t)$  – вхідна змінна;  $x_0$  – початковий стан, що описується стохастичною величиною;  $v_p(t)$  – збурювальна змінна представлена стохастичним процесом

Змінна, яка спостерігається  $y(t)$ , визначається виразом:

$$y(t) = C(t) \cdot x(t) + v_m(t),$$

де  $v_m(t)$  – шум спостережень, представлений також стохастичним процесом.

Керована змінна визначається у вигляді:

$$Z(t) = D(t) \cdot x(t).$$

Припускається також, що еталонна змінна  $r(t)$  є стохастичним процесом тієї ж розмірності, що і керована змінна  $Z(t)$ . Таким чином, при моделюванні найпростіших лінійних оптимальних систем управління, в загальному випадку, робиться припущення, що замкнений регулятор також може бути представлений лінійною системою управління диференціальних рівнянь з еталонною змінною  $r(t)$  і спостерігаючою змінною  $y(t)$  в якості вхідних впливів і вхідною змінною об’єкта  $u(t)$  в якості вихідної величини. Диференціальне рівняння стану замкненого регулятора має наступний вигляд:

$$\dot{q}(t) = L(t) \cdot q(t) + K_r(t) \cdot r(t) - k_f(t) \cdot y(t),$$

$$q(t_0) = q_0.$$

Рівняння вихідної змінної регулятора записується у вигляді

$$u(t) = F(t) \cdot q(t) + H_f(t) \cdot r(t) - H_f(t) \cdot y(t).$$

Індекс  $r$  відноситься до еталонної змінної, індекс  $f$  – до оберненого зв’язку. Змінна  $q(t)$  характеризує стан регулятора. Початковий стан  $q_0$  є або заданим вектором, або стохастичною величиною.

При  $k_f(t) \equiv 0, H_f(t) \equiv 0$  замкнений регулятор перетворюється в розімкнений. Тип системи управління, зокрема, залежить від типу регулятора. Зрозуміло, що велика кількість припущень і суттєва складність навіть найпростіших систем управління з точки зору класичної теорії з одного боку значно звужують сферу реального застосування даної теорії, а з іншого боку спонукають шукати альтернативні підходи розв’язання окремих класів реальних задач управління. Одним з таких підходів автори вважають теорію нечіткого управління, яка почала свій розвиток у восьмидесяті роки минулого століття.

Відомим також є той факт, що стохастичними об’єктами, а також деякими динамічними об’єктами можна управляти за допомогою статичних регуляторів (рис. 2). Управління при цьому здійснюється шляхом формування сигналу управління  $u$  на основі сигналу помилки  $e$  згідно характеристики регулятора  $u = F(e)$ .

Такі регулятори, як правило, використовуються в управлінні об’єктами, для яких вимоги до точності управління невисокі. Одним з таких «об’єктів» можна вважати ефективність впровадження енергозбері-

гаючих заходів аеропорту. Якщо статичний регулятор справляється з покладеними на нього задачами, то його використання вважається виправданим при врахуванні порівняної простоти його використання. Можна навести багато прикладів різного роду статичних регуляторів, а також нечітких їх «аналогів» (рис. 3). Наприклад,

R1: Якщо ( $e=N$ ), тоді ( $u=N$ ),

R2: Якщо ( $e=P$ ), тоді ( $u=P$ ).

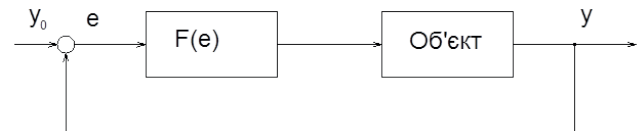


Рис. 2. Система управління з статичним регулятором

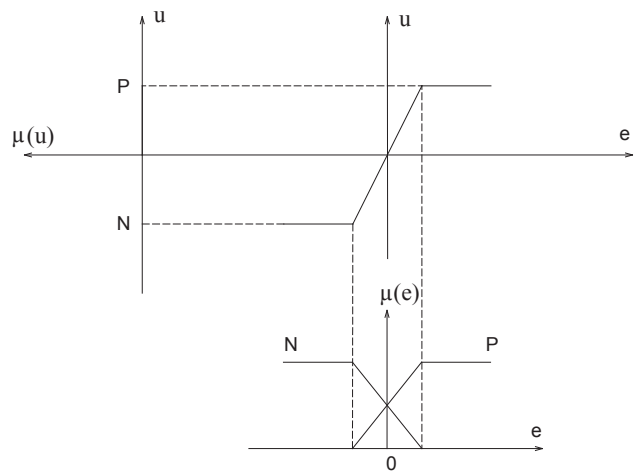


Рис. 3. «Лінійний» статичний регулятор і його нечіткий апарат

Авторами розглядається можливість використання нечітких регуляторів для підвищення точності системи управління ефективним споживанням електричної енергії аеропортами.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Результати науково-дослідної діяльності в області управління процесами на підприємстві привели до успішного практичного розв’язання ряду складних та взаємозалежних завдань управління в різноманітних галузях промисловості [6–15], що дозволило, опираючись на їх роботи, сформувати цілі та задачі управління ефективним споживанням електроенергії аеропортами, оскільки вони мають свої, притаманні тільки їм особливості.

Для підвищення рівня ефективності енергоспоживання необхідно сформувати методологічні основи щодо надійної системи управління ефективністю енергоспоживання аеропортами з використанням системного комплексного підходу до розробки нових моделей управління.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка моделі управління ефективним споживанням електричної енергії аеропортами.

Реалізація поставленої мети зумовила необхідність послідовного вирішення наступних науково-технічних задач таких як:

- аналіз існуючих методів та моделей управління ефективним споживанням електричної енергії;
- аналіз сучасної системи управління ефективним споживанням електричної енергії аеропортами;
- розробка моделі управління ефективним споживанням електричної енергії аеропортами з нечітким регулятором.

### 4. Матеріали та методи дослідження для моделювання нечіткого регулятора системи управління обсягом споживання електричної енергії аеропортами

Якщо використовувати функцію належності відповідного виду, можна отримати довільну нелінійну характеристику регулятора (рис. 4). Дослідження показують, що нечіткі моделі є універсальними апроксиматорами для систем, які моделюються, тобто з їх допомогою можна отримувати наближені представлення систем з довільною наперед заданою точністю. Різниця між чітким (звичайним) статичним регулятором і нечітким полягає в тому, що алгоритм роботи нечіткого регулятора [10] формується за допомогою простих і зрозумілих лінгвістичних правил, а не у вигляді математичних достатньо складних виразів.

- R1: Якщо  $(e=A_1)$ , тоді  $(u=B_1)$ ,
- R2: Якщо  $(e=A_2)$ , тоді  $(u=B_2)$ ,
- ...
- R8: Якщо  $(e=A_8)$ , тоді  $(u=B_8)$ .

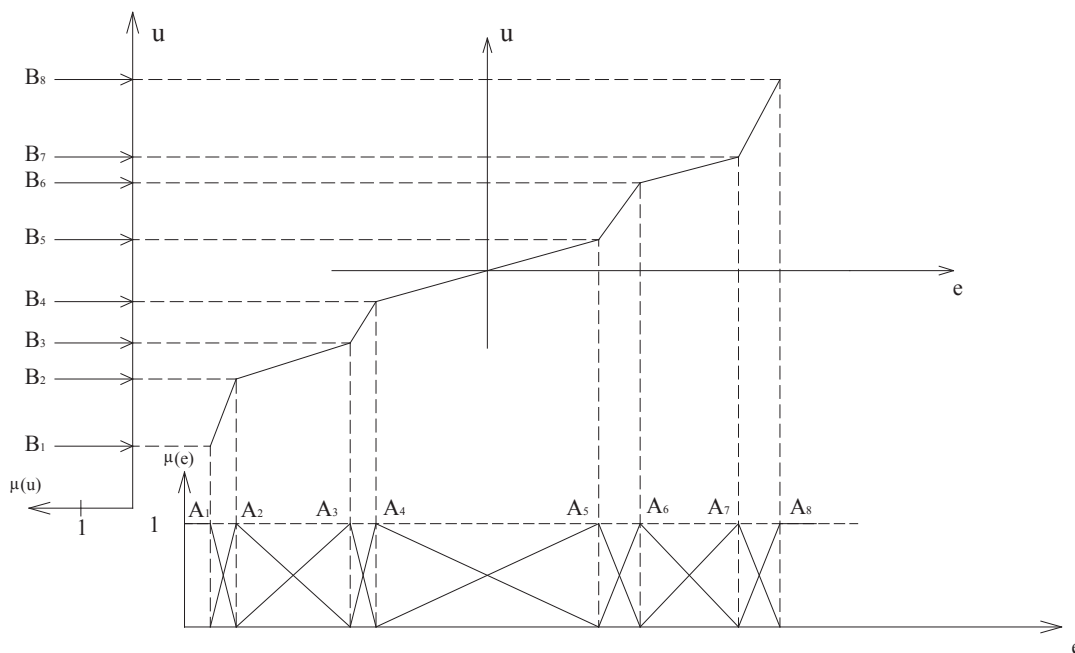


Рис. 4. Ускладнена статична характеристика регулятора і її нечіткий аналог

Отже, використання даного регулятора (рис. 5) дозволить підвищити якість системи моделювання енергоефективності авіапідприємств, що є надзвичайно актуальним в умовах кризових економічних явищ та має практичне значення для удосконалення економічної безпеки аеропорту.

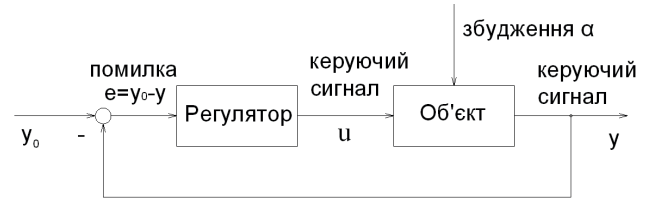


Рис. 5. Система управління з динамічним регулятором

На практиці найбільш часто використовується динамічний регулятор (рис. 6), що відноситься до класу ІДП (інтегрально – диференціально пропорційних) (табл. 1). Його налаштування здійснюють, наприклад застосовуючи правила Циглера-Ніколса.

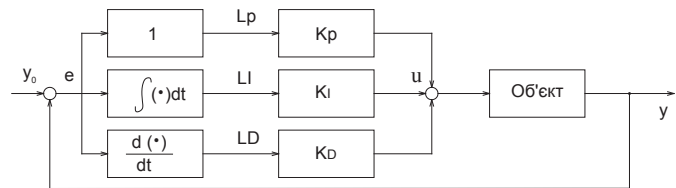


Рис. 6. Система управління з звичайним ІДП – регулятором

$$k_p = \text{const}, k_I = \text{const}, k_D = \text{const},$$

$k_p, k_I, k_D$  – коефіцієнт підсилення.

Нечіткі ІДП-регулятори найчастіше сьогодні реалізуються в цифровій формі. При цьому використо-

вується один з двох варіантів: пряме регулювання (рис. 7) та інкрементне регулювання. Варіант з прямим регулюванням (рис. 8) менш чутливий до шуму  $e$  на вхідному сигналі. У випадку прямого регулювання регулятор обчислює безпосереднє значення управляючого сигналу  $u_k$  на кожному кроці дискретизації.

Таблиця 1

Класифікація нечітких регуляторів

Умови	Вид регулятора
$k_I=0$	ДП-регулятор
$k_D=0$	ІІ-регулятор
$k_I=k_D=0$	П-регулятор

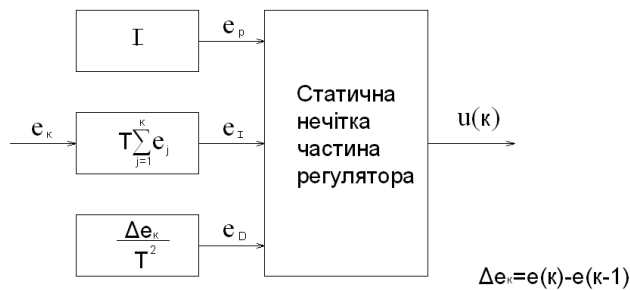


Рис. 7. Варіант нечіткого ІДП-регулятора для прямого регулювання

Для чіткого ІДП-регулятора вихід  $u$  є лінійною комбінацією входів статичної частини:

$$u = k_p \cdot e_p + k_I \cdot e_I + k_D \cdot e_D. \quad (1)$$

Як було вказано раніше  $k_p = \text{const}$ ,  $k_I = \text{const}$ ,  $k_D = \text{const}$ . Вони не залежать від значень сигналів. У випадку ІДП-регулятора (рис. 7) міркування наступні.

Для фазифікації кожного з сигналів  $e_p$ ,  $e_D$ ,  $e_I$  можна використати три нечіткі множини  $N$ ,  $Z$ ,  $P$ . Для де-

фазифікації використовують метод одноелементних нечітких множин з використанням 27 ( $3^3$ ) множин  $B_1, B_2, \dots, B_{27}$ . У відповідну базу правил входять 27 елементів – правил:

$R_1$ : Якщо  $(e_p=N) \& (e_I=N) \& (e_D=N)$ , то  $(u=B_1)$ ,

$R_2$ : Якщо  $(e_p=N) \& (e_I=N) \& (e_D=Z)$ , то  $(u=B_2)$ ,

...

...

...

$R_{27}$ : Якщо  $(e_p=P) \& (e_I=P) \& (e_D=P)$ , то  $(u=B_{27})$ .

### 5. Результати дослідження моделювання нечіткого регулятора для системи управління обсягом споживання електричної енергії аеропортами

Всі можливі комбінації множин входів  $N$ ,  $Z$ ,  $P$  формуються вхідними послідовностями в правилах утворюючи в результаті сформульовану базу правил. При цьому кожному правилу  $R_i$  відповідає єдина вихідна множина  $B_i$ ,  $i=1,27$ . Для спрощення варіанту нечіткого ІДП-регулятора фазифікацію можна реалізувати двома нечіткими множинами  $N$ ,  $P$  (рис. 9, а, б).

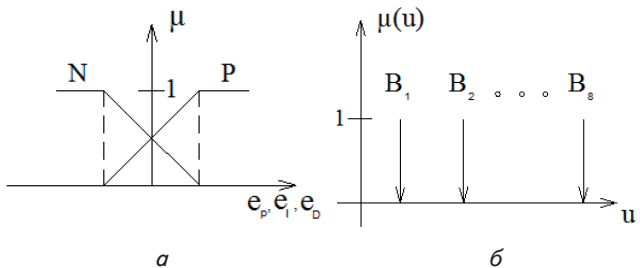


Рис. 9. Функції належності для входів і виходів нечіткого ІДП-регулятора двома нечіткими множинами  $N$ ,  $P$ : а – вхідні сигнали ІДП-регулятора нечіткими множинами  $N$ ,  $P$ ; б – вихідні сигнали ІДП-регулятора нечіткими множинами  $N$ ,  $P$

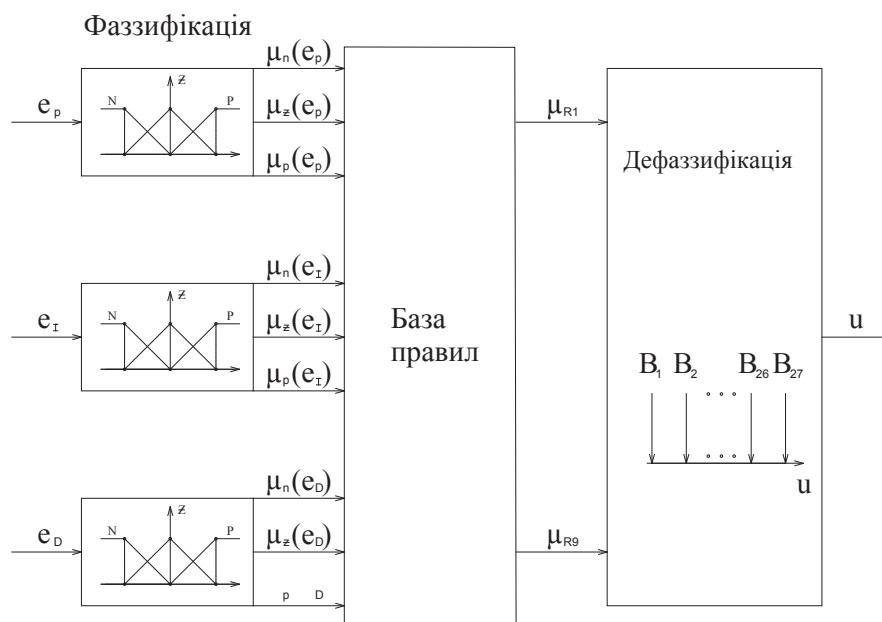


Рис. 8. Статична частина нечіткого ІДП-регулятора

Відомі різні варіанти реалізації нечітких ІДП-регуляторів. Зростання числа нечітких множин пов'язаних з входами збільшує, зрозуміло, число правил, які використовуються. Окрім того, це ускладнює структуру моделі нечіткого регулятора. Вираз (1) визначає лінійний оператор, що реалізується чітким ІДП-регулятором. Нелінійна операція, що здійснюється нечітким ІДП-регулятором з фазифікацією, що використовує три нечіткі множини (рис. 10, а, б), а логічна операція  $\&$  реалізується за допомогою оператора PROD, і для дефазифікації використовується метод одноточкових нечітких множин, може зображатись наступним чином:

$$u = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \sum_{k=1}^4 v_i \cdot \omega_i \cdot q_k \cdot (a_{0ijk} + a_{1ijk} \cdot e_p + a_{2ijk} \cdot e_1 + a_{3ijk} \cdot e_D + a_{4ijk} \cdot e_p \cdot e_1 + a_{5ijk} \cdot e_p \cdot e_D + a_{6ijk} \cdot e_1 \cdot e_D + a_{7ijk} \cdot e_p \cdot e_1 \cdot e_D).$$

Для оператора PROD обчислення функції належності добутку нечітких множин здійснюється відповідно формулі:

$$\mu_{\text{ЛПВ}} = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x), \forall x \in X.$$

Логічні змінні  $v_i, \omega_i, q_k$  відтворюють інформацію відносно поточних значень належності вхідних сигналів деякому заданому сектору вхідного простору.

Наприклад, значення  $v_i$  можна задавати за допомогою відношень виду:

$$v_1 = \begin{cases} 1, e_p \leq e_{p1} \\ 0, \text{інші випадки} \end{cases}$$

$$v_2 = \begin{cases} 1, e_{p1} < e_p \leq e_{p2} \\ 0, \text{інші випадки} \end{cases}$$

$$v_3 = \begin{cases} 1, e_{p2} < e_p \leq e_{p3} \\ 0, \text{інші випадки} \end{cases}$$

$$v_4 = \begin{cases} 1, e_{p3} < e_p \\ 0, \text{інші випадки} \end{cases}$$

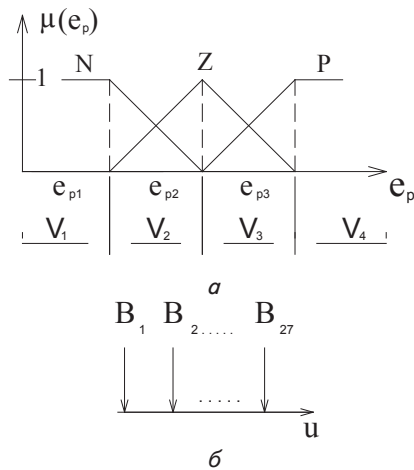


Рис. 10. Функції належності для входів і виходів нечіткого IDP-регулятора: а – вхідні сигнали IDP-регулятора нечіткими множинами N, Z, P; б – вихідні сигнали IDP-регулятора нечіткими множинами N, Z, P

Аналогічно пояснюються змінні  $\omega_j$  (для  $e_1$ ) та  $q_k$  (для  $e_D$ ).

Відомим є той факт, що нечіткий IDP-регулятор реалізує відображення входів і виходів, яке можна представити у вигляді полілінійної гіперповерхні, зібраної з 64 сегментів (всі можливі комбінації  $v_i, \omega_j, q_k, i, j, k = 1, 2, 3, 4$ ). Така поверхня належить простору  $IR^4$ . Наприклад, для нечіткого DP-регулятора відповідна гіперповерхня (рис. 11), що відповідає відображенню входів і виходів складається з 16 прямокутних полілінійних секторів  $IR^3$ .

$$u_{ij} = a_{0j} + a_{1ij} \cdot e_p + a_{2ij} \cdot e_D + a_{3ij} \cdot e_p \cdot e_D.$$

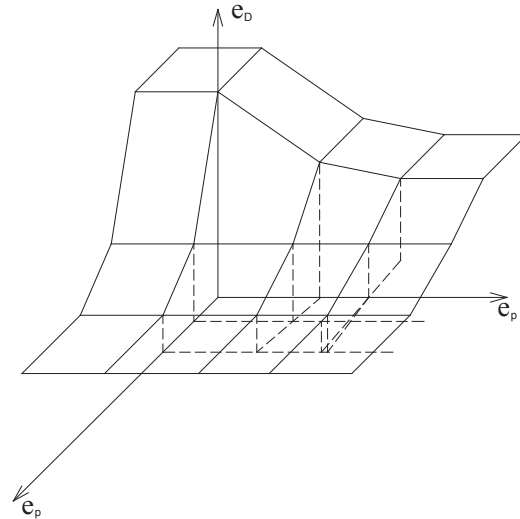


Рис. 11. Поверхня відображення входів у виходи для нечіткого DP-регулятора

Чіткому IDP-регулятору (рис. 12) відповідає площина з двома вільними параметрами  $k_p$  і  $k_D$ , які задають нахил її в певній системі координат.

$$u = k_p \cdot e_p + k_D \cdot e_D$$

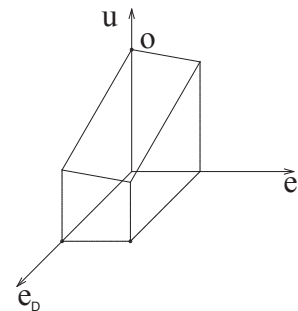


Рис. 12. Поверхня відображення входів у виходи чіткого DP-регулятора

Таким чином, поверхня для нечіткого DP-регулятора, що складена з 16 сегментів, що є полілінійні поверхні, які стикаються між собою по відрізках прямих ліній можуть бути розташовані в просторі різним чином. Крім того, існує можливість впливати на характеристики опуклості цих сегментів. Ці налаштування здійснюються підбором відповідним чином 15-ти вільних змінних в описанні даної поверхні (модульні значення функцій належності для входів  $e_p$  і  $e_D$  і виходу  $u$ ). Вказана властивість є важливою характеристикою DP-регулятора – характеристикою можливості забезпечення високої якості регулювання.

Відомим є той факт, що спроектований необхідним чином нечіткий IDP-регулятор (тобто такий, для якого коректно обрані вид операторів &, процедури дефазифікації і виводу на правилах, а також функцій належності) може інтерпретувати відображення входів у вихід, що здійснює будь-який чіткий IDP-регулятор.

Обернена в загальному випадку задача розв'язку немає. Згідно поглядів науковців нечіткі ІДП-регулятори прийнято застосовувати для управління нелінійними об'єктами, особливо коли модель такого об'єкта з необхідною точністю отримати дуже важко, або взагалі неможливо.

Відомим також є той факт, що якщо орієнтуватись на якість регулювання, то будь-яку задачу управління незалежно від виду регулятора (лінійного, або нелінійного) можна трактувати як нелінійну.

Використовуючи відомі факти з теорії управління та нечіткого управління [5, 16] і жодним чином не привласнюючи їх собі, автори даної статті вивчають питання коректності застосування їх до моделювання управління обсягами споживання електричної енергії світлосигнального обладнання аеропорту. В [17] була побудована економетрична модель прогнозування вказаного показника. Однією з гіпотез авторів є думка, що по меншій мірі на початковому етапі управління вказаними показником буде здійснюватись суб'єктом управління, якого в подальшому називатимемо експертом. Зрозуміло, що в багатьох випадках експерт, або не в повній мірі, або взагалі невзможливо сформулювати свої «ментальні знання» відносно управління об'єктом. У такому випадку сигнали, сформовані експертом (рис. 13) в процесі управління об'єктом, можна використати для побудови моделі даного експерта.

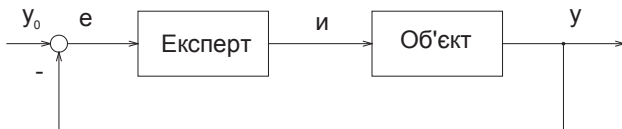


Рис. 13. Експерт як регулятор в системі управління з оберненим зв'язком

Для побудови моделі експерта необхідною є інформація (сигнал) про помилку  $e(t)$ . На цьому сигналі ґрунтуються рішення, що приймає експерт. Крім того необхідною є інформація  $u(t)$ . Це сигнал, що відтворюється експертом для управління об'єктом. До записів сигналів  $e(t)$  і  $u(t)$  застосовують методи, що відповідають поставленій задачі для побудови математичної моделі експерта, який вивчається тобто регулятора. Знання структури конкретного ручного управління об'єктом є дуже важливим фактором побудови експертної моделі. Відомі результати описання властивостей людини, що розглядається в якості елемента системи управління. Відомим також є припущення, що «людина-регулятор» працює як нелінійна адаптивна система управління. При невеликих амплітудах сигналу помилки людину оператора можна моделювати ПІ-регулятором. Це пояснюється тим, що фахівець в змозі ліквідувати статичні помилки. Це означає, що фахівець оператор в змозі успішно стабілізувати обсяг споживання електричної енергії об'єктами аеропорту. При збільшенні значення сигналу помилки оператор (експерт) працює наближено як ДП регулятор. Ця ситуація може виникати наприклад при заміні обладнання, різних змінах кількості рейсів, частоти застосування світлосигнального обладнання залеж-

ності від метеоумов з метою ефективного споживання електричної енергії.

При великих значеннях сигналу помилки управління, реалізоване оператором стає нелінійним (двопозиційним), тобто таким, в якому управляючий сигнал  $u(t)$  часто і стрибкоподібно перемикається між двома значеннями – максимальним (верхнє насичення) і мінімальним (нижнє насичення). Зрозуміло, що людина оператор пристосовує метод управління до конкретного об'єкту управління. Для ДР моделі експерта наближено передавальну функцію можна записати у вигляді:

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{k_r \cdot e^{-sT_0} \cdot (1+s \cdot T_d)}{(1+s \cdot T_{nm}) \cdot (1+s \cdot T_r)}$$

де  $T_0$  – час запізнювання прийняття рішення;  $p$  – інерційність нервової системи;  $m$  – інерційність мускульної системи;  $T_{nm}$  – час відповідної затримки;  $T_d$  – постійна часу коригуюча за похідною;  $k_r$  – коефіцієнт підсилення, коригуючий за похідною;  $T_r$  – постійна часу, пов'язана з об'єктом управління.

Можна зауважити, що затримка  $T_0$  зростає, якщо управління здійснюється в ускладнених умовах і прийняття рішення ґрунтується на обробці великої кількості даних.

Відомим також є той факт, що динаміку людини, що управляє об'єктом або процесом можна наближено описати передавальною функцією виду:

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{e^{-sT_0}}{(1+s \cdot T_{nm}) \cdot (1+s \cdot T_r)} \cdot (k_p + k_D \cdot s + \frac{k_I}{s}),$$

де коефіцієнти підсилення  $k_p, k_D, k_I$  можуть змінюватись в залежності від налаштування управляючих дій до параметрів об'єкта виду вхідного (опорного) сигналу, виду збурюючого впливу.

## 6. Висновки

1. Значна кількість припущень і суттєва складність навіть найпростіших систем управління є поштовхом для пошуку альтернативні підходи розв'язання окремих класів реальних задач управління, вибору типу регулятора.

2. На основі аналізу методів та моделей управління ефективністю споживанням електричної енергії сформульовано основні вимоги для розроблення моделі управління ефективністю споживання електричної енергії аеропорту.

3. Використовуючи відомі факти з теорії управління та нечіткого управління для управління обсягами споживання електричної енергії аеропортами, пропонується в якості суб'єкта управління приймати експерта. Знання структури конкретного ручного управління об'єктом побудови експертної моделі, вибір необхідного нечіткого регулятора системи дозволять підвищити якість та точність системи моделювання енергоефективності, що є надзвичайно актуальним в умовах кризових економічних явищ та має практичне значення для удосконалення економічної безпеки аеропорту.

## Література

1. Зубов, В. И. Лекции по теории управления. Главная редакция физико-математической литературы [Текст] / В. И. Зубов. – М.: Наука, 1975. – 495 с.
2. Душин, С. Е. Теория автоматического управления [Текст] / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев и др. – М.: Высшая школа, 2005. – 205 с.
3. Имаев, Д. Х. Анализ и синтез систем управления [Текст] / Д. Х. Имаев, З. Ковальски, В. Б. Яковлев и др. – СПб., 1998. – 258 с.
4. Квакерпаак, Х. Линейные оптимальные системы управления [Текст] / Х. Квакерпаак, Р. М. Сиван. – Мир, 1977. – 650 с.
5. Красовский, Н. Н. Теория управления движением [Текст] / Н. Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
6. Roldán-López-de-Hierro, A.-F. Some new fixed point theorems in fuzzy metric spaces [Text] / A.-F. Roldán-López-de-Hierro, E. Karapinar, S. Manro // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2014. – Vol. 27, Issue 5. – P. 2257–2264.
7. Лежнюк, П. Д. Застосування парето-оптимальності  $\alpha$ -рівня для розв'язування задач енергетики з нечіткими параметрами [Текст] / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4(39). – С. 144–146.
8. Суздаль, В. С. Редукция модели при синтезе регуляторов для управления кристаллизацией [Текст] / В. С. Суздаль // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 2, № 3(50). – С. 31–34. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1745/1642>
9. Суздаль, В. С. Оптимизация задачи синтеза управления для процессов кристаллизации [Текст] / В. С. Суздаль // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 6, № 3 (54). – С. 41–44. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/2247/2051>
10. Seraya, O. V. Linear regression analysis of a small sample of fuzzy input data [Text] / O. V. Seraya, D. A. Demin // Journal of Automation and Information Sciences. – 2012. – Vol. 44, Issue 7. – P. 34–48. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v44.i7.40
11. Demin, D. A. Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath [Text] / D. A. Demin // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2012. – Vol. 6. – P. 52–58.
12. Демин, Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределенности [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 9 (65). – С. 14–19. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452/16199>
13. Демин, Д. А. Синтез систем управления технологическими процессами электродуговой плавки чугуна [Текст] / Д. А. Демин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 2, № 10 (57). – С. 4–9. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3881/3557>
14. Кудинов, Ю. И. Нечеткие регуляторы в системе управления [Текст] / Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пащенко // Control Science. – 2004. – № 3. – С. 2–14.
15. Бураков, М. В. Синтез нечетких логических регуляторов [Текст] / М. В. Бураков, А. С. Коновалов // Информационно-управляющие системы. – 2011. – № 1. – С. 22–27.
16. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / (Адаптивные интеллектуальные системы) [Текст] / А. Пегат; пер. с англ.; 2-е изд. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
17. Лещинський, О. Л. Модель прогнозування обсягу споживання електричної енергії світлосигнального обладнання аеропорту [Текст] / О. Л. Лещинський, В. С. Коновалюк, Н. П. Соколова // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – Т. 2, № 1 (16). – С. 27–31. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/23427/20905>