

УДК 004.032

С.Г. Удовенко¹, Д.В. Келембет²¹ ХНЕУ, м. Харків, Україна, serhiy.udovenko@hneu.net;² ХНУРЕ, м. Харків, Україна, kelembet@gmail.com

КЕРУВАННЯ АГРЕГАТАМИ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКИХ ІНВЕРСНИХ МОДЕЛЕЙ

Розглянуто можливість і доцільність застосування для управління агрегатами компресорної станції нечітких інверсних моделей. Запропоновано модифікований алгоритм побудови таких моделей. Сутність модифікації полягає в декомпозиції глобальної нечіткої MISO-системи на елементарні підсистеми і попередньої інверсії елементарних комірок нечіткої моделі з подальшим переходом до інверсії нечіткої глобальної моделі.

НЕЧІТКА ІНВЕРСНА МОДЕЛЬ, КОМПРЕСОРНА СТАНЦІЯ, ДЕКОМПОЗИЦІЯ, НЕЧІТКИЙ РЕГУЛЯТОР

С.Г. Удовенко, Д.В. Келембет. Управление агрегатами компрессорной станции с применением нечетких инверсных моделей. Рассмотрена возможность и целесообразность применения для управления агрегатами компрессорной станции нечетких инверсных моделей. Предложен модифицированный алгоритм построения таких моделей. Суть модификации заключается в декомпозиции глобальной нечеткой MISO-системы на элементарные подсистемы и предварительной инверсии ячеек нечеткой модели с переходом к инверсии нечеткой глобальной модели.

НЕЧЕТКАЯ ИНВЕРСНАЯ МОДЕЛЬ, КОМПРЕССОРНАЯ СТАНЦИЯ, ДЕКОМПОЗИЦИЯ, НЕЧЕТКИЙ РЕГУЛЯТОР

S.G. Udovenko, D.V. Kelembet. Control of compressor station units using a fuzzy inverse model. The possibility and expediency of application for control of aggregates of the compressor station of fuzzy inverse models is considered. A modified algorithm for constructing such models is proposed. The essence of the modification is the decomposition of the global fuzzy MISO-system on the elementary subsystem and the previous inversion of the elementary cells of the fuzzy model with the subsequent transition to the inversion of the fuzzy global model.

FUZZY INVERSE MODEL, COMPRESSOR STATION, DECOMPOSITION, FUZZY REGULATOR

Вступ

Оптимальний режим експлуатації магістральних газопроводів визначається роботою компресорних станцій. Завдання управління технологічними процесами (ТП) компресорної станції (КС) складаються в регулюванні витрати, тиску і температури газу. Управління газоперекачуючими агрегатами (ГПА) здійснюється автономними автоматичними системами регулювання. Існують регулятори тиску газу, багатоканальні вимірники і регулятори температури. В даний час регулювання здійснюється переважно з використанням цифрових ПІД-регуляторів [1]. Для організації ефективного функціонування систем управління компресорною станцією доцільно застосовувати системи з елементами штучного інтелекту [2]. Модель нечіткого керування компресорною станцією, як і модель будь-якої системи управління з нечітким описом параметрів, будується на основі формалізації суб'єктивних знань експертів.

Розглянемо можливість і доцільність застосування для управління ТП компресорної станції моделей з нечітким описом вихідних даних і нечітким логічним висновком. Режим роботи компресорної станції залежить від типів, схеми з'єднання, оборотів ГПА, температури і складу газу.

Припустимо, що існує інверсна система, здатна відповідно до заданої бажаної траєкторією

виробляти керуючий сигнал, який дозволяє домогтися збіжності керованого виходу ГПА (заданого тиску газу) до бажаної траєкторії. В цьому випадку синтез регулятора можна звести до проблеми визначення інверсної системи. Ідея використання інверсних моделей для класу лінійних і нелінійних систем отримала розвиток в роботах [3, 4]. Це призводить до необхідності розглянути можливість використання нечітких систем Такагі-Сугено як інверсних моделей ТП КС. Однак при наявності невизначеностей і збурень реалізація подібної схеми управління у відкритому контурі може привести до низької якості роботи, що синтезується системи і навіть до нестійким режимам. Метою даної роботи є дослідження можливості і доцільності використання інверсних нечітких компенсаційних регуляторів в замкнутих системах цифрового керування з внутрішньою нечіткою моделлю, що відбиває динамічні властивості технологічних процесів компресорної станції газоперекачувальної системи.

1. Характеристика задач керування компресорною станцією

Призначення лінійної КС – забезпечення транспорту газу через кожну чергову ділянку газопроводу, до наступної КС. Лінійні КС використовують газоперекачувальні агрегати (ГПА) з газотурбінним

або електромоторним приводом і працюють у режимі стабілізації вихідного тиску. Кожна станція повинна компенсувати втрати тиску на попередній лінійній ділянці, що виникають через тертя газу по стінках труби, відновлюючи тиск на виході КС до рівня уставки, яка задається оперативно-диспетчерською службою.

Лінійна КС, стабілізуючи тиск на вході лінійної ділянки, тим самим не допускає поширення хвиль тиску (результат дії збурень) на інші ділянки МГ, підвищуючи пропускну здатність МГ і знижуючи непродуктивні втрати потужності в агрегатах інших КС, викликані змінами їх частот обертання. Проаналізуємо коротко режим газопроводу, використовуючи газодинамічні залежності, що описують встановлене протікання газу у достатньо протяжній трубі. Витрата газу q , млн.м³/доб, через газопровід довжиною L , км, визначається формулою

$$q = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot D^{2,5} \sqrt{(P_{\text{вих}}^2 - P_{\text{вх}}^2) / (\lambda \Delta T_{\text{cp}} LZ)}$$

де: $P_{\text{вих}}$, $P_{\text{вх}}$ – початковий та кінцевий тиск на ділянці МГ, кгс/см²; $\Delta = R_{\text{в}}/R_{\text{г}}$ – відносна густина газу (за повітрям); $R_{\text{в}}$, $R_{\text{г}}$ – газова стала повітря та газу при атмосферному тиску; λ – коефіцієнт гідравлічного опору; T_{cp} – середня температура газу на даному МГ, К; D – діаметр труби, мм; Z – коефіцієнт стиснення газу.

Значення сумарної потужності КС для конкретного МГ дозволяє вибрати необхідне число ГПА (з урахуванням необхідного резерву). Спрощений графік розподілу тиску за довжиною газопроводу наведено на рис. 1. Функція, що описує залежність падіння тиску від відстані до КС, близька до лінійної (максимальне відхилення Δ не перевищує 7%).

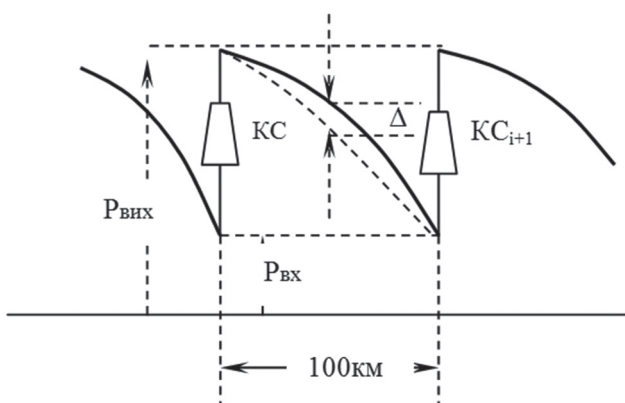


Рис. 1. Розподіл тиску за довжиною МГ

При керуванні технологічним режимом необхідно враховувати специфіку КС як об'єкта керування. Вона полягає в наступному:

– зміна частоти обертання одного з ГПА викликає зміну витрати та потужності всіх ГПА КС (тобто працює схема “кожний впливає на всіх”, (рис. 2);

– коефіцієнти взаємовпливу агрегатів невідомі і непостійні, залежать від режиму ГПА і фактичних витратно-напірних характеристик нагнітачів;
– взаємовплив реалізується з запізненням (вплив відстані між агрегатами “за газом”).

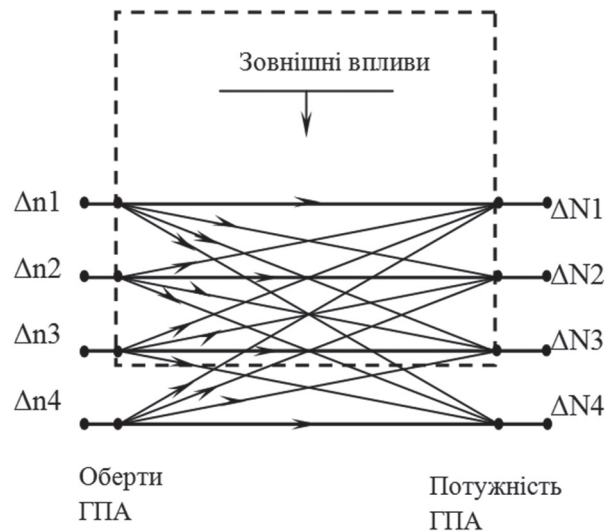


Рис. 2. Залежність потужності КС від обертів ГПА

Після зміни завдання з вихідного тиску оператор для підвищення тиску покроково збільшує частоти обертання агрегатів та оцінює після закінчення перехідних процесів для кожного ГПА запаси регулювання за параметрами САК ГПА, які контролюються. При практичному обнулінні сигналу неузгодженості за будь-яким параметром ГПА, подальше навантаження цього ГПА неможливо, тобто необхідно перерозподіляти навантаження між агрегатами, або вводити резервний агрегат, або змінити уставку вихідного тиску.

Цей процес зручно аналізувати та ілюструвати з використанням режимної площини, що має координати – витрата (Q) та ступінь стиснення (ϵ). Особливість цієї площини – кожній її точці відповідає єдине значення корисної потужності $N_{\text{п}}$, яка віддається ГПА у зовнішню мережу.

Виділимо ту частину площини ϵ , Q , усі точки якої відповідають режимам, при яких параметри ГПА, що функціонально зв'язані з потужністю, не досягають рівнів обмеження, тобто виконується умова

$$N_{\text{min}} < N < N_{\text{max}}$$

Цю частину режимної площини називають областю допустимих режимів (ОДР) агрегату. Оскільки ГПА складається з газотурбінної установки (ГТУ) та відцентрового нагнітача (ВЦН), ОДР ГПА може бути отримана накладенням областей припустимих режимів ГТУ та ВЦН і виділенням тих ділянок, що одночасно належать зазначеним ОДР (рис. 3).

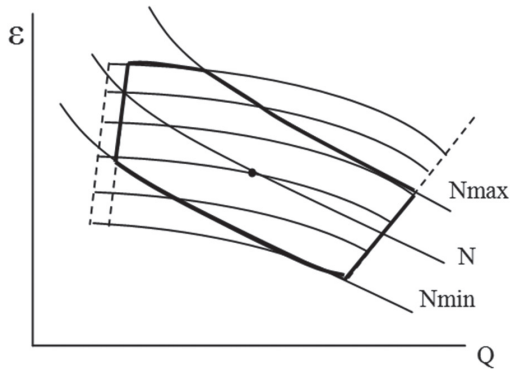


Рис. 3. Розподіл тиску за довжиною МГ

Таким чином, в системах керування агрегатами КС мають враховуватися нелінійності, що згідно з рис. 1 та рис. 3 є притаманними режимам роботи компресорних станцій.

Кінцева мета створення системи керування технологічними процесами транспортування газу полягає у підвищенні ефективності роботи газотранспортної системи за рахунок оперативного планування, централізованого контролю і управління режимами роботи основних технологічних об'єктів газопроводу в реальному часі.

Зокрема, завдання керування технологічними процесами (ТП) компресорної станції складаються в регулюванні витрати, тиску і температури газу. Управління газоперекачувальними агрегатами здійснюється автономними автоматичними системами регулювання, де застосовуються регулятори тиску газу, багатоканальні вимірники і регулятори температури. В даний час регулювання здійснюється переважно з використанням ПІ та ПІД-регуляторів [5].

Для організації ефективного функціонування систем керування компресорною станцією доцільно застосовувати системи з елементами штучного інтелекту. Схема нечіткого керування компресорною станцією, як і модель будь-якої системи керування з нечітким описом параметрів, будується на основі формалізації суб'єктивних знань експертів [6].

Визначення нелінійної моделі об'єктів цифрового керування може бути важким завданням, особливо для складних процесів (зокрема, для ТП КС). Альтернатива вирішення цієї проблеми полягає у використанні апроксимуючих можливостей нечітких систем для подання нелінійних динамічних процесів. Синтез регулятора при цьому може базуватися на інверсії нечіткої моделі.

2. Принцип інверсії та декомпозиції нечіткої моделі

Для цифрового керування перспективним є застосування нечітких систем Такагі-Сугено з постійним набором правил, що дозволяють отримувати формалізоване уявлення про чисельні процедур. Розглянемо систему Такагі-Сугено

\sum_f^n з n -вимірним входом (e_1, \dots, e_n) і скалярним виходом s (MISO - систему). Позначення \sum_f^n відповідає постійному набору наступних правил:

$R^{(i_1, \dots, i_n)}$: якщо e_1 дорівнює $A_1^{i_1}$ і ... і e_n дорівнює $A_n^{i_n}$, $s = \varphi(i_1, \dots, i_n)$, де $A_k^{i_k}$ ($k = \overline{1, n}$) – i -й символ, пов'язаний зі входом e_k ; $\varphi(i_1, \dots, i_n)$ – чисельне значення виходу, пов'язане з набором (i_1, \dots, i_n) .

Рис. 4 ілюструє принцип інверсії MISO-моделі Такагі-Сугено, застосовуваний для ідентифікації нелінійних систем.

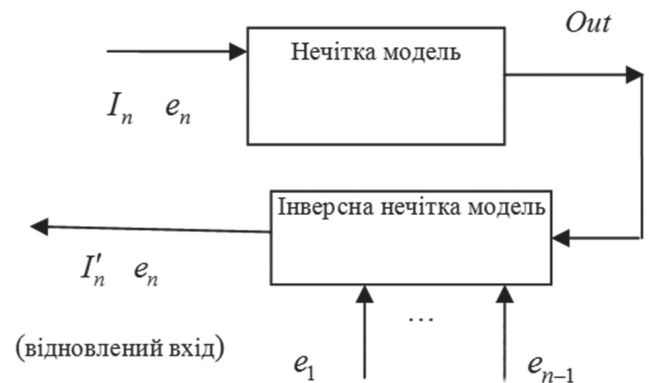


Рис. 4. Принцип інверсії нечіткої моделі

Згідно з рис. 4, якщо існує відповідність виходу (Out) і входів (I_n) нечіткої моделі, то можна поставити задачу відновлення входів (I'_n) по відомим виходам нечіткої моделі.

В роботі [3] пропонується метод інверсії нечіткої SISO-моделі. Поставимо задачу модифікації цього методу стосовно до задачі цифрового нечіткого MISO-керування. Суть модифікації полягає в декомпозиції глобальної нечіткої MISO-системи на елементарні підсистеми і попередньої інверсії елементарних осередків нечіткої моделі з подальшим переходом до інверсії нечіткої глобальної моделі. Розглянемо процедуру декомпозиції глобальної нечіткої системи на підсистеми на прикладі системи Такагі-Сугено \sum_f^2 з двома входами e_1 і e_2 , задану набором правил $R^{(i_1, i_2)}$ наступного вигляду: якщо e_1 дорівнює $A_1^{i_1}$ і e_2 дорівнює $A_2^{i_2}$, то $S = \varphi(i_1, i_2)$.

Вихід, що генерується такою системою, дорівнює:

$$s = \sum_{(i_1, i_2) \in I^2} \xi^{(i_1, i_2)}(e) \varphi(i_1, i_2); e = [e_1, e_2] \text{ і } I^2 = I_1 \times I_2$$

Ця система визначена на наступній множині:

$$E^2 = E_1 \times E_2 = [\alpha_1^{e_1}, \beta_1^{e_1}] \times [\alpha_2^{e_2}, \beta_2^{e_2}], \quad (1)$$

де $\alpha_p^{e_p}, \beta_p^{e_p}; p = \overline{1, 2}$ – відповідно мінімальне і максимальне значення інтервалів, що визначають елементи підмножин E_p .

Значення E_1 та E_2 можуть бути декомпозовані наступним чином:

$$E_1 = [\alpha_1^{e_1}, \beta_1^{e_1}] = \bigcup_{i_1=1}^{N_1-1} [a_1^{i_1}, a_1^{i_1+1}], \quad (2)$$

$$E_2 = [\alpha_2^{e_2}, \beta_2^{e_2}] = \bigcup_{i_2=1}^{N_2-1} [a_2^{i_2}, a_2^{i_2+1}]$$

где $a_1^{i_1}$ и $a_2^{i_2}$ — модальные значения нечетких символов $A_1^{i_1}$ и $A_2^{i_2}$.

Очевидно, що:

$$E_{(i_1, i_2)}^2 = [a_1^{i_1}, a_1^{i_1+1}] \times [a_2^{i_2}, a_2^{i_2+1}]; (i_1, i_2) \in I_*^2, \quad (3)$$

$$I_*^2 = \{(i_1, i_2) | i_p = 1, \dots, N_p - 1; p = 1, 2\}.$$

Кожне значення $E_{(i_1, i_2)}^2$ відповідає прямокутній елементарній нечіткій комірці, для якої активізуються 4 нечітких правила. В цьому випадку область E^2 утворюється об'єднанням двох комірок, що їй відповідають:

$$E^2 = \bigcup_{(i_1, i_2) \in I_*^2} E_{(i_1, i_2)}^2. \quad (4)$$

Таким чином, глобальна нечітка система, що розглядається, складається з $(N_1 - 1) \times (N_2 - 1)$ нечітких підсистем $\sum_f^{(i_1, i_2)}$, кожна з яких визначається сукупністю наступних правил:

$$s_{(i_1, i_2)} = \sum_{(v_1, v_2) \in \{0,1\}^2} (e) \phi(i_1 + v_1, i_2 + v_2). \quad (5)$$

Кожна нечітка підсистема $\sum_f^{(i_1, i_2)}$ визначається однією елементарною коміркою $E_{(i_1, i_2)}^2$, що містить 2^2 вузлів.

Таким чином, вихід, що генерується глобальною нечіткою системою, може бути однозначно представлений для сукупності входів, що відповідають кожній елементарній комірці $E_{(i_1, i_2)}^2$, за допомогою правил (5).

Звідси випливає, що в кожен момент часу для будь-якого входу вихід глобальної системи дорівнює виходу, що генерується підсистемою, яка визначається відповідною коміркою.

Узагальнюючи отримані результати на глобальну MISO - систему з n входами, можна показати, що в цьому випадку кожна підсистема визначається набором 2^n правил $R_{(i_1, \dots, i_n)}^{(v_1, \dots, v_n)}$: наступного вигляду: якщо e_1 дорівнює $A_1^{i_1+v_1}$ і e_n дорівнює $A_n^{i_n+v_n}$, то:

$$s_{(i_1, \dots, i_n)} = \phi(i_1 + v_1, \dots, i_n + v_n); \quad (6)$$

$$v_p = 0, 1; p = 1, \dots, n.$$

Таким чином, можна зробити висновок, що кожному входу глобальної нечіткої системи за допомогою набору правил типу (6) можна однозначно поставити у відповідність вихід нечіткої підсистеми.

Розглянемо як приклад нечітку модель динамічного керованого процесу, що представлена в [7]. Вона описується системою Такагі-Сугено, що базується на наборі правил $R^{(i_1, i_2)}$ наступного

вигляду: якщо вихід $y(k)$ дорівнює $A_1^{i_1}$ і керування $U(k)$ дорівнює $A_2^{i_2}$, то $S = \phi(i_1, i_2)$.

$$y(k+1) = \phi(i_1, i_2); i_1 = \overline{1,4}; i_2 = \overline{1,4}. \quad (7)$$

Повний набір правил системи Такагі-Сугено наведено в табл. 1. У цьому прикладі виходи e_1 і e_2 позначені відповідно як $y(k)$ і $u(k)$, а вихід системи S як $y(k+1)$.

Таблиця 1

Набір правил нечіткої системи (7)

$y \setminus u$	A_1^1	A_1^2	A_1^3	A_1^4
A_1^1	1.06	1.05	1.07	1.11
A_1^2	1.13	1.19	1.23	1.33
A_1^3	1.46	1.51	1.63	1.79
A_1^4	1,84	2.03	2.12	2.34

Декомпована нечітка система складається з 9 нечітких підсистем, що визначаються за допомогою 9 нечітких елементарних комірок, як це показано на рис.5. Вихід кожної з цих 9 підсистем визначається наступною залежністю:

$$s_{(i_1, i_2)} = \sum_{(v_1, v_2) \in \{0,1\}^2} \xi^{(i_1+v_1, i_2+v_2)} * \phi(i_1 + v_1, i_2 + v_2); \quad (8)$$

де $i_1 = \overline{1,3}$; $i_2 = \overline{1,3}$.

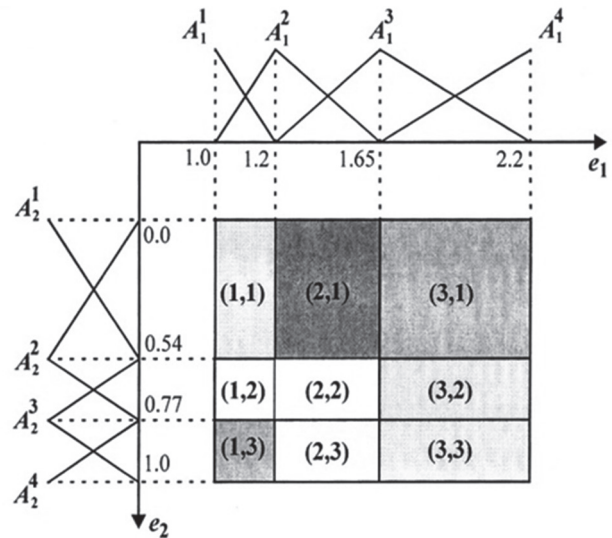


Рис. 5. Елементарні комірки нечіткої системи (7)

Наприклад, вихід підсистеми, яка визначається елементарною коміркою (1.1), відповідає такому керуванню:

$$s_{(1,1)} = \Psi^{(1,1)} [y(k), u(k)] = \sum_{(v_1, v_2) \in \{0,1\}^2} \xi^{(1+v_1, 1+v_2)} \phi(1+v_1, 1+v_2) = \quad (9)$$

$$= (0.350y(k) + 0.710) + (0.648y(k) - 0.666)u(k)$$

Виходи інших підсистем наведені в таблиці 2.

Очевидно, що кожен з цих виходів визначається однозначно відповідним правилом залежності (8).

Таблиця 2

Виходи підсистем нечіткої системи (7)

Нечітка комірка	Вихід нечіткої підсистеми
(1,1)	$0.710+0.350 y(k)+$ $(-0.666+0.648 y(k)) u(k)$
(1,2)	$0.537+0.465 y(k)+$ $(-0.347+0.434 y(k)) u(k)$
(1,3)	$1.140-0.204 y(k)+(-1.130+1.304$ $y(k)) u(k)$
(2,1)	$0.250+0.733 y(k)+(0.160-0.041$ $y(k)) u(k)$
(2,2)	$0.743+0.293 y(k)+$ $(-0.753+0.722 y(k)) u(k)$
(2,3)	$0.364+0.422 y(k)+$ $(-0.260+0.579 y(k)) u(k)$
(3,1)	$0.320+0.690 y(k)+$ $(-0.685+0.471 y(k)) u(k)$
(3,2)	$-0.543+1.073 y(k)+(0.913-0.237$ $y(k)) u(k)$
(3,3)	$0.226+0.525 y(k)+$ $(-0.086+0.474 y(k)) u(k)$

3. Алгоритм інверсії нечіткої моделі

Для отримання стратегії інверсії елементарних нечітких комірок важливою є правильна інтерпретація нечітких символів відповідних правил вибору. Для системи з двома входами кожне правило записується у наступному вигляді: «Якщо e_2 відповідає $A_2^{i_2}$, то $S_{(i_1, i_2)} = \varphi_{(i_1, i_2)}(i_2, e_1)$ ». Це правило можна інтерпретувати в такий спосіб: «Якщо вхід системи дорівнює $A_2^{i_2}$, то вихід системи буде дорівнювати $\varphi_{(i_1, i_2)}(i_2, e_1)$ ».

Інверсія цього правила відповідає такому твердженню: «Якщо потрібно, щоб вихід системи дорівнював $\varphi_{(i_1, i_2)}(i_2, e_1)$, то достатньо подати на вхід системи сигнал $A_2^{i_2}$ ». Звідси випливає наступне правило: «Якщо $S_{(i_1, i_2)}$ відповідає $C^{\varphi_{(i_1, i_2)}(i_2, e_1)}$, то $e_2 = \text{Mod}(A_2^{i_2}) = a_2^{i_2}$ », тобто маємо трикутну функцію належності з модальним значенням $\varphi_{(i_1, i_2)}(i_2, e_1)$. Зазначимо, що модальне значення $\text{Mod}(A_2^{i_2})$ відповідає нечіткому значенню $A_2^{i_2}$.

Можна показати, що при виконанні наведеного нечіткого правила (13) слушним є такий набір інверсних правил: «Якщо $S_{(i_1, i_2)}$ відповідає $C^{\varphi_{(i_1, i_2)}(i_2, e_1)}$, то $e_2 = a_2^{i_2}$; якщо $S_{(i_1, i_2)}$ відповідає $C^{\varphi_{(i_1, i_2)}(i_2+1, e_1)}$ то $e_2 = a_2^{i_2+1}$ ».

Інверсія, здійснювана на наведеній схемі, дозволяє перейти до етапу побудови глобальної нечіткої інверсної моделі. Для інверсії глобальної нечіткої системи, представленої сукупністю елементних нечітких підсистем, необхідно здійснити інверсію кожної з цих підсистем. Це завдання може мати безліч рішень, серед яких необхідно відповідно до деякого критерію вибрати найкраще.

З практичної точки зору важливо також визначити, чи всі підсистеми необхідно інвертувати або деякі з них можна виключити з розгляду. Обчислення

за розглянутим вище алгоритмом припускають, що для кожної підсистеми, що містить одну вхідну змінну, відомі значення інших $(n-1)$ входів.

Іншими словами, для інверсії системи по входах e_n мають бути визначені індекси комірок i_1, i_2, \dots, i_{n-1} . Нехай ці індекси дорівнюють $i_1^*, i_2^*, \dots, i_{n-1}^*$. Інверсія в цьому випадку передбачає розгляд підсистем $(i_1^*, i_2^*, \dots, i_{n-1}^*, i_n)$ для $i_n \in [1, N_n - 1]$, де N_n – число символів, що використовуються для створення змінної e_n . Таким чином, якщо $N_n = 2$, необхідно інвертувати тільки одну комірку. У загальному випадку, число інвертованих підсистем зменшиться до $N_n - 1$.

Визначимо умову існування єдиного рішення завдання побудови інверсної нечіткої моделі. Нехай вихідна система з n входами трансформована до нечітких SISO- підсистем згідно з набором наступних N_n правил: «Якщо e_n відповідає A_n^i , то $S_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i)} = \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i)}(1, z_1)$; якщо e_n відповідає A_n^2 , то $S_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i)} = \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i)}(2, z_1)$; якщо e_n відповідає A_n^n , то $S_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i)} = \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i)}(n, z_1)$, де $Z_1 = (e_1, \dots, e_{n-1})$ ».

Набір цих N_n правил будемо вважати монотонним, якщо виконуються умови:

$$\varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, 1)}(1, Z_1) < \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, 2)}(2, Z_1) < \dots < \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, N_n)}(N_n, Z_1) \quad (10)$$

або

$$\varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, 1)}(z, Z_1) > \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, 2)}(2, Z_1) > \dots > \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, N_n)}(N_n, Z_1).$$

У разі монотонності набору правил рішення задачі інверсії є єдиним. Дійсно, якщо S^* – значення виходу, для якого визначається інверсне рішення, то існує лише одне значення $i_n \in [1, N_{n-1}]$, для якого виконується нерівність:

$$\varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i_n)}(i_n, Z_1) \leq s^* \leq \varphi_{(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i_{n+1})}(i_n + 1, Z_1).$$

Звідси випливає, що тільки підсистема $(i_1^*, \dots, i_{n-1}^*, i_n)$ може генерувати вихід S^* , який необхідно інвертувати.

Для розглянутої вище нечіткої системи (7) нечітка комірка (1,1) моделі може бути трансформована в SISO-модель за наступними правилами: «Якщо $U(k)$ відповідає A_2^1 , то $S_{(1,1)} = \varphi_{(1,1)}(2, y(k)) = 0.7y(k) + 0.35$ ».

Побудуємо набір інверсних правил для моделі (10), виходячи з того, що вихід моделі $y(k+1)$ повинен бути рівним бажаному значенню $y_{des}(k+1)$. Відповідно до запропонованої вище процедури інверсії цей набір прийме наступний вигляд: «Якщо $y_{des}(k+1)$ відповідає $C^{\varphi_{(1,1)}(1, y(k))}$, то $C^{\varphi_{(1,1)}(1, y(k))} = 0,0$; якщо $y_{des}(k+1)$ відповідає $C^{\varphi_{(1,1)}(2, y(k))}$, то $U(k) = 0,54$ ».

Вихід відповідної системи визначається наступним чином:

$$u(k) = \frac{(0.350y(k) + 0.710)}{(0.648y(k) - 0.666)} + \frac{y_{des}(k+1)}{(0.648y(k) - 0.666)}, \quad (11)$$

де $y(k) \neq 1.0278$.

Узагальнення отриманих результатів на систему з n входами є тривіальним, оскільки форма SISO-моделі нечіткої підсистеми залишається незмінною для будь-якого числа входів глобальної системи.

4. Аналіз результатів моделювання

Для моделювання системи нечіткого керування ГПА КС з використанням інверсної моделі використовувалися можливості програмного середовища MATLAB, зокрема, пакета для моделювання динамічних систем Simulink і пакета синтезу нечітких систем управління Fuzzy Logic Toolbox.

Для різних діапазонів вихідного тиску (або ступеня стиснення газу) динамічні властивості ГПА можуть змінюватися (через нелінійність статичної залежності по каналу «швидкість обертів вала ГПА - вихідний тиск»). У зв'язку з цим було проведено поділ загального діапазону зміни вихідного тиску на 5 інтервалів, що дозволило після вибору функцій належності сформувати 5 лінійних підсистем (і, відповідно, 5 елементарних нечітких комірок). Правила визначення виходів для кожної з цих підсистем наведені в табл. 1.

Таблиця 3

Таблиця виходів підсистем моделі

№ п/с	Комірка	Вихід $y(k+1)$
1	(1,1)	$0,22y(k) + 0,87u(k) + 1,53$
2	(2,1)	$-0,18y(k) + 0,87u(k) + 1,1$
3	(3,1)	$-0,48y(k) + 0,87u(k) + 0,92$
4	(4,1)	$0,17y(k) + 0,87u(k) + 0,41$
5	(5,1)	$0,12y(k) + 0,87u(k) + 0,46$

Загальна схема моделювання системи цифрового керування ГПА з нечітким регулятором за допомогою засобів пакету Simulink представлена на рис. 6. У запропонованому цифровому SISO-регуляторі реалізований описаний вище метод нечіткого керування динамічним процесом, заснований на використанні інверсії внутрішньої нечіткої моделі.

Результати моделювання роботи системи при стрибкоподібній зміні уставки від 8,0 МПа до 8,5 МПа (діапазон елементарної комірки (3,1)) і подальшому її зниженні до 8,0 МПа підтвердив переваги запропонованої схеми нечіткого керування в порівнянні з ПІД-керуванням. Зміна режиму роботи ГПА здійснюється на верхньому рівні автоматизованої системи управління технологічними процесами КС.

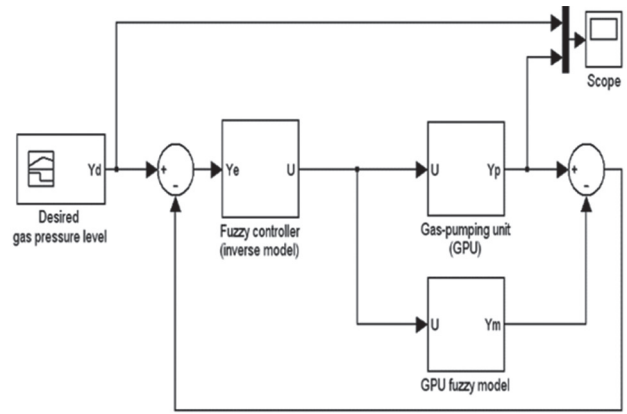


Рис. 6. Схема моделювання системи цифрового керування ГПА з інверсною моделлю

Висновки

У статті був розглянутий підхід до керування газоперекачувальними агрегатами компресорних станцій газотранспортної системи з використанням нечітких регуляторів. Запропоновано структуру MISO - системи цифрового керування, яка базується на застосуванні внутрішніх нечітких інверсних моделей. Для інверсії глобальної нечіткої системи, представлені сукупністю елементарних нечітких підсистем, згідно з наведеним алгоритмом здійснюється інверсія кожної з цих підсистем. В схемі компенсаційного регулювання вихідного тиску ГПА використано інверсну нечітку модель об'єкта керування. Наведено результати моделювання системи нечіткого керування агрегатами компресорної станції, які підтверджують ефективність застосування інверсних нечітких моделей для підтримки заданого тиску газу на виході компресорної станції.

Список літератури:

- [1] Ісаков А.Т., Експлуатація і технічне обслуговування газорозподільних станцій магістральних газопроводів (довідник) / А.Т. Ісаков, М.В. Хохлаєв, Б.С. Фланчик та ін. – Київ: "Росток". – 2003. – 411 с.
- [2] Удовенко С. Интеллектуальное управление компрессорной станцией / С. Удовенко, Д. Келембет // Матеріали XIV міжнародної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2018)», м. Вінниця, 15-17 жовтня 2018 р. – С.21.
- [3] Hao J. Inverse identification for control of nonlinear dynamical systems / J. Hao, J. Vandewalle // Proc. World Congress on Neural Networks '98, Portland 3. – 1998. – P.317–320.
- [4] Удовенко С.Г. Модифицированный метод построения инверсной нечеткой модели объекта цифрового управления / С.Г. Удовенко, Р. Альхайек // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2009. – Вип.4(12). – С.130–134
- [5] Боженюк А.В. Нечеткая классификация ситуаций и принятие решений в системах магистрального транспорта / А.В. Боженюк, В.В. Шадрин // Известия ТРТУ – Таганрог: Изд-во ТРТУ. – 2006. – № 10 (65). – С. 9–12.
- [6] Пергат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пергат. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2011. – 798 с.
- [7] Nauck D. Neuro-Fuzzy Systems for Function Approximation / D. Nauck, R. Kruse // Fuzzy Sets and Systems. – 1999. – Vol. 101, №2. – P. 261–271.
- [8] Коржик М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab: / М. В. Коржик. – Київ: НТУУ "КПІ", 2016. – 174 с.

Надійшла до редколегії 05.11.2018