

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 532.6.08

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-43-52

### ВИБІР МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗЧИНІВ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАФТОВИЛУЧЕННЯ

*В. Б. Біліщук, Р. Т. Боднар, О. Г. Малько*

*Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; e-mail: inst.energy@gmail.com*

Розглянуто актуальність застосування розчинів поверхнево-активних речовин в нафтовидобутку. Вказано, що для підвищення видобутку нафти з надр використовують фізико-хімічні методи впливу на продуктивні пласти із застосуванням поверхнево-активних речовин. Для оцінки ефективності застосуванням поверхнево-активних речовин вимірюють поверхневий натяг на межі розчин поверхнево-активної речовини – газ і міжфазний натяг на межі розчин поверхнево-активної речовини – нафта. Зроблений аналіз існуючих методів для вимірювання поверхневого натягу. На основі зробленого аналізу показано, що існує значне різноманіття методів визначення поверхневого натягу рідин, які можна згрупувати таким чином: методи визначення поверхневого натягу рідин, засновані на вивченні профілів менісків рідини фіксованої форми; методи двох менісків; методи екстремальних значень параметрів; методи, які використовують меніски на межі стійкості; спеціальні динамічні методи; методи, які використовують поле обертання. Вказано, що всі методи вимірювання поверхневого натягу є опосередкованими. Перелічено інформативні параметри, які контролюють або вимірюють для визначення поверхневого натягу розглянутими методами. Зазначено методи, що набули широкого розповсюдження: метод пластинки Вільгельма; методи лежачої, звисаючої і обертової краплі; метод притиснутої бульбашки, метод підрахунку крапель, метод відриву кільця, метод вимірювання максимального тиску в бульбашці газу. Розглянуто принцип побудови приладів, які реалізують методи вимірювання поверхневого натягу, вказано на особливості їх функціонування. Здійснено порівняльний аналіз методів і приладів для вимірювання поверхневого і міжфазного натягу рідин. На основі цього аналізу здійснений вибір методів для вимірювання міжфазного натягу розчинів поверхнево-активних речовин: методи лежачої або звисаючої крапель, об'єму крапель і обертової краплі.

**Ключові слова:** міжфазний натяг, поверхневий натяг, крапля, меніск, капіляр, капілярний тиск, кривизна.

Рассмотрены актуальность применения растворов поверхностно-активных веществ в нефтедобыче. Указано, что для повышения добычи нефти из недр используют физико-химические методы воздействия на продуктивные пласты с применением поверхностно-активных веществ. Для оценки эффективности применением поверхностно-активных веществ измеряют поверхностное натяжение на границе раствор поверхностно-активного вещества - газ и межфазное натяжение на границе раствор поверхностно-активного вещества - нефть. Сделан анализ существующих методов для измерения поверхностного натяжения. На основе сделанного анализа показано, что существует значительное многообразие методов определения поверхностного натяжения жидкостей, которые можно сгруппировать следующим образом: методы определения поверхностного натяжения жидкостей, основанные на изучении профилей менисков жидкости фиксированной формы; методы двух менисков; методы экстремальных значений параметров; методы, которые используют мениски на границе устойчивости; специальные динамические; методы, которые используют поле вращения. Указано, что все методы измерения поверхностного натяжения являются опосредованными. Перечислены информативные параметры, которые контролируют или измеряют для определения поверхностного натяжения рассмотренными методами. Указано методы, получившие широкое распространение: метод пластинки Вильгельма; методы лежащей, свисающей и вращающейся капли; метод прижатой пузырьки, метод подсчета капель, метод отрыва кольца, метод измерения максимального давления в пузырьке газа. Рассмотрены принцип построения приборов, реализующих методы измерения

поверхностного натяжения, указано на особенности их функционирования. Осуществлен сравнительный анализ методов и приборов для измерения поверхностного и межфазного натяжения жидкостей. На основе этого анализа осуществлен выбор методов для измерения межфазного натяжения растворов поверхностно-активных веществ: методы лежащей или свисающей капель, объема капель и вращающейся капли.

**Ключевые слова:** межфазное натяжение, поверхностное натяжение, капля, мениск, капилляр, капиллярное давление, кривизна.

The relevance of the use of surfactant solutions in oil production is considered. It is indicated that physicochemical methods of influence on productive strata with the use of surfactants are used to increase oil production from subsoil. To evaluate the effectiveness of the use of surfactants measure the surface tension at the boundary of the solution of surfactant - gas and the interfacial tension at the boundary of the solution of surfactant - oil. An analysis of existing methods for measuring surface tension. Based on the analysis, it is shown that there is a significant variety of methods for determining the surface tension of liquids, which can be grouped as follows: methods for determining the surface tension of liquids, based on the study of the profiles of the menisci of the fluid of a fixed shape; methods of two menisci; methods of extreme values of parameters; methods that use menisci on the verge of stability; special dynamic methods; methods that use the field of rotation. It is stated that all methods of measuring surface tension are indirect. The informative parameters which control or measure for definition of a surface tension by the considered methods are listed. The methods that have become widespread are indicated: the Wilhelm plate method; methods of lying, hanging and rotating drop; the method of the pressed bubble, the method of counting drops, the method of separation of the ring, the method of measuring the maximum pressure in the gas bubble. The principle of construction of devices that implement methods of measuring surface tension is considered, the peculiarities of their functioning are indicated. The comparative analysis of methods and devices for measurement of surface and interfacial tension of liquids is carried out. Based on this analysis, a choice of methods for measuring the interfacial tension of surfactant solutions was made: methods of lying or hanging drops, drop volume and rotating drop.

**Key words:** interfacial tension, surface tension, drop, meniscus, capillary, capillary pressure, curvature.

**Вступ.** Збільшення кількості нафти, що видобувається з продуктивних горизонтів, є одним з найбільш важливих завдань розробки нафтових родовищ. В даний час відомий ряд методів збільшення нафтовилучення, таких як фізико-гідродинамічні, теплові, фізико-хімічні й ін. Однак жоден з них не є універсальним і може бути застосований у якихось певних фізико-геологічних і промислових умовах.

Одними з методів підвищення ступеня видобутку нафти з надр є фізико-хімічні методи впливу на продуктивні пласти із застосуванням поверхнево-активних речовин (ПАР), які є найбільш доступними (особливо при використанні їх розчинів з низьким вмістом). Ці методи не вимагають великих додаткових капіталовкладень і унікального чи дефіцитного устаткування, виробництво ПАР налагоджено в досить широких масштабах [1].

**Аналіз публікацій та постановка завдання дослідження.** Залежно від мети оброблення розчини поверхнево-активних речовин можуть використовуватись для: зміни змочування поверхні породи, емульгування, антиемульгування, зниження твердості, очищення, гідрофобізації привибійної зони пласта з метою збільшення нафтовіддачі.

Загалом поверхнево-активні системи є водним, кислотним або вуглеводневим розчином, що містить поверхнево-активну речовину концентрацією 0,1–1 %, а за можливості, і 2–10 %. Нафтовитіснявальну функцію мають більшість ПАР, але найвищі показники витіснення залишкової нафти характерні для водних мицелярних розчинів та оксигетильованих ПАР [2, 3, 4].

Ефективність оброблення привибійної зони пласта поверхнево-активними речовинами залежить від великої кількості чинників як геолого-промислових, так і технологічних, що зустрічаються під час проведення конкретного методу інтенсифікації. До технологічних чинників відносяться тип ПАР та їх концентрація, кількість оброблень тощо [5].

Виходячи з вище сказаного існує актуальна задача контролю поверхневих властивостей розчинів ПАР, які використовують в конкретних умовах. Вибір типу ПАР і його концентрації в розчинах ПАР для технологічних процесів необхідно здійснювати з урахуванням фізико-хімічних параметрів контактуючих з цими розчинами інших фаз (газ, порода пласта, нафта), а також пластових умов, при яких проходять відповідні процеси.

Одними із найбільш визначальних параметрів, які характеризують якість підібраних для тих чи інших процесів ПАР у розчинах і які досить легко визначити без впливу різних суб'єктивних факторів, є поверхневий натяг (поверхнева енергія на межі контакту "розчин ПАР - газ") і міжфазний натяг (поверхнева енергія на межі контакту "розчин ПАР - пластова нафта" (конденсат). Вимірювання цих параметрів на вказаних вище межах контакту дозволить на основі отриманих результатів здійснювати підбір виду ПАР і його концентрацій у розчинах в залежності від пластових умов, особливо тоді, коли такі умови можуть бути відтвореними в процесі проведення вимірювань.

Сумарна енергія частинок рідини складається з енергії їх хаотичного (теплого) руху і потенційної енергії, обумовленої силами міжмолекулярної взаємодії. Для переміщення молекули з глибини рідини в поверхневий шар треба витратити роботу. Ця робота здійснюється за рахунок кінетичної енергії молекул і йде на збільшення їх потенційної енергії. Тому молекули поверхневого шару рідини мають більшу потенційну енергію, ніж молекули всередині рідини. Ця додаткова енергія, яку мають молекули в поверхневому шарі рідини, названа поверхневою енергією, пропорційна площі шару  $dS$  [6]:

$$dA = \sigma dS,$$

де  $\sigma$  – поверхневий натяг.

Поверхневий натяг залежить від домішок, наявних в рідині. Наприклад, наявність у воді найменшої кількості поверхнево-активних речовин зменшує її поверхневий натяг.

Метою роботи є огляд методів і засобів вимірювання поверхневого натягу рідин і вироблення рекомендацій щодо їх використання.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо існуючі методи вимірювання поверхневого натягу (табл. 1) [7]. Усі методи вимірювання поверхневого натягу є опосередкованими. До інформативних параметрів, на основі яких визначають поверхневий натяг, відносяться: характерні розміри менісків рідин (висота, діаметр та ін), координати точок профілю меніска (від 3 до 10000 і більше), кут нахилу меніска в характерних точках, діюча сила на

занурене у рідину тіло, густина або різниця густин контактуючих фаз, та ін. При контакті рідин з твердими тілами враховують змочування їх рідиною. Як видно на даний час розроблено велику кількість методів вимірювання поверхневого натягу, в яких використовують різноманітну кількість інформативних параметрів, що обумовлено особливостями застосування цих методів.

При розробці або використанні відповідних приладів також є важливими питаннями є забезпечення зручності і автоматизації процесів при проведенні досліджень, хімічної стійкості використаних деталей приладу, що контактують з досліджуваними речовинами.

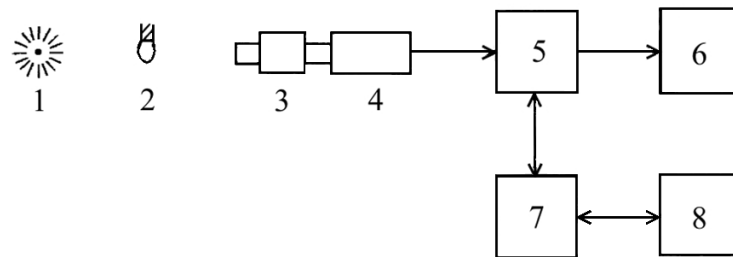
На практиці найбільшого поширення набули такі методи визначення поверхневого або міжфазного натягу рідин:

- метод вимірювання ваги зануреного предмета в досліджувану рідину (метод пластинки Вільгельма);
- метод вимірювання геометричних розмірів вільних поверхонь розділу фаз (методи лежачої, звисаючої або обертової краплі, методи лежачої, притиснутої бульбашки);
- сталагмометричний метод (метод підрахунку крапель);
- метод вимірювання зусилля відриву предмета від поверхні розділу фаз (відриву кільця – метод Дю-Нуї);
- метод вимірювання максимального тиску в бульбашці газу (метод Шредінгера).

(1) Характерною особливістю методів визначення поверхневого натягу рідин, заснованих на вивченні профілів менісків рідини є застосування оптичних засобів для вимірювання геометричних розмірів краплі. Значення поверхневого натягу розраховують, використовуючи табличні дані, виміряних розмірів краплі, різниці густин рідини і оточуючого газу. В доцифровий період в таких приладах використовували вимірювальні мікроскопи або установки, в яких проектували зображення краплі рідини на екран. В сучасних приладах (рис. 1) використовують відеокамеру і комп'ютер. За допомогою відеокамери отримують цифрове зображення краплі або меніска рідини, а за допомогою комп'ютера (точніше програмного забезпечення, яке працює на комп'ютері) здійснюють необхідні вимірювання розмірів меніска рідини і розрахунок поверхневого натягу. Застосування комп'ютера дає змогу автоматизувати процеси вимірювання.

Таблиця 1 – Класифікація методів вимірювання поверхневого натягу

Підклас методів	Назва методу	Вимірювані або контрольовані параметри
Методи визначення поверхневого натягу рідин, засновані на вивченні профілів менісків рідини фіксованої форми	Метод лежачої краплі	Радіус кривизни, висота краплі, екваторіальний діаметр, діаметр „шийки”, відстань від екватора до вершини, координати точок
	Метод звисаючої краплі	Координати точок профілю меніска краплі (кількість залежить від отриманих даних в експерименті і складає від 20 до 100000)
	Ітераційні варіанти методів лежачої і звисаючої краплі	Діаметр циліндра, висота меніска, діаметр меніска на певній висоті (з прив'язкою до діаметра циліндра), діаметр "шийки" меніска
	Метод розгорнутого меніска	Діаметр циліндра, координати точок профілю меніска
	Ітераційний варіант методу розгорнутого меніска [8]	Висота підйому рідини в капілярі, радіус капіляра
	Капілярного підняття в кільцевому зазорі	Висоту підйому рідини між циліндрами, діаметри циліндрів.
Методи двох менісків	Метод меніска у плоскій стінки	Висота меніска, крайовий кут змочування, координати і кут нахилу в двох точках меніска
	Метод вертикального циліндра	Сила, що діє на циліндр з боку рідини, радіус циліндра, глибина занурення або висота підняття циліндра
	Метод пластинки Вільгельма	Сила, що діє на пластинку з боку рідини, розміри пластинки
Методи екстремальних значень параметрів	Метод максимальної висоти лежачої краплі	Екстремум висоти краплі при збільшенні її об'єму
	Метод витягування вертикального циліндра	Максимальне значення сили, яка діє на циліндр з боку рідини під час його піднімання, діаметр циліндра
	Метод витягування кулі	Максимальне значення сили, яка діє на кулю з боку рідини під час її піднімання, висота піднімання кулі, діаметр кулі
	Метод витягування конуса	Максимальне значення сили, яка діє на конус з боку рідини під час його піднімання, розміри конуса і кут при його вершині
	Методи витягування пластинки і порожнистого циліндра	Максимальне значення сили, яка діє на пластинку або циліндр з боку рідини під час піднімання, довжина пластинки, діаметр циліндра
	Методи витягування горизонтального циліндра і кільця	Максимальне значення сили, яка діє на циліндр або кільце з боку рідини під час піднімання, діаметр циліндра, діаметр дротини кільця, діаметр кільця.
Методи, які використовують меніски на межі стійкості	Метод максимального тиску в бульбашці або краплі	Максимальний тиск в бульбашці, діаметр капіляра, глибина занурення капіляра
	Метод ваги крапель	вимірюванні ваги або об'єму краплі рідини, що відривається від капіляра, радіус капіляра
	Метод максимальної висоти висячої краплі	Максимальна висота краплі перед відривом, радіус капіляра
	Методи відриву тіл	Максимальне значення сили що діє на тіло при його витягуванні з рідини, форма, вага і розміри тіла
Спеціальні динамічні методи	Метод осцилюючого струменя	Частота коливань струменя, розміри і форма отвору, швидкість струменя або розхід рідини, в'язкість рідини
	Метод струменевого принтера	Швидкість і максимальна довжина струменя рідини, кінетична в'язкість рідини
	Метод рідкої завіси	Швидкість рідини, потік маси рідини на одиницю ширини завіси, кут розходження завіси після перешкоди
	Метод капілярних хвиль	Частота коливань, довжина хвилі на поверхні рідини, в'язкість рідини
Методи, які використовують поле обертання	Метод обертової краплі	Діаметр, довжина обертової краплі, частота обертання
	Метод обертового стрижня	
	Метод видавлювання краплі полем обертання	Частота обертання капіляра в центрифугі, радіус обертання торця капіляра, радіус капіляра, кут нахилу капіляра до осі обертання, довжина стовпа рідини в капілярі



1 – джерело світла, 2 – крапля, 3 – мікроскоп, 4 – відеокамера, 5 – відеопроцесор, 6 – монітор, 7 – комп'ютер, 8 – термінал

Рисунок 1 – Схема приладу в методах вивчення профілів менісків рідини фіксованої форми

В оптичних приладах вагомим питанням є якість підсвічування краплі рідини. В якості джерела світла відомі випадки використання газорозрядних, дугових і ламп розжарювання. Останнім часом їх замінили більш економні джерела світла – світлодіоди. Додатково в таких приладах можуть використовувати фільтри для отримання монохроматичного світла і матовий екран для створення рівномірного освітлення.

Істотною умовою отримання якісного зображення краплі (відсутність відблисків через відбиття світла, рівномірне освітлення) є паралельність променів від освітлювача. Це досягається використанням відповідної коліматорної лінзи. Іноді для цієї мети між джерелом світла і краплею розміщували діафрагму. В одному із способів пропонувалось освітлювати краплю не збоку, а зсередини. Світловий потік направляли через трубку, за допомогою якої формували краплю. Останній спосіб великого розповсюдження не знайшов через ускладнення конструкції приладів. Оптичні прилади використовують в більшості методів вимірювання поверхневого натягу.

Розглянемо прилади, в яких вимірюють силу, що діє на контактуючий предмет з рідиною. Більшого розповсюдження набули прилади, в яких використовують плоску пластинку, тобто вимірювання здійснюють методом пластинки Вільгельма (рис. 2). В них пластинка або перебуває в незануреному стані (глибина занурення рівна 0), або частково занурена в рідину. На практиці застосовуються виключно вертикально орієнтовані пластинки, щоб не проводити додаткових вимірів, пов'язаних з кутами нахилу. Положення пластинки відносно горизонтальної поверхні рідини можуть визначати тим самим пристроєм, який використовується для визначення сили.

Таким вимірювальним пристроєм служать ваги. Якщо вони відносяться до типу з нульовим методом зважування, то після дотику нижнього краю пластинки з поверхнею рідини і утворення меніска нижній торець пластинки виводиться на рівень горизонтальної поверхні рідини. Якщо ваги діють по відхиленню, пластинка після її втягування в рідину залишається частково зануреною.

Поверхневий натяг для тонких пластинок розраховують згідно залежності

$$\sigma = \frac{F}{2L \cos \theta}, \quad (2)$$

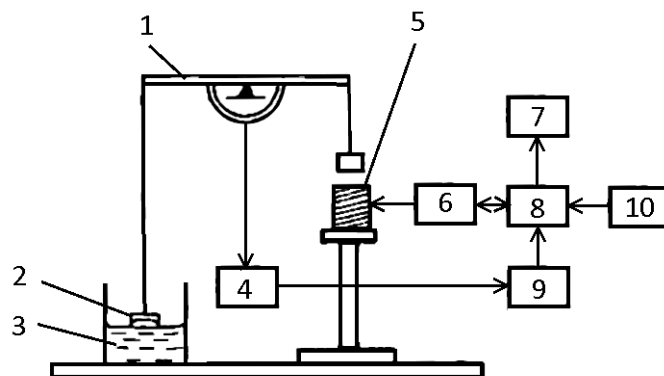
де  $L$  – довжина пластинки,  $F$  – виміряна сила,  $\theta$  – кут між поверхнею рідини і пластинкою на лінії їх контакту.

Існуючу проблему впливу крайового кута змочування між пластинкою і досліджуваною рідиною на вимірювання, вирішують досить різноманітно. Значного поширення набув шлях забезпечення повного змочування пластинки досліджуваною рідиною. Для цього використовують пластинки з спеціально підібраних матеріалів або зі спеціальною обробленою поверхнею. Найчастіше в якості добре змочуваного матеріалу пластинки використовують скло і платину. Останній має в порівнянні зі склом перевагу в хімічній стійкості до більшості рідин. На змочуванні відбивається наявність на твердій поверхні різного роду забруднень, пластинку перед дослідом дуже ретельно промивають. Додаткову гарантію повного змочування пластинки забезпечує шорсткість її поверхні. Вплив шорсткості на змочування описується рівнянням Венцеля-Дерягіна [9]

$$\cos \theta = K \cos \theta_0, \quad (3)$$

де  $\theta$  - спостережуваний в досвіді макроскопічний крайовий кут (кут між поверхнею рідини і плоскою гранню пластинки),  $\theta_i$  - істинний крайовий кут, утворений поверхнею рідини і твердою

поверхнею,  $K$  - коефіцієнт шорсткості, що визначається як відношення площі реальної поверхні (з урахуванням мікрорельєфу) і її проекції на площину.



1 – коромисло ваг, 2 – пластинка, 3 – рідина, 4 – давач положення ваг, 5 – магнітна система, 6 – підсилювач-задавач струму, 7 – дисплей, 8 – мікропроцесорний блок, 9 – підсилювач, 10 – клавіатура

Рисунок 2 – Схема приладу в методах вимірювання сили

Оскільки  $K > 1$ , то в діапазоні  $0 < \theta < \pi/2$   $\theta < \theta_i$ . Якщо рідина змочує даний матеріал, збільшення коефіцієнта шорсткості викликає зменшення макроскопічного крайового кута. Зазвичай шорстку поверхню отримують втиранням або обдурванням дрібним абразивним порошком.

Інший метод, який застосовують в приладах є метод відриву кільця. В основі цього методу лежить існування однозначної залежності між величиною поверхневого натягу і максимальним значенням сили, яка прикладена до кільця для його витягування з рідини:

$$\sigma = \frac{F}{4\pi R}, \quad (4)$$

де  $R$  – радіус кільця.

Якщо кільце поступово витягувати з рідини, то буде зростати прикладена до нього сила. Цей ріст зумовлений силами гравітації і поверхневого натягу. Остання з ростом висоти підняття після досягнення деякого максимального значення буде зменшуватися. Це продовжується до тих пір, поки меніск рідини не досягне границі стійкості і не зруйнується.

В приладах для вимірювання поверхневого натягу методом відриву кільця також використовують електроваги, в основі яких лежить нульовий принцип зрівноважування (рис. 2). У такому випадку руйнування меніска і відрив від поверхні відбувається за межами екстремальної точки (точки максимуму сили).

Кільце зазнає найбільшого впливу (деформації) зі сторони меніска. Чим тонший дріт, з якого виготовлене кільце, і більший його радіус, тим більше воно прогинається між точками прикріплення вертикальних утримуючих ниток. Деформація кільця істотно впливає на величину прикладеної сили, причому розрахувати цей вплив не представляється можливим. При збільшенні ниток, що утримують кільце, деформація останнього істотно зменшується. Однак в місцях прикріплення до кільця утримуючої нитки вигинається лінія змочування рідиною поверхні кільця. Збільшення кількості утримуючих ниток приводить до росту реального периметра змочування, який важко потім врахувати. На практиці переважно використовують двохнитковий підвіс кільця. Іншим критерієм вибору розмірів кільця є необхідність забезпечення меншої ваги кільця в порівнянні з вагою піднятої ним рідини (в протилежному випадку різко знизиться точність вимірювання прикладеної сили) [10].

Ще одним прикладом вимірювання поверхневого натягу існуючими приладами є метод ваги крапель, інші назви – метод об'єму крапель, метод підрахунку крапель, сталагмометричний метод. Основою роботи приладів (рис. 3) цим методом є взаємозв'язок між об'ємом краплі рідини  $V$ , що відірвалася від

каліброваного отвору капіляра, і значенням поверхневого натягу:

$$\sigma = \frac{V \Delta \rho g}{2\pi r \cdot f(r/V^{1/3})}, \quad (5)$$

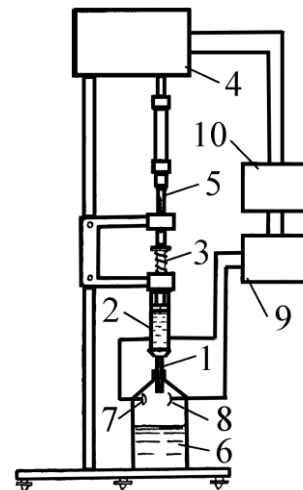
де  $r$  – радіус торця капіляра,  $f(r/V^{1/3})$  – поправочний коефіцієнт, який знаходять експериментально або на основі відповідних таблиць.

Значення поверхневого натягу розраховують за допомогою відповідної залежності або таблиць на основі раніше визначеної різниці густин рідини у краплі і в навколишньому по відношенню до неї середовищі. Цей метод застосовують як для вимірювання поверхневого натягу на межі розділу рідина - газ, так і міжфазного натягу на межі розділу двох рідин, що не змішуються. В обох випадках важливими є методика точного визначення об'єму утвореної краплі, методика самого процесу її видавлювання із отвору, а також визначення значення радіуса, що приймається за основу при подальшому розрахунку значень поверхневого або міжфазного натягу.

Розглянемо особливості роботи таких приладів. Крапля рветься точно за мінімальним перерізом шийки, то для малих радіусів капіляра, крапля повинна відриватися цілком (залишається чистий зріз капіляра). Для реальних крапель процес відриву є досить складний. Розтягуючись, шийка приймає форму рідкого циліндра. Останній же мимовільно перетворюється в «буси», – в сукупність дрібних крапель, які падають слідом за основною краплею. Суттєвою деталлю цього процесу є те, що частина висить краплі вище шийки взагалі нікуди не падає, отже вага краплі, що впала (разом з супутниками), може бути помітно менше ваги краплі, що висить. В сучасних приладах використовують оптичну реєстрацію крапель, що впали, що суттєво автоматизує процес вимірювання.

До матеріалу і форми капіляра висувають ряд вимог. Нижній торець каліброваного капіляра виготовляють таким, щоб крапля в момент відриву була зафіксованою на круговій площі конкретного радіуса. Для цього використовують капіляр ножевої форми. Матеріал капіляра має забезпечувати добру

змочуваність поверхні його торця досліджуваною рідиною. У зв'язку з цим як матеріал для капілярів використовують скло, платину, а також спеціальні сплави металів. Технологія підготовки капілярів з метою забезпечення змочуваності поверхні торця повинна передбачати виготовлення її шорсткою.



1 – капіляр, 2 – шприц з мітками, 3 – механізм подачі штока шприца, 4 – реверсивний двигун, 5 – мікрометр, 6 – посудина, 7 – джерело світла, 8 – фотоприймач, 9 – електронний блок реєстрації крапель, 10 – блок керування

**Рисунок 3 – Схема приладу для вимірювання поверхневого натягу методом об'єму краплі**

В приладах, принцип роботи яких заснований на методі обертової краплі (рис. 4) вимірюють міжфазний натяг між рідинами, рідше – поверхневий натяг між рідиною і газом. В них використовують взаємозв'язок між різницею густин  $\Delta\rho$  контактуючих рідин і газів, частотою обертання  $\omega$ , розмірами краплі і поверхневим натягом:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho\omega^2 R^3}{4}, \quad (6)$$

де  $R$  – радіус краплі.

Розглянемо особливості роботи цих приладів. Потрібно забезпечувати, щоб довжина краплі була у 4 рази більшою за її діаметр, що встановлюють вибором частоти обертання трубки з рідинами. Вісь обертання краплі має бути строго горизонтальною. Привід трубки від двигуна виконують так, щоб усунути вібрації. Для отримання статичного зображення обертової краплі застосовують стробоскопічне освітлення, синхронізоване з частотою

обертання трубки. Склона трубка з важчою рідиною діє як сферична лінза, яка викликає спотворення видимих розмірів обертової краплі. Для врахування цього оптичну систему приладу калібрують калібрами відомого розміру з рідиною, що оточує краплю.

На процес обертання краплі має вплив гравітаційного поля Землі. Якщо обертова швидкість зменшується, то ефект спливання краплі відіграє значну роль, призводячи до зміщення краплі від осі обертання трубки і, в результаті, до спотворення її форми. В обертовій системі виникають течії (а значить сили Коріоліса в додаток до сили виштовхування) і осциляції. На краплю діють одночасно виштовхувальна сила, відцентрова сила більш важчої рідини і закручуюча сила, яка обумовлена в'язкістю важчої рідини, які переміщують краплю на деяку віддал від осі обертання. Для зменшення цих впливів

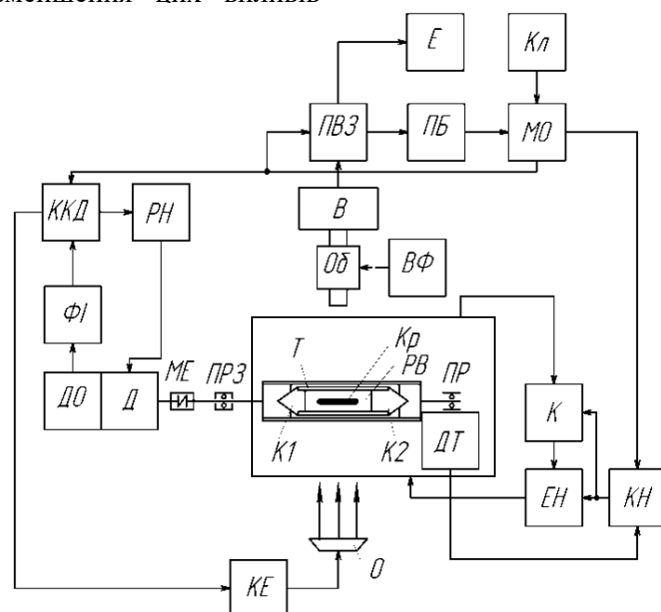
діапазон частот обертання трубки вибирають в межах 1000 — 15000 об/хв.

В приладах, які працюють методом максимального тиску  $P_{\max}$  в газовій бульбашці (рис. 5), поверхневий натяг вимірюють на основі взаємозалежності капілярного тиску, глибини занурення капіляра  $H$ , радіуса капіляра і поверхневого натягу:

$$\sigma = R_0 (P_{\max} - \Delta \rho g H) / 2, \quad (7)$$

де  $R_0$  — радіус кривизни поверхні меніска бульбашки.

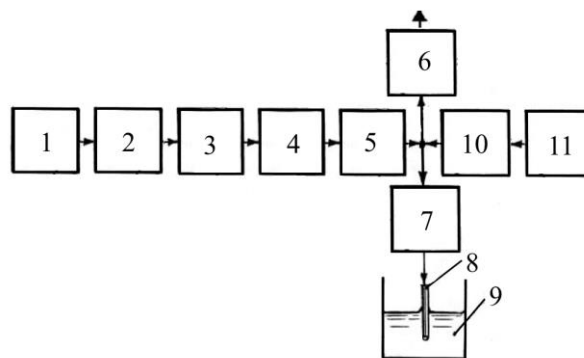
Так як капілярний тиск є однією з найбільш легко визначуваних величин, то такі прилади дістали широкого розповсюдження. Прилади для вимірювання поверхневого натягу рідин цим методом є одними з найпростіших щодо реалізації методики вимірювання.



В — відеокамера; ВФ — вузол фокусування; Д — двигун; ДО — давач обертів; ДТ — давач температури; Е — екран; ЕН — елемент нагрівальний; К — компресор; К1, К2 — корки; КЕ — ключ електронний; ККД — контролер керування двигуном; Кл — клавіатура; КН — контролер нагрівання; Кр — крапля легшої рідини; МЕ — муфта еластична; МО — мікропроцесор обробки; О — освітлювач; Об — об'єктив; ПБ — пам'ять буферна; ПЗВ — процесор запису відео; ПР — підшипник радіальний; ПРЗ — підшипник радіально-упорний здвоєний; РВ — рідина важча; РНП — регулятор напруги;  
 Т — трубка; ФІ — формувач імпульсів

Рисунок 4 — Функціональна схема приладу для вимірювання міжфазного натягу рідин методом обертової краплі





1 – джерело стисненого газу; 2,4 – пневматичні ємності; 3 – стабілізатор тиску газу; 5, 7, 10 – постійні пневматичні дроселі; 6 – змінний пневматичний дросель; 8 – калібрований капіляр; 9 – досліджувана рідина; 11 – давач тиску

**Рисунок 5 — Схема приладу для вимірювання поверхневої енергії рідин методом максимального тиску в бульбашці газу**

Вибір методу для дослідження поверхневих властивостей розчинів поверхнево-активних речовин для інтенсифікації нафтовилучення здійснено на основі порівняння їх характеристик. Основними характеристиками є діапазон вимірюваного поверхневого натягу, методична похибка, можливість вимірювання міжфазного натягу між рідинами (табл. 2). В нафтовидобутку контактуючими середовищами є водний розчин поверхнево-активної речовини і нафта, то очевидно

слід надати перевагу методам, що дозволяють досліджувати міжфазний натяг між рідинами. З іншого боку розчин поверхнево-активної речовини суттєво знижує міжфазний натяг між рідинами, а отже необхідно використовувати метод, з низькою межею вимірювання. Для двох рідин таким методом є метод обертової краплі, у випадку вимірювання поверхневого натягу між рідиною і газом можна використати методи ваги крапель або лежачої (звисаючої) крапель.

**Таблиця 2 – Порівняльна таблиця сучасних методів вимірювання поверхневого натягу рідин**

Назва методу	Діапазон вимірювання поверхневого натягу рідин, мН/м	Похибка методики	Середовища
Методи лежачої або звисаючої краплі	0,1-75	0,2 %	Рідина-рідина, рідина-газ
Метод пластинки Вільгельма	1-75	0,1 %	Рідина-газ
Метод відриву кільця	1-75	0,4 %	Рідина-газ
Метод ваги крапель	0,1-72	0,3%	Рідина-рідина, рідина-газ
Метод обертової краплі	0,001-75	0,4 %	Рідина-рідина
Метод максимального тиску в газовій бульбашці	10-75	0,2 %	Рідина-газ

**Висновки.** З урахуванням специфіки і умов використання розчинів поверхнево-активних речовин у нафтогазовидобутку, які можуть бути відтвореними в процесі вимірювання поверхневого натягу на межі контакту "розчин поверхнево-активних речовини - газ", міжфазного натягу на межі контакту "розчин поверхнево-активних речовини - нафта (газовий конденсат)" найбільш придатними для таких вимірювань міжфазного натягу є методи лежачої або звисаючої крапель, об'єму крапель і обертової краплі.

### Література

1. Михайлюк В., Рудий М., Використання поверхнево-активних речовин в процесах нафтовидобутку на родовищах ВАТ"Укрнафта". ПП „Галицька друкарня ПЛЮС”, 399 с.
2. Поверхнево-активні речовини. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Поверхнево-активні\\_речовини#Застосування\\_ПАР](https://uk.wikipedia.org/wiki/Поверхнево-активні_речовини#Застосування_ПАР) (дата звернення: 17.02.2021).
3. Михайлюк В. Д., Рудий М. І. Нові технології обробки привибійної зони пласта з використанням поверхнево-активних речовин. Стан і перспективи розробки родовищ нафти і

газу України”: збірник наукових праць наук.-практ. конф., 18–21 листопада 2003 року. Івано-Франківськ, 2003. С. 209 – 210.

4. Бабалян Г. А., Ованесов Г. П., Пелевин Л. А. Применение поверхностноактивных веществ с целью увеличения нефтеотдачи. М.: Недра, 1970. 108 с.

5. Кондрат Р. М., Мороз Л. Б., Михайлюк В.Д. Дослідження застосування поверхнево-активних речовин для інтенсифікації видобування нафти на завершальній стадії розробки родовищ URL: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/2524/1/3366p.pdf> (дата звернення: 17.02.2021).

6. Властивості рідин. Поверхневий натяг. URL: <https://sites.google.com/site/molekulyarnafizika/osnovni-ponatta-molekularno--kineticnoie-teoriiie/vlastivosti-ridin-poverhnevij-natag> (дата звернення: 17.02.2021).

7. Русанов А. И., Прохоров В. А. Межфазная тензиометрия. СПб: Химия, 1994. 400с.

8. Барна О. Б. Методика і установка для дослідження профілю розгорнутого меніска для визначення поверхневого натягу та крайового кута змочування Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. №18(189). 2012. С. 20-28.

9. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания М.: Химия, 1976 232 с.

10. І. С. Кісіль, Р. Т. Боднар, В. Б. Біліщук, О. Б. Барна, Л. А. Витвицька. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз: монографія: у 2 т. Т. 2 Методи обертової краплі, розгорнутого меніска, витягування тіл, вимірювання крайового кута змочування. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. 297 с.

### References

1. Mykhailiuk V., Rudyi M., Vykorystannia poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn v protsesakh naftovydobutku na rodovyshchakh VAT"Ukrnafta". – PP „Halytska drukarnia PLIuS”, 399 s.

2. Poverkhnevo-aktyvni rehovyny. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Poverkhnevo-aktyvni\\_rehovyny#Zastosuvannia\\_PAR](https://uk.wikipedia.org/wiki/Poverkhnevo-aktyvni_rehovyny#Zastosuvannia_PAR) (data zvernennia: 17.02.2021).

3. Mykhailiuk V. D., Rudyi M. I. Novi tekhnolohii obrobky pryvybiinoi zony plasta z

vykorystanniam poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn Stan i perspektyvy rozrobky rodovyshch nafty i hazu Ukrainy”: zbirnyk naukovykh prats nauk.-prakt. konf., 18–21 lystopada 2003 roku. Ivano-Frankivsk, 2003. S. 209 – 210.

4. Babalian H. A., Ovanesov H. P., Pelevyn L. A. Prymenenye poverkhnosnoaktyvnykh veshchestv s tseliu uvelycheniya nefteotdachy. M.: Nedra, 1970. 108 s.

5. Kondrat R. M., Moroz L. B., Mykhailiuk V.D. Doslidzhennia zastosuvannia poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn dlia intensyfikatsii vydobuvannia nafty na zavershalnii stadii rozrobky rodovyshch URL: <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/2524/1/3366p.pdf> (data zvernennia: 17.02.2021).

6. Vlastyvosti ridyn. Poverkhnevyyi natiah. URL: <https://sites.google.com/site/molekulyarnafizika/osnovni-ponatta-molekularno--kineticnoie-teoriiie/vlastivosti-ridin-poverhnevij-natag> (data zvernennia: 17.02.2021).

7. Rusanov A. Y., Prokhorov V. A. Mezhfaznaia tenzyometryia. SPb: Khymyia, 1994. 400s.

8. Barna O. B. Metodyka i ustanovka dlia doslidzhennia profilu rozghornutoho meniska dlia vyznachennia poverkhnevoho natiahu ta kraiovoho kuta zmochuvannia Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V.Dalia. №18(189). 2012. S. 20 – 28.

9. Summ B. D., Horiunov Yu. V. Fyzyko-khymycheskye osnovi smachyvanyia y rastekanyia M.: Khymyia, 1976. 232 s.

10. І. С. Кісіль, Р. Т. Боднар, В. Б. Біліщук, О. Б. Барна, Л. А. Витвицька. Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз: монографія: у 2 т. Т. 2 Методи обертової краплі, розгорнутого меніска, витягування тіл, вимірювання крайового кута змочування. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2018. 297 с.

УДК 658.012.011.56

DOI: 10.31471/1993-9981-2021-1(46)-53-62

## СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ГАЗОТУРБІННИМ ДВИГУНОМ НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*О. В. Кучмистенко, М. В. Шавранський, Б. С. Незамай, О. Г. Малько*

*Інститут інформаційних технологій, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019; тел. (03422)4-60-67, e-mail: kafatp@ukr.net*

В роботі викладений синтез нечіткого регулятора системи управління частотою обертання ротора газотурбінного двигуна. Продемонстровані результати математичного моделювання системи з цифровими нечітким регулятором, які формують керуючий вплив на нестационарний об'єкт керування. Подана порівняльна оцінка адаптивного управління на базі нечіткої логіки (НЛ) розглянутого нестационарного об'єкта. Порівняльна оцінка роботи, яка характеризується поточною помилкою системи адаптивного управління і системи, розрахованої на базі НЛ, дає можливість зробити висновок, що застосування fuzzy (нечіткого) - регулятора для систем управління розглянутими типовими нестационарними об'єктами є доцільним, оскільки поточна помилка в системі з fuzzy-регулятором не перевищує поточну помилку в адаптивній системі. При формуванні структурних схем СУ з fuzzy-регуляторами важливим видається вибір вхідних параметрів fuzzy-регулятора. Лінгвістичні правила управління самі по собі не можуть бути реалізовані на сучасних ЕОМ. Необхідна процедура їх формалізації. У зв'язку з цим дуже важливим є задача вибору методу формалізації експертних знань. Крім того, оскільки нечіткі множини формалізуються за допомогою функцій належності чимало роль відіграє вибір їх вигляду і параметрів. При реалізації нечіткого управління в сучасних ЕОМ необхідно задавати конкретні значення параметрів функцій належності, зокрема межі їх зміни. Тому важлива методика параметричного налаштування fuzzy-регулятора. При проектуванні регулятора із розрахованих для різних варіантів мінімальних критеріїв якості, вибрано використання експоненціальних функцій належності (ФН), які при оптимізації параметрів НР дають найменше із мінімальних значень показника J.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, нечітка логіка, функції належності, система управління, нестационарний об'єкт, fuzzy (нечіткий) – регулятор.

В работе изложен синтез нечеткого регулятора системы управления частотой вращения ротора газотурбинного двигателя. Продемонстрированы результаты математического моделирования системы с цифровыми нечетким регулятором, которые формируют управляющее воздействие на нестационарный объект управления. Представленная сравнительная оценка адаптивного управления на базе нечеткой логики (НЛ) рассматриваемого нестационарного объекта. Сравнительная оценка работы, которая характеризуется текущей ошибкой системы адаптивного управления и системы, рассчитанной на базе НЛ, позволяет сделать вывод, что применение fuzzy (нечеткого) - регулятора для систем управления рассмотренными типичными нестационарными объектами целесообразна, поскольку текущая ошибка в системе с fuzzy-регулятором не превышает текущую ошибку в адаптивной системе. При формировании структурных схем СУ с fuzzy-регуляторами важным представляется выбор входных параметров fuzzy-регулятора. Лингвистические правила управления сами по себе не могут быть реализованы на современных ЭВМ. Необходимая процедура их формализации. В связи с этим очень важно задача выбора метода формализации экспертных знаний. Кроме того, поскольку нечеткие множества формализуются с помощью функций принадлежности немалую роль играет выбор их вида и параметров. При реализации нечеткого управления в современных ЭВМ необходимо задавать конкретные значения параметров функций принадлежности, в частности пределы их изменения. Поэтому важна методика параметрической настройки fuzzy-регулятора. При проектировании регулятора с рассчитанных для различных вариантов минимальных критериев качества, выбрано использование экспоненциальных функций принадлежности (ФП), которые при оптимизации параметров НР дают наименьшее из минимальных значений показателя J.

**Ключевые слова:** газотурбінний двигател, нечеткая логика, функции принадлежности, система управления, нестационарный объект, fuzzy (нечеткий) - регулятор.

The synthesis of the fuzzy regulator of the rotor speed control system of a gas turbine engine is presented in the work. The results of mathematical modeling of a system with a digital fuzzy controller, which form a control effect on a non-stationary control object, are demonstrated. A comparative assessment of adaptive control based on fuzzy logic (FD) of the considered nonstationary object is given. A comparative evaluation of the work, which is characterized by the current error of the adaptive control system and the system calculated on the basis of NL, allows us to conclude that the use of fuzzy controller for control systems considered typical non-stationary objects is appropriate because the current error in the system fuzzy-regulator does not exceed the current error in the adaptive system. When forming the structural schemes of SU with fuzzy-regulators, it seems important to choose the input parameters of the fuzzy-regulator. Linguistic control rules alone cannot be implemented on modern computers. The procedure of their formalization is necessary. In this regard, the task of choosing a method of formalizing expert knowledge is very important. In addition, since fuzzy sets are formalized by membership functions, the choice of their form and parameters plays a significant role. When implementing fuzzy control in modern computers, it is necessary to set specific values of the parameters of membership functions, in particular the limits of their change. Therefore, the technique of parametric adjustment of the fuzzy controller is important. When designing the controller from the minimum quality criteria calculated for different variants, the use of exponential membership functions is chosen, which when optimizing the HP parameters give the least of the minimum values of the indicator J.

**Key words:** gas turbine engine, fuzzy logic, membership functions, control system, non-stationary object, fuzzy-regulator.

**Вступ.** В наш час велика увага приділяється побудові (синтезу) і інтелектуалізації системи управління (СУ) нестационарними процесами, як об'єктами керування (ОК), оскільки вирішення задач при швидкій зміні режимів роботи цих об'єктів покладається саме на СУ. Процес прийняття рішень і СУ такими об'єктами є достатньо складною, оскільки функціонує в умовах невизначеності і багатьох факторів впливу. Це пов'язано з відсутністю достатньо повних апріорних даних, а також з необхідністю застосування методів і засобів керування, які знижують ступінь невизначеності вхідної інформації. Рівень невизначеності визначається інтенсивністю збудовуючих впливів, точні кількісні характеристики, яких важко, а інколи неможливо вимірювати в реальному часі, від складності математичної формалізації процесу прийняття рішень, від впливу людського фактора та суб'єктивності будь-яких оцінок і рішень людини-оператора при управлінні складними об'єктами в інтерактивному режимі.

Існуючі СУ не дозволяють враховувати неповноту інформації, а також лінгвістичну невизначеність керуючих рішень, які приймаються оперативно-диспетчерським персоналом. Таким чином виникає необхідність в розробці і представленні в розпорядження диспетчера засобів аналізу ситуації з метою прийняття керуючих рішень. Динаміка і невизначеність СУ нестационарними процесами і об'єктами роблять задачу керування досить складною. Бажану ступінь надійності СУ можна

отримати тільки при повному інформаційному забезпеченні і оптимальному керуванні такими об'єктами.

На даному етапі спостерігається інтенсивний розвиток і практичне застосування нечітких систем для цілей управління і регулювання багатьма технічними об'єктами. Класичне управління істотно обмежувало теоретично можливі різновиди цілей, у зв'язку з необхідністю представляти мету узагальненою функцією. При нечіткому управлінні необхідність в цільових функціях і в рішенні задач оптимального управління відпадає, тому можна успішно справлятися зі всім різноманіттям цілей і навіть з цілями, що взаємно суперечать. У багатьох наукових працях управління на базі теорії нечітких множин і нечіткої логіки розглядають в контексті методології штучного інтелекту, де наголошується, що основу проектування інтелектуальних нечітких регуляторів складає конструювання знань з використанням методів уявлення і пошуку знань. Тому пропонується створення нечітких промислових регуляторів здійснювати на принципах теорії штучного інтелекту.

У роботі [1] нечіткі регулятори розглядаються як одна з базових моделей регуляторів інтелектуальних систем управління (ІСУ). При цьому наголошується, що значним обмеженням практичного застосування регуляторів ІСУ є відсутність формальних підходів, властивих теорії автоматичного управління (ТАУ), для вирішення завдань

аналізу і синтезу СУ. Проте наголошується, що fuzzy-регулятори володіють найбільшими "здібностями" до формалізації процесів проектування. Але штучний інтелект є процесом обробки символів, а нечітка логіка - ні. У багатьох випадках регулятор на базі НЛ здатний виробляти рішення швидше, ніж експертна система на основі правил ЯКЦО-ТО. Тим часом, все більший інтерес представляє можливість розробки так званих "гібридних" ІСУ [2, 3], які об'єднують властивості штучних нейронних мереж до навчання і наочність фаззі-логіки.

**Постановка завдання:** Проаналізувати особливості управління газотурбінним двигуном на базі методів теорії нечітких множин (ТНМ) і нечіткої логіки. Удосконалити відому структурну схему СУ із fuzzy-регулятором;

**Метою даної роботи** є аналіз і застосування методів нечіткої логіки для синтезу fuzzy-регулятора СУ нестационарними процесами, як об'єктами керування.

**Об'єктом дослідження** є нестационарні процеси у газотурбінному двигуні, які функціонують за умов невизначеності та обмежень на параметри ОК.

**Результати:** здійснено моделювання невизначеності експертних знань про СУ нестационарним об'єктом шляхом використання термів лінгвістичних змінних: „негативна” і „позитивна”, що дозволило на основі матриці знань розробити логіко-лінгвістичну модель прийняття раціональних рішень для СУ нестационарним процесом, як ОК.

Все ширше в різних галузях промисловості і народного господарства знаходять застосування газотурбінні двигуни (ГТД). І це не тільки авіація вони також використовуються в якості приводів нагнітачів газоперекачуючих агрегатів компресорних станцій при транспортуванні газу, приводів електрогенераторів пересувних і пікових електростанцій в суднових енергетичних установках і на інших промислових об'єктах, де вимагається розвиток великих одиничних потужностей (від 1 до 25 МВт) в одному агрегаті при його мінімальній масі і габаритах.

Комплекс вимог, які висуваються до газотурбінних двигунів пов'язані з їх енергетичною ефективністю, безпекою, надійністю і екологічністю експлуатації. Поряд

з цими вимогами, актуальними є вимоги до якості перехідних процесів, пов'язаних із запуском агрегату, різкою зміною відібраного навантаження (потужності). В більшості рішення задач задоволення всім цим вимогам покладається на СУ ГТД.

В переважній більшості ГТД частота обертання ротора (роторів) є керуючою величиною. В якості керуючого фактора в СУ частотою обертання ротора  $n$  використовується витрата (подача) палива  $G_T$  в камеру згоряння. На різних режимах роботи і при різних зовнішніх умовах параметри двигуна істотно змінюються.

Розглянемо газотурбінний двигун як нестационарний об'єкт, для якого частота обертання ротора  $n$  – керуюча змінна, а витрата палива  $G_T$  - керуючий вплив. Лінеаризуючи залежність моменту турбіни  $M_T$  і компресора  $M_K$  від частоти обертання ротора  $n$  і не враховуючи впливу теплової і масової ємності двигуна, для конкретного режиму роботи записують передавальну функцію двигуна наступним чином [4]:

$$G_{ГТД}(s) = \frac{n(s)}{G_T(s)} = \frac{K_{ГТД}}{T_{ГТД}s + 1},$$

де коефіцієнт підсилення  $K_{ГТД}$  і постійна часу  $T_{ГТД}$  визначається як:

$$K_{ГТД} = \frac{\left( \frac{\partial M_T}{\partial G_T} - \frac{\partial M_K}{\partial G_K} \right)_o G_{To}}{\left( \frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_o n_o}; \quad T_{ГТД} = \frac{2\pi J}{\left( \frac{\partial M_K}{\partial n} - \frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_o},$$

при чому, вхідний і вихідний сигнали записуються у відносних безрозмірних відхиленнях від усталеного режиму ( $n = \Delta n / n_o$ ;  $G_T = \Delta G_T / G_{To}$ , де  $n_o$ ,  $G_{To}$  – базові значення параметрів, які вибрані для визначного режиму роботи двигуна, наприклад номінального або максимального). На різних режимах роботи і при різних зовнішніх умовах коефіцієнт підсилення і постійна часу двигуна суттєво змінюються, тому для кожного режиму необхідно визначати свої значення коефіцієнтів  $K_{ГТД}$  і  $T_{ГТД}$ .

Відмітимо, що передавальна функція  $G_{ГТД}(s)$  для нестационарного ОК, яким є газотурбінний двигун, отримана методом „заморожених” коефіцієнтів при умові достатньо повільної зміни параметрів об’єкта.

Структурна схема аналогової електромеханічної СУ частотою обертання ротора двигуна при ведені на рис. 1 [4].

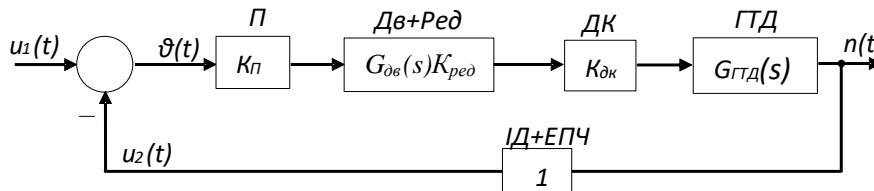


Рисунок 1 – Структурна схема аналогової електромеханічної СУ частотою обертання ротора ГТД

Частота обертання ротора газотурбінного двигуна задається напругою  $u_1(t)$  і вимірюється імпульсним давачем ІД, частота вихідного сигналу якого визначається виразом  $f = kmn$ ,  $n$ - число обертів двигуна,  $m$ - число зубців індуктора,  $k$  – коефіцієнт передачі. Змінна напруга, яка знімається з виходу ІД, за допомогою електронного перетворювача частоти ЕПЧ перетворюється в сигнал  $u_2(t)$ , величина якого пропорційна числу обертів двигуна  $n$ . Напруга  $u_2(t)$  порівнюється з заданою напругою і сигнал помилки після підсилювача П поступає на двофазний асинхронний двигун Дв, який через редуктор Ред регулює дросельний кран ДК, змінюючи витрату палива в газотурбінний двигун. Імпульсний давач разом з електронним перетворювачем частоти можна описати пропорційною ланкою з передавальною функцією, яка рівна 1. При цьому система (див. рис. 1) має одиничний від’ємний зворотній зв’язок [4].

дросельного крана, газотурбінного двигуна і частотного давача з електронним перетворювачем частоти в якості загального ОК і застосовуючи цифровий НР, можна перетворити структурну схему на рис. 1 в структурну схему, яка зображена на рис. 2, де  $u_1(t)$ - вхідний вплив, а  $u_2(t)$  – вихід системи, а  $u_1(t) - u_2(t) = \theta(t)$  – помилка системи. Використання цифрового НР вимагає додаткового застосування аналого-цифрового (АЦП) і цифро-аналогового (ЦАП) перетворювачів.

Тепер передавальну функцію ОК в структурній схемі на рис. 1 можна записати у вигляді:

$$G(s) = K_{\Pi} G_{ДВ}(s) K_{РЕД} K_{ДК} G_{ГТД}(s) = \alpha [s(s+a)(s+b)]^{-1},$$

де  $\alpha = abK_{\Pi}K_{ДВ}K_{РЕД} K_{ДК}K_{ГТД}$ ,  $a = 1/T_{ДВ}$ ,  $b = 1/T_{ГТД}$ .

Розглянемо систему управління з цифровим нечітким регулятором НР (рис. 2):

Розглядаючи послідовне з’єднання підсилювача, асинхронного двигуна,

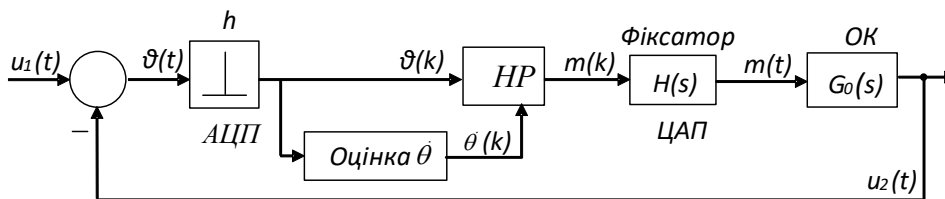


Рисунок 2 – Структурна схема системи управління з цифровим нечітким регулятором

Для визначеності будемо припускати, що число термів, за допомогою яких оцінюються лінгвістичні змінні (вхідні і вихідні параметри нечіткого регулятора) помилка системи  $\theta$ , швидкість зміни (перша похідна) помилки  $\dot{\theta}$ ,

керуючий вплив на об’єкт  $m$ , рівне 7. Відобразимо діапазони:  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ ,  $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$  і  $[m_{\min}, m_{\max}]$  зміни вхідних і вихідних параметрів на єдину універсальну множину  $U_i = [0, L_i - 1] = [0, 6]$ , де  $L_i = 7$  - число, яке відповідає

кількості термів кожної лінгвістичної змінної  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n = 3$ . При цьому перерахунок фіксованого значення параметра  $x_i^* \in [x_{ni}, x_{ei}]$  у відповідний елемент  $u^* \in [0, 6]$  визначається пропорцією [5]:

$(x_{ei} - x_{ni}) / (6 - 0) = (x_i^* - x_{ni}) / (u^* - 0)$ , із якої отримуємо:

$$u^* = 6(x_i^* - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}). \quad (1)$$

Таким чином, на основі виразу (1) знаходимо:

$$u_1^* = 6(\theta^* - \theta_{min}) / (\theta_{max} - \theta_{min}); \quad (2)$$

$$u_2^* = 6(\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{min}) / (\dot{\theta}_{max} - \dot{\theta}_{min}); \quad (3)$$

$$u_3^* = 6(m^* - m_{min}) / (m_{max} - m_{min}). \quad (4)$$

На множині  $U = [0, 6]$  задамо 7 нечітких підмножин, функції належності яких показані на рис. 3:

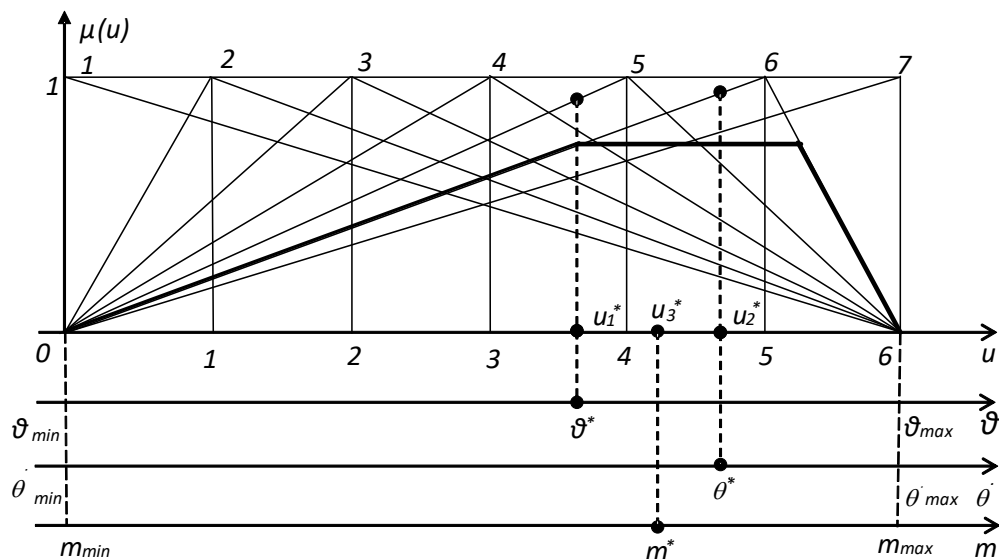


Рисунок 3 – Функції належності семи нечітких підмножин на множині  $U = [0, 6]$

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами  $(u_1, \mu_1)$  і  $(u_2, \mu_2)$ , вигляду (6).

Тоді, відповідно до рис. 3, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини [6, 7]:

$$\mu^1(u) = 1 - u/6, \quad u \in [0, 6];$$

$$\mu^2(u) = \begin{cases} u, & u \in [0, 1]; \\ (6-u)/5, & u \in [1, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^3(u) = \begin{cases} u/2, & u \in [0, 2]; \\ (6-u)/4, & u \in [2, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^4(u) = \begin{cases} u/3, & u \in [0, 3]; \\ (6-u)/3, & u \in [3, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^5(u) = \begin{cases} u/4, & u \in [0, 4]; \\ (6-u)/2, & u \in [4, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^6(u) = \begin{cases} u/5, & u \in [0, 5]; \\ 6-u, & u \in [5, 6]; \end{cases}$$

$$\mu^7(u) = u/6, \quad u \in [0, 6].$$

При подачі на нечіткий регулятор (НР) значень вхідних змінних  $\theta^*$  і  $\dot{\theta}^*$  з кроком квантування  $h$  здійснюється перерахунок величин  $u_1^*$  і  $u_2^*$  за формулами (2) і (3) і ФН  $\mu^j(u)$ ,  $j = \overline{1, 7}$ .

Сформуємо матрицю знань (лінгвістичне правило управління) для нечіткого регулятора наступним чином:

$\theta \setminus \dot{\theta}$	$a_2^1$	$a_2^2$	$a_2^3$	$a_2^4$	$a_2^5$	$a_2^6$	$a_2^7$
$a_1^1$	H	H	H	H	ПМ	ПС	П

$a_1^2$	Н	НС	НС	НС	ПМ	ПС	П
$a_1^3$	Н	НС	НМ	НМ	ПМ	ПС	П
$a_1^4$	Н	НС	НМ	О	ПМ	ПС	П
$a_1^5$	Н	НС	НМ	ПМ	ПМ	ПС	П
$a_1^6$	Н	НС	НМ	ПМ	ПМ	ПС	П
$a_1^7$	Н	НС	НМ	П	П	П	П

В матриці знань  $a_1^j$  і  $a_2^j$  - лінгвістичні оцінки помилки і швидкості зміни помилки, які розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині,  $j = \overline{1,7}$ ;  $a_3^j$  - лінгвістичні оцінки керуючого впливу на об'єкт, які вибрані із терм-множини змінної  $m$ :

$a_3^j \in \{\text{негативна (Н), негативна середня (НС), негативна мала (НМ), нульова (О), позитивна мала (ПМ), позитивна середня (ПС), позитивна (П)}\}$ .

Нехай  $\mu^j(x_i)$  ФН параметра  $x_i \in [x_{ni}, x_{ei}]$  нечіткому терму  $a_i^j$ ,  $i = \overline{1,2}$ ;  $j = \overline{1,7}$ . Тоді  $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$  - залежить від двох змінних ( $x_1 \equiv \theta$ ;  $x_2 \equiv \dot{\theta}$ ) функція належності вектора параметрів рішення (вбраному керуючому впливу на об'єкт)  $m_j$ ,  $j = \overline{1,7}$ , визначається із системи нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2) = \bigvee_{p=1}^{k_j} [\mu^l(x_2) \wedge \mu^r(x_3)] \quad (5)$$

де  $k_j$  - число однакових термів  $a_3^j$ , які розміщені в комірці із координатами  $(l, r)$  матриці знань;  $l$  - номер рядка, на якому розміщений терм  $a_1^l$ ;  $r$  - номер стовпця, на якому розміщений терм  $a_2^r$ , ( $l, r, j = \overline{1,7}$ ).

Якщо сформуємо лінгвістичне правило управління НР у вигляді:

$$\text{Якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j), \text{ то } (m^* = a_3^j), \quad j = \overline{1,7},$$

(це відповідає використанню лише головної діагоналі матриці знань), то система нечітких логічних рівнянь (5) значно спроститься і прийме вигляд:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2) = \mu^j(x_1) \wedge \mu^j(x_2);$$

$$\mu^{m^*}(x_1, x_2) = \max_{j=\overline{1,7}} \mu^{m_j}(x_1, x_2). \quad (6)$$

У відповідності з матрицею знань, яка сформалізована рівнянням (5), або (6), fuzzy-регулятор „приймає рішення” про те, до якого терму  $j$  і з яким ступенем істинності  $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$  відноситься керуючий вплив  $m_j$ . Для визначення конкретного значення керуючого впливу  $m^*$  формується результуюча фігура (чотирикутник): ФН вибраного  $j$ -го терму, обмежена прямою з ординатою, рівна  $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta})$ .

Відбувається пошук абсциси "центру тяжіння" результуючої фігури за формулою:

$$u_3^* = \frac{\sum_{k=1}^4 (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k)b_{r+1} + (2a_k + a_{k+1})b_k]}{3 \sum_{k=1}^4 (a_{k+1} - a_k)(b_{k+1} + b_k)}, \quad (7)$$

де  $a_k, b_k$  - координати вершин результуючої фігури.

Одержане значення  $u_3^*$  на основі формули (4) перетвориться в значення керуючого впливу на ОК:

$$m^* = m_{\min} + (m_{\max} - m_{\min}) u_3^* / 6. \quad (8)$$

При дослідженні СУ (рис. 4) припустимо, що задана функція зміни частоти обертання ротора газотурбінного двигуна задається вхідною напругою:

$$u_1(t) = \begin{cases} \frac{2t^2}{\tau_r^2} & \text{при } 0 \leq t \leq \frac{\tau_r}{2}; \\ \frac{1}{2} + \frac{2t - \tau_r}{\tau_r} - \frac{(2t - \tau_r)^2}{2\tau_r^2} & \text{при } \frac{\tau_r}{2} \leq t \leq \tau_r; \\ 1 & \text{при } t \geq \tau_r, \end{cases}$$



де  $\tau_r$  – час розгону газотурбінного двигуна.

Припустимо, що залежності параметрів передавальної функції  $G(s)$  від часу роботи газотурбінного двигуна визначаються як:

$$T_{ГТД}(t) = 0,9849 - 0,1188t + 0,0063t^2 - 0,00012t^3;$$

$$\alpha(t) = 16,5475 - 4,4469t + 0,4843t^2 - 0,02315t^3 - 0,0004t^4;$$

$$T_{ДВ} = 0,35 \text{ с.}$$

При моделюванні системи опишемо динаміку окремих ланок, використовуючи апроксимацію за формулою трапецій.

Для аперіодичної ланки із змінними параметрами:

$$x_v = \frac{2 - b_{v-1}h_0}{2 + b_v h_0} x_{v-1} + \frac{h_0}{2 + b_v h_0} (\alpha_v u_v + \alpha_{v-1} u_{v-1}).$$

Для аперіодичної ланки  $(s + a)^{-1}$  із постійними параметрами:

$$x_v = \frac{2 - ah_0}{2 + ah_0} x_{v-1} + \frac{h_0}{2 + ah_0} (u_v + u_{v-1}).$$

Для інтегруючої ланки:

$$x_v = x_{v-1} + \frac{h_0}{2} (u_v + u_{v-1}).$$

В записаних формулах  $u_v$  і  $x_v$  - вхідна і вихідна змінні ланки;  $h_0 = 0,05h$  - крок моделювання;  $h = 0,01\text{с}$  - крок квантування (інтервал подачі даних в НР).

Дослідимо точність відпрацювання СУ з цифровим НР закону зміни вхідного впливу. Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів наступні:

$$[\theta_{\min} = -0,1; \theta_{\max} = 0,1], [\dot{\theta}_{\min} = -0,2; \dot{\theta}_{\max} = 0,2] \text{ і } [m_{\min} = -0,015; m_{\max} = 0,015].$$

Час розгону двигуна  $\tau_r = 6 \text{ с.}$

На рис. 4 продемонстровано результати дослідження точності відпрацювання СУ заданого закону зміни вхідного впливу:  $a$  - поточна помилка  $\theta(t) = u_1(t) - u_2(t)$ ;  $b$  - керуючий вплив на ОК  $m$ ;  $v$  - вхід  $u_1(t)$  і вихід  $u_2(t)$  системи.

Розглянемо другий варіант синтезу цифрового нечіткого регулятора СУ частотою обертання ротора газотурбінного двигуна.

Для простоти рішення задачі синтезу НР припустимо, що число термів, з допомогою яких оцінюється лінгвістичні змінні (вхідні і вихідні параметри НР) помилка системи  $\theta$ , швидкість зміни (перша похідна) помилки  $\dot{\theta}$ , прискорення (друга похідна) помилки  $\ddot{\theta}$ , керуючого впливу на об'єкт  $m$ , мінімальне, тобто рівне 2. Відобразимо діапазони:  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ ,  $[\dot{\theta}_{\min}, \dot{\theta}_{\max}]$ ,  $[\ddot{\theta}_{\min}, \ddot{\theta}_{\max}]$  і  $[m_{\min}, m_{\max}]$  зміни вхідних і вихідних параметрів на єдину універсальну множину  $U_i = [0, L_i - 1] = [0, 1]$ , де  $L_i = 2$  - число, що відповідає кількості термів кожної лінгвістичної змінної  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $n = 4$ . При цьому перерахунок фіксованого значення параметра  $x_i^* \in [x_{ni}, x_{ei}]$  у відповідний елемент  $u^* \in [0, 1]$  визначається пропорцією [7]:

$$(x_{ei} - x_{ni}) / (1 - 0) = (x_i^* - x_{ni}) / (u^* - 0),$$

із якої отримуємо:

$$u^* = (x_i^* - x_{ni}) / (x_{ei} - x_{ni}). \quad (9)$$

Таким чином знаходимо:

$$u_1^* = (\theta^* - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}); \quad (10)$$

$$u_2^* = (\dot{\theta}^* - \dot{\theta}_{\min}) / (\dot{\theta}_{\max} - \dot{\theta}_{\min}); \quad (11)$$

$$u_3^* = (\ddot{\theta}^* - \ddot{\theta}_{\min}) / (\ddot{\theta}_{\max} - \ddot{\theta}_{\min}); \quad (12)$$

$$u_4^* = (m^* - m_{\min}) / (m_{\max} - m_{\min}). \quad (13)$$

На множині  $U = [0, 1]$  задамо дві нечіткі підмножини, функції належності, яких трикутної форми ( $\mu^1(u)$  і  $\mu^2(u)$ ) показані на рис. 4.

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами  $(u_1, \mu_1)$  і  $(u_2, \mu_2)$ , вигляду (6)

Тоді, відповідно до рис. 4, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини:

$$\mu^1(u) = 1 - u, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu^2(u) = u, \quad u \in [0, 1]. \quad (14)$$

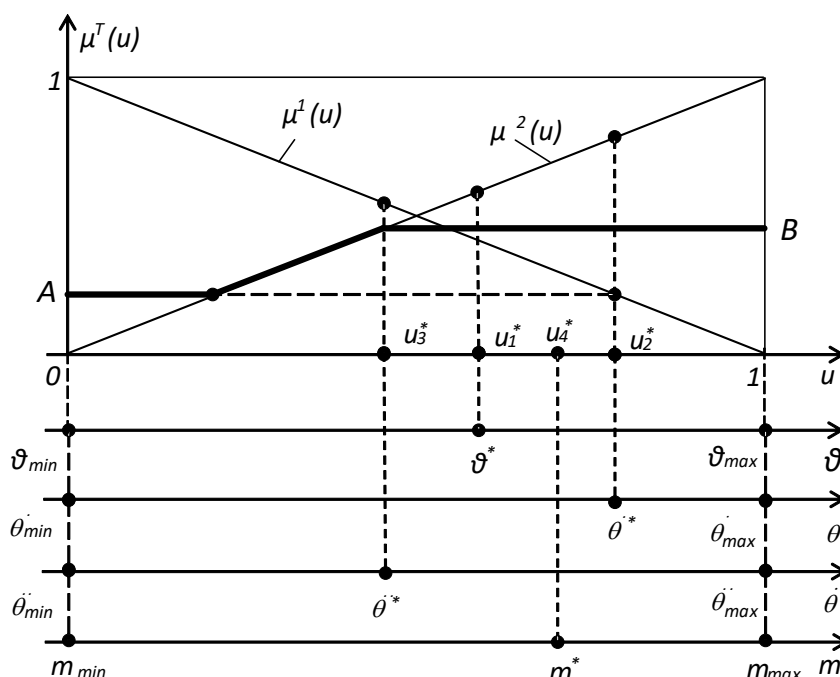


Рисунок 4 – Функції належності двох нечітких підмножин на множині  $U = [0, 1]$

Для одержання аналітичних виразів запропонованих ФН скористаємось рівнянням прямої, що проходить через точки з координатами  $(u_1, \mu_1)$  і  $(u_2, \mu_2)$ , вигляду (6)

Тоді, відповідно до рис. 4, одержимо наступні ФН для кожної лінгвістичної величини:

$$\mu^1(u) = 1 - u, \quad u \in [0, 1];$$

$$\mu^2(u) = u, \quad u \in [0, 1]. \quad (14)$$

При подачі на НР значень вхідних змінних  $\theta^*, \dot{\theta}^*$  і  $\ddot{\theta}^*$  з кроком квантування  $h$  здійснюється перерахунок величин  $u_1^*, u_2^*, u_3^*$  за формулами (10) - (12) і ФН  $j = \overline{1, 2}$ , за формулами (14).

Сформулюємо лінгвістичне правило управління НР у вигляді:

$$\text{Якщо } (\theta^* = a_1^j) \text{ і } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ і } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \\ \text{то } (m^* = a_4^j), \quad j = \overline{1, 2}, \quad (15)$$

де  $a_1^j, a_2^j$  і  $a_3^j$  - лінгвістичні оцінки помилки швидкості зміни (першої похідної) помилки і другої похідної помилки, які розглядаються як нечіткі множини, визначені на універсальній множині,  $j = \overline{1, 2}$ ;  $a_4^j$  - лінгвістичні оцінки керуючого впливу на об'єкт, які вибрані із терм-множини змінної  $m$ . Лінгвістичні оцінки

вибираємо із терм-множини лінгвістичних змінних  $\theta^*, \dot{\theta}^*$  і  $\ddot{\theta}^*$  і  $m$ :

$$a_i^j \in \{\text{негативний (1), позитивний (2)}\}.$$

Іншими словами, всі сигнали (визначені вище лінгвістичні змінні) в СУ характеризуються як негативні ( $j = 1$ ) або позитивні ( $j = 2$ ).

Нехай  $\mu^j(x_i)$  ФН параметра  $x_i \in [x_{ni}, x_{bi}]$  нечіткому терму  $a_i^j$ ,  $i = \overline{1, 3}$ ;  $j = \overline{1, 7}$ . Тоді  $\mu^{m_j}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  - залежить від трьох змінних ( $x_1 \equiv \theta$ ;  $x_2 \equiv \dot{\theta}$ ;  $x_3 \equiv \ddot{\theta}$ ) функція належності вектора параметрів рішення (вбраному керуючому впливу на об'єкт)  $m_j$ ,  $j = \overline{1, 7}$ , визначається із системи нечітких логічних рівнянь:

$$\mu^{m_j}(x_1, x_2, x_3) = \mu^j(x_1) \wedge \mu^j(x_2) \wedge \mu^j(x_3) \quad (16).$$

Таким чином,  $\mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3)$  - функція належності керуючого впливу нечіткій множині „негативний”, а  $\mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3)$  - функція належності керуючого впливу нечіткій множині „позитивний”. Результуюча ФН для керуючого впливу у відповідності з робочим правилом НР записується у вигляді:

$$\mu^m(x_1, x_2, x_3) = \mu^{m_1}(x_1, x_2, x_3) \vee \mu^{m_2}(x_1, x_2, x_3). \quad (17)$$

У виразах (16) і (17)  $\wedge$  - логічне і,  $\vee$  - логічне або.

У відповідності з лінгвістичними правилами керування, які формалізовані системою нечітких логічних рівнянь (16) ФН керуючого впливу  $\mu^1(u_4)$  нечіткій множині „негативний” обмежена зверху значенням:

$$A = \min[\mu^1(u_1^*), \mu^1(u_2^*), \mu^1(u_3^*)], \quad (18)$$

а ФН керуючого впливу  $\mu^2(u_4)$  нечіткій множині „позитивний” обмежена зверху значенням:

$$u_4^* = \frac{\sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k) [(2a_{k+1} + a_k)b_{r+1} + (2a_k + a_{k+1})b_k]}{3 \sum_{k=1}^N (a_{k+1} - a_k)(b_{k+1} + b_k)}, \quad (22)$$

де  $N$  - число вершин,  $a_k, b_k$  - координати вершин результуючої фігури.

Одержане значення  $u_4^*$  на основі формули (22) перетвориться в значення керуючого впливу на ОК:

$$m^* = m_{min} + (m_{max} - m_{min})u_4^*. \quad (23)$$

Дослідимо точність відпрацювання СУ з цифровим fuzzy-регулятором закону зміни вхідного впливу, заданого поліномом:

$$\alpha_1(t) = 1,3316 \times 10^{-3} + 0,1653269t - 0,4785008t^2 + 0,1037928t^3 - 8,8016 \times 10^{-3}t^4 + 3,404 \times 10^{-4}t^5 - 5,093 \times 10^{-6}t^6.$$

Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів (вибираються при проектуванні НР і уточнюються шляхом математичного моделювання з метою одержання прийнятних показників якості перехідного процесу в замкнутій системі):

$$[\theta_{min}, \theta_{max}] = [-1,02; 1,02], \quad [\dot{\theta}_{min}, \dot{\theta}_{max}] = [-4; 4],$$

$$[\ddot{\theta}_{min}, \ddot{\theta}_{max}] = [-24; 24] \text{ і } [m_{min}, m_{max}] = [-1, 1].$$

Припустимо, що задана функція зміни частоти обертання ротора газотурбінного двигуна  $\omega_1(t)$ , залежності параметрів  $\alpha(t), T_{ГТД}(t)$  і  $T_{ДВ}$  передавальної функції  $G_0(s)$  від часу роботи газотурбінного двигуна визначаються за приведеними вище формулами. Дослідимо

$$B = \min[\mu^2(u_1^*), \mu^2(u_2^*), \mu^2(u_3^*)]. \quad (19)$$

Результуюча ФН для керуючого впливу на основі виразу (13) визначається як:

$$\mu(u_4) = \mu^1(u_4) \vee \mu^2(u_4), \quad (20)$$

тобто одержується формуванням максимуму (товста лінія на рис. 4):

$$\mu(u_4) = \max[\mu^1(u_4), \mu^2(u_4)]. \quad (21)$$

Для визначення конкретного значення керуючого впливу  $m^*$  формується „результуюча фігура”, обмежена результуючою ФН.

Відбувається пошук абсциси "центру тяжіння" результуючої фігури за формулою [9]:

точність відпрацювання СУ з цифровим fuzzy-регулятором закону зміни вхідного впливу.

Діапазони зміни вхідних і вихідних параметрів наступні:

$$[\theta_{min} = -1; \theta_{max} = 1], \quad [\dot{\theta}_{min} = -4,5; \dot{\theta}_{max} = 4,5],$$

$$[\ddot{\theta}_{min} = -32; \ddot{\theta}_{max} = 32] \text{ і } [m_{min} = -1; m_{max} = 1].$$

Час розгону газотурбінного двигуна  $\tau_r = 6$  с. Крок квантування  $h = 0,01$ с.

**Висновок** В роботі досліджена система адаптивного управління частотою обертання ротора газотурбінного двигуна при розглянутих вище параметрах ОК і вхідному впливі. Порівняльна оцінка роботи (характеризується поточною помилкою) системи адаптивного управління і системи, розрахованої на базі НЛ, дає можливість зробити висновок, що застосування НР для управління частотою обертання ротора ГТД є доцільним, оскільки поточна помилка в системі з нечітким регулятором не перевищує поточну помилку в адаптивній системі.

### Література

1. Зак Ю. А. Принятие решений в условиях нечетких и размытых данных : Fuzzy-технологии. Зак. - 2-е изд. Москва, 2016. 352 с.
2. Hanss M. Applied Fuzzy Arithmetic [electronic resource]: An Introduction with Engineering Applications / by Michael Hanss. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. // Springer e-books - v.: digital
3. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive PID controller for nonlinear systems with  $H_{\infty}$  tracking performance. *Physics and Control*, 2003. Proceedings. 2003 International Conference (Volume: 4), 20-22 Aug. 2003. 2003. P. 1315-1319.
4. Тельнов К.А., Файнштейн А. А., Шабашов С. 3. Автоматизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Учебное пособие. Ленинград: Недра, 1983. 280 с.
5. Macedo Mourelle, Luiza de. Fuzzy Systems Engineering [electronic resource] / Theory and Practice edited by Luiza de Macedo Mourelle, Nadia Nedjah. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag GmbH., 2005 Springer e-books - v.: digital.
6. Sementsov G.N., Kuchmistenko O. V. Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline. *Academic Bulletin*. 2004. № 13. P. 84-86.
7. Семенцов Г.Н. Интеллектуальні системи керування технологічними процесами: навч. посіб. ІФ. : ІФНТУНГ, 2012. - 173 с.

### References

1. Zak Yu. A. Pryn'yaty'e resheny`j v uslovy`yax nechetky`x y` razmytyx dannyx : Fuzzy-texnologiy`. Zak. - 2-e y`zd. Moskva, 2016. 352 s.
2. Hanss M. Applied Fuzzy Arithmetic [electronic resource]: An Introduction with Engineering Applications / by Michael Hanss. - Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. // Springer e-books - v.: digital
3. Ho H. F., Wong Y. K., Rad A. B. Adaptive PID controller for nonlinear systems with  $H_{\infty}$  tracking performance. *Physics and Control*, 2003. Proceedings. 2003 International Conference (Volume: 4), 20-22 Aug. 2003. 2003. R. 1315-1319.
4. Tel`nov K.A., Fajnshtejn A. A., Shabashov S. Z. Avtomaty`zacy`ya gazoperekachy`vayushhy`x agregatov s gazoturby`nnym pry`vodom. Uchebnoe posoby`e. Leny`ngrad: Nedra, 1983. 280 s.
5. Macedo Mourelle, Luiza de. Fuzzy Systems Engineering [electronic resource] / Theory and Practice edited by Luiza de Macedo Mourelle, Nadia Nedjah. - Berlin Heidelberg : Springer-Verlag GmbH., 2005 // Springer e-books - v.: digital.
6. Sementsov G.N., Kuchmistenko O. V. Fazzi-model for simulation of unauthorized leakage of oil from the pipeline. *Academic Bulletin*. 2004. # 13. P. 84-86.
7. Sementcov G.N. Intelktualni systemy keruvannya texnologichnymy procesamy: navch. posib. IF.: IFNTUNG, 2012. 173 s.