

Автоматизована система вибору структури регулювання частоти обертання електроприводу змінного струму з коливальною механікою

С.М. Балюта, доктор технічних наук, завідувач кафедри електропостачання і енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій
І.Ю. Бурляй, кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання і енергоменеджменту, Національний університет харчових технологій

У статті розглянута система вибору схеми автоматичного регулювання частоти обертання та положення електромеханічної системи з урахуванням пружних властивостей вала, люфту й нелінійного на основі фuzzi-регулятора, що найкраще забезпечує задані вимоги щодо динамічних характеристик системи.

В статье рассмотрена система выбора схемы автоматического регулирования электромеханической системы с учетом упругих свойств вала, люфта и нелинейного на основе фuzzi-регулятора. Представленная система обеспечивает выбор схемы регулирования частоты вращения электромеханической системы с упругими связями при наличии люфта и нелинейного трения, которая, обеспечивает заданные динамические свойства.

In article the method of the automated choice of the scheme of regulation of frequency of rotation and position of the electric drive of an alternating current with oscillatory mechanics is presented. The method is based on the theory of indistinct sets (fuzzi-systems) and assumes the analysis of various schemes of regulation of electric drives of an alternating current at presence backlash and a dry friction on the basis of the generated criteria of quality of system of automatic control.

ВСТУП

Особливістю технологічного й силового устаткування цукрової промисловості є його висока матеріало- і енергоємність. Зокрема, недосконалі методи регулювання навантажено-розвантажувальних машин, виконавчих пристроїв автоматики, спричиняють появу в механічних частинах цих механізмів значних динамічних перевантажень. Це обумовлює необхідність зміцнення механічних конструкцій і відповідно збільшення масо габаритних показників і їх енергоємності системи. Сучасні методи моделювання різноманітних процесів і розроблені на їхній основі системи керування дозволяють істотно підвищити якість керування й знизити динамічні навантаження окремих технологічних агрегатів.

Протягом останніх 20 років з'явилася велика кількість різноманітних структури регулювання, розроблених з метою задоволення постійно зростаючих вимог до підвищення точності й покращення динаміки регулювання [1-4]. Часто ці регулятори є дуже сильно підігнаними до спеціального об'єкта регулювання або ж не зазначено ніяких даних про те, у яких областях їх можна застосовувати. Частково регулятори відрізняються тільки використаною методикою визначення параметрів

об'єкта регулювання й розрахунком настроювань регулятора.

Якщо завдання полягає тільки в тому, щоб синтезувати регулятор для спеціальної механіки, то інженер може вирішувати це завдання, базуючись на його досвіді вибору структури регулятора, дослідження параметрів і насамперед моделювання. Він може наблизитися до задовільного результату ітеративно, варіюючи параметри регулятора, за запитами змінюючи його структуру й відповідно модифікуючи регулятор. Якщо необхідно, можуть вноситися зміни в технічні засоби регулювального пристрою, щоб покращити, приміром, розрізняючи спроможність датчиків й у такий спосіб зменшити рівень перешкод у сигналах вимірювань підвищити розрахункову продуктивність процесора або реєструвати іншу вимірювану величину. Цей порядок дій можливий, зрозуміло, тільки в дуже обмежених випадках і не гарантує швидкого отримання необхідного результату.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Завдання полягає в розробці автоматизованої системи, яка на основі методів ідентифікації механічних й електричних параметрів електро-

привода, використовуючи методи нечіткої логіки (фазі-систем) для заданого об'єкту регулювання буде проводити автоматизований вибір системи регулювання частоти обертання й положення, визначення параметрів регуляторів для забезпечення необхідних динамічних характеристик системи регулювання.

ОСНОВНІ МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Щоб автоматизовано вирішувати питання вибору системи регулювання й визначення параметрів, цей процес повинен бути інтегрований в автоматизовану систему уведення в дію частотно-регульованої електромеханічної системи, яка передбачає процедури автоматичного визначення механічних та електричних параметрів електромеханічної системи змінного струму (ЕМС) [5].

Концепція автоматизованого вибору системи регулювання

Автоматизований вибір системи регулювання й розрахунку параметрів регуляторів передбачає наступні етапи (рис. 1):

- оцінка динамічних властивостей каналів регулювання привода;
- формулювання спеціалізованих вимог до привода;

• системне порівняння різних систем регулювання й визначення параметрів регулятора за допомогою розробленої методики.

Динамічні властивості привода

Динамічні властивості привода можуть змінюватися в широкому діапазоні, тому принципово найкраща схема регулювання повинна вибиратися не тільки для обмеженої області зміни параметрів, але й для всього класу різних параметрів. При цьому крім можливої зміни параметрів, потрібно також враховувати люфт й / або нелінійне тертя, різну якість реєстрації результатів вимірів. Для забезпечення, по можливості, більш загального опису й визначення параметрів об'єкта регулювання, необхідно скоротити кількість параметрів об'єкта регулювання, які використовуються для вибору. Аналіз властивостей об'єкта регулювання показав, що електромеханічна система з коливальною механікою як об'єкт регулювання достатньо повно описується двома основними параметрами: $\omega_e T_\Sigma$ – добутком власної кутової частоти об'єкта ω_e та сумарної постійної часу контуру регулювання T_Σ і $V_j = J_2/J_1$ – відношенням приведених моментів інерції валу навантаження J_2 й валу приводного двигуна J_1 [5].

На основі інших параметрів об'єкта регулювання, таких як $f_e, d, V_p, J_\Sigma, T_{Ep}, T_{\Sigma 1}$ й T проводиться

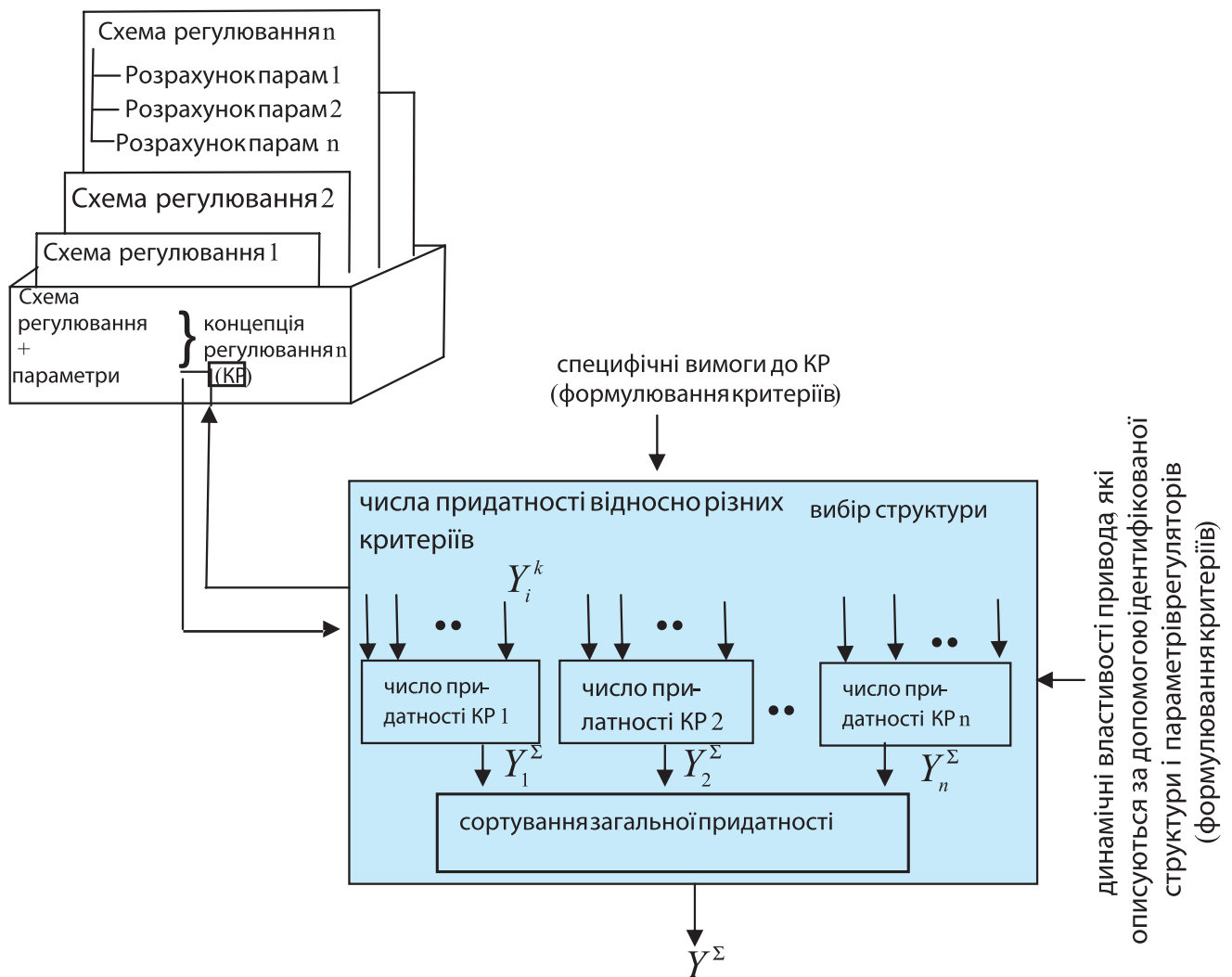


Рис. 1. Алгоритм автоматизованого вибору системи регулювання

попередній розрахунок початкового настроювання регуляторів схем регулювання частоти обертання.

Ступінь впливу тертя та люфту на вибір регулятора залежить від точних параметрів об'єкта регулювання. Тому, насамперед розглядаються лінійні об'єкти регулювання. Тертя та нелінійний люфт враховуються після попередніх розрахунків настроювань регуляторів. Для характеристики пристрою реєстрації результатів виміру положення валу механізму використовується загальна довжина слова датчика положення, а при розрахунку параметрів урахується фільтрація й можливо необхідні спостерігачі змінних стану електромеханічної системи.

Специфічні вимоги до системи регулювання

При виборі системи регулювання основна вимога, як правило, полягає в тому, щоб досягти по можливості більшої ширини смуги частот системи регулювання. При багатьох застосуваннях система повинна бути достатньо стійкою, зокрема, при змінах робочих режимів або неточно ідентифікованих параметрах об'єкта регулювання. Ці обидві вимоги, як правило, є суперечливими. Виходячи із цього до специфічних вимог до системи регулювання відносять:

- динамічне регулювання числа обертів з малим часом перехідного процесу й незначним перерегулюванням;
- регулювання руху з гарною характеристикою регулювання за збурюванням;
- високо динамічне позиційне регулювання, по можливості, з більш незначним відхиленням від траєкторії;
- по можливості, обережне навантаження пружної муфти (незначні динамічні крутильні навантаження валу);
- по можливості, більш проста структура регулятора на основі обмеженої продуктивності процесора.

Для урахувати побажань користувача й реалізації його конкретних спеціалізованих вимог оцінки якості регулювання доцільно використати такі критерії, як час першого досягнення заданого значення, максимальне перерегулювання, час перехідного процесу, лінійний критерій якості [5]. При виборі системи регулювання, вимоги, які сформульовані користувачем, необхідно враховувати з різним ступенем ваги.

Метод системного порівняння схем регулювання

Придатність й якість регулювання різні системи регулювання електромеханічних систем з коливальною механікою залежить не тільки від структури механічної підсистеми (одно-, двохмасова або трьохмасова система), але й від її параметрів, використаного методу їхнього визначення й настроювань регулятора [4]. Тому завдання

полягає у розробці *методу системного порівняння систем регулювання*, щоб за допомогою загальновідомих критеріїв, таких як час першого досягнення заданого значення t_{an} , час перехідного процесу t_{aus} , максимальне перерегулювання h_m , лінійний критерій якості (ІТАЕ) [5] провести порівняння різних схем й виявити схему, що найкраще задовольняє вимогам до якості регулювання й властивостям об'єкта регулювання.

Під поняттям система регулювання надалі розуміється стійка структура регулятора в сполученні з певною методикою визначення його параметрів [5] .

У даній статті пропонується метод системного порівняння, побудований на наступних принципах:

- оскільки стаття присвячена автоматизованому вибору структури регулятора числа обертів, тому регулятори положення без підлеглого контуру регулювання числа обертів не розглядаються. Регулятор положення, в основному, реалізується як П-регулятор і в замкнутому контурі регулювання частоти обертання є верхнім каскадом, що надає суттєві переваги поступового уведення системи в дію й простого обмеження допустимих граничних значень змінних регулювання, можливості автоматизації визначення параметрів й використання дискретності фільтрів и т. д.

- динамічні характеристики системи автоматичного регулювання положення можуть бути оптимізовані узгодженням попереднього керування і відповідним включенням величини, що задається. Оскільки приєднання величини, що задається проводиться лише в колах вищого контуру, тому це не впливає на стійкість контуру регулювання.

Потрібно звернути увагу на можливість реалізації системи регулювання: програмування й обслуговування алгоритмів регулювання, а також продуктивність використовуваних технічних засобів регулювання. Для цього розроблені алгоритми необхідно узгоджувати із блоком генераторів коду, який використовуються при блочно-орієнтовному представленні алгоритмів регулювання, враховуючи, що це може призводити до втрати продуктивності використовуваних процесорів.

При визначенні параметрів регулятора необхідно, по можливості, урахувати деякі фізично інтерпретовані параметри системи регулювання. Крім того, порядок дій і основні параметри систем регулювання, які порівнюються, повинні бути зрозумілі для користувача незалежно від дійсної структури регулятора. В результаті вибір системи регулювання обмежується відносно простою структурою регуляторів, що в окремих випадках може зменшити якість регулювання на користь загальної застосовності. Одночасно побічно необхідно дотримувати вимогу до продуктивності використовуваних технічних засобів регулювання, а також простоти програмування й обслуговування алгоритмів.

Основна ідея вибору регулятора, полягає в тому, що призначена для певного застосування схема регулювання, аналізується виходячи із спеціалізованих вагових «атрибутів», заданих користувачем, таких як:

- нечутливість до немодельованих властивостей об'єкту регулювання й неточно визначених параметрів, що обумовлені похибкою визначення або залежністю параметрів об'єкту регулювання від часу;

- ширина полоси частот замкненого контуру регулювання забезпечує виконання пов'язаних з цим критеріїв. Для кожного атрибуту x розраховується «число придатності» y_i^x (наприклад, для атрибуту нечутливість y_i^{Rob} і для атрибуту ширина полоси частот y_i^{Bb}), де фазі-змінна може приймати значення від «0: не підходить» до «1: дуже добре підходить». Потім окремі числа придатності зв'язуються в загальний механізм так званої «загальної придатності» y_i^Σ системи регулювання (рис. 2). Система регулювання з вищою загальною придатністю може розглядатися, як така, що найкраще задовольняє поставленим вимогам.

Власне кажучи, пристосування до специфічних для застосування вимог проводиться за допомогою того, що для формування остаточного ви-

сновку використовуються тільки певні вибрані числа придатності.

У випадку якщо системи регулювання, що розглядається, має окремий атрибут невідповідним ($y_f - 0$), тоді придатність всієї системи автоматично оцінюється як нуль.

Нечутливість до зміни параметрів (робастність) це істотна вимога до всіх схем регулювання, яка не залежить від запитів, сформульованих користувачем. Щоб гарантувати, що залежно від використаних атрибутів забезпечує однаково-постійний його вплив на загальну придатність, перед формуванням загального висновку формується атрибут ваги ξ , що множиться на число придатності y_i^{Rob} .

У загальному випадку, при виборі системи регулятора з однієї сторони зневажають тим, що параметр $\omega_e T_\Sigma$ залежить від постійної часу фільтра T_{FP} , а з іншої сторони T_{FI} потрібно вибирати як й інші вільні параметри системи регулювання. Щоб вирішувати це завдання, пропонується скоротити число вільно обраних параметрів системи регулювання.

Вільно обрані параметри регулятора обмежують параметром загасання α , постійною часу фільтра T_{FI} й постійною часу спостерігача T_{BF} .

Інші параметри вибираються у відповідній послідовності (табл. 1), ґрунтуючись на результатах

ζ значення застосованого атрибуту

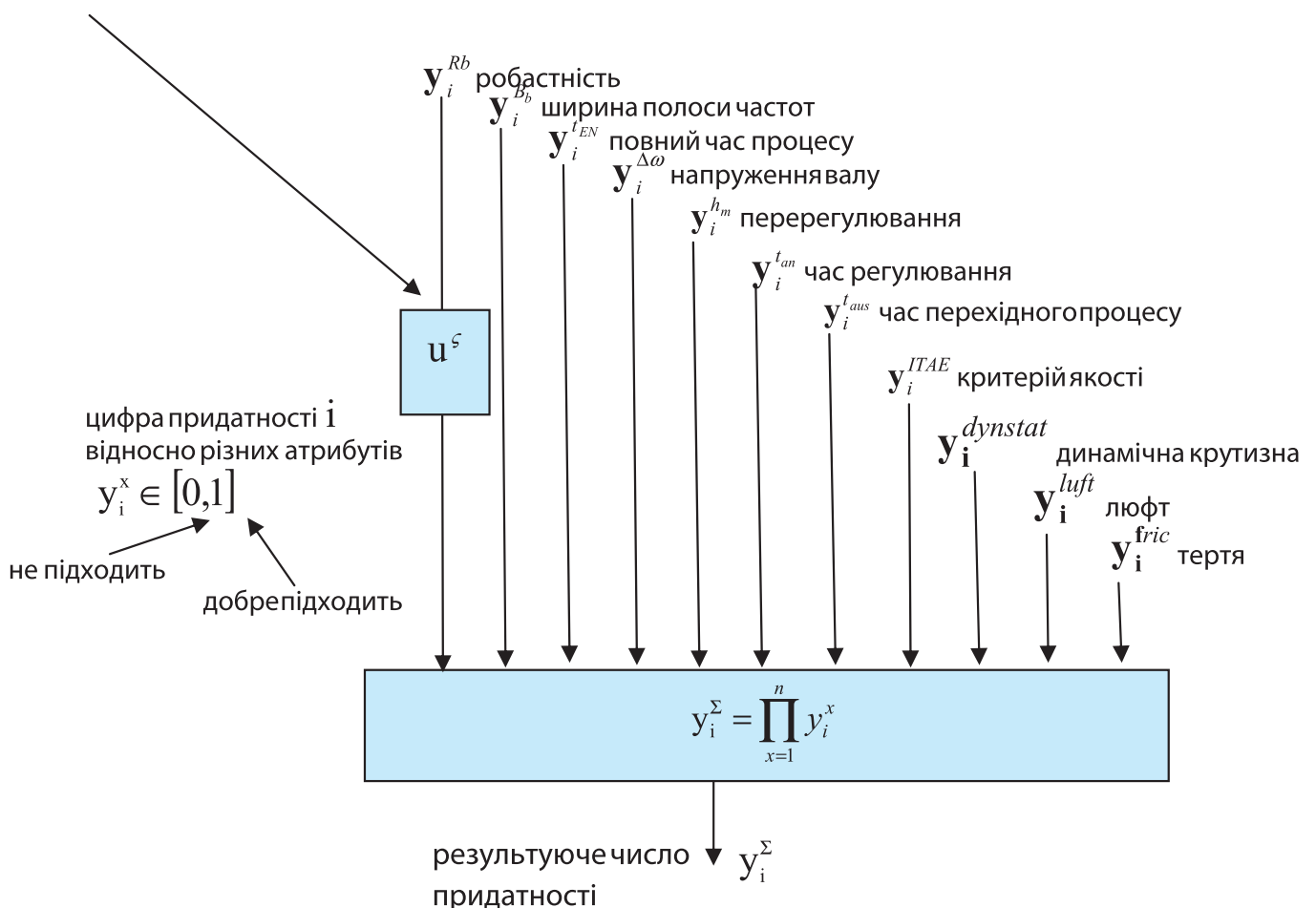


Рис.2. Схема логічного визначення придатності окремих елементів системи для визначення результуючої придатності всієї системи регулювання

Вільні й установлювані параметри синтезу системи регулювання; $f = 200$ Гц

Назва структури	Вільні параметр синтезу	Встановлені параметри синтезу
ПРРЧО	$\alpha, T_{F1}, T_{B1} = T_{EB}/5$	
ПРЕМО	$\alpha, T_{F1}, T_{B1} = T_{EB}$	$T_{F2} = 1/(2\pi \cdot f), \alpha_{st} = 2$
ПРС	$\alpha, T_{B1} = T_{EB}/5$	
ПСС	$\alpha, T_{F1}, T_{B1} = T_{EB}$	$T_{F2} = 1/(2\pi \cdot f)$
ПССРЧ	$\alpha, T_{F1},$	

визначення й реєстрації результатів вимірів. На основі аналізу даних з використанням правил нечіткої логіки (фазі регулювання) (рис.3) визначають постійні часу фільтра T_{F1} й спостерігача T_{B1} .

При побудові фазі-регулятора виходять із припущення, що буде сформована база правил у формі ЯКЩО (IF) <передумова> ТОДІ (THEN) <вивід> і база даних з функціями приналежності для передумов і виводів, тобто визначені всі необхідні лінгвістичні правила з лінгвістичними змінними й термами. Терм - основна структурна одиниця вираження.

Для прийняття рішення розробляється певна інференц-стратегія, тобто певний механізм нечітких логічних виводів. За допомогою цього механізму виконують: оцінку передумов, тобто встановлення істинності ЯКЩО (IF) частини кожного правила, що представляє собою сукупність зв'язаних між собою нечіткими операторами И (AND), АБО (IF) нечітких логічних висловлень; оцінку ступеня істинності ТЕ (THEN) частини кожного правила; узагальнення часткових рішень кожного активованого правила бази правил і формування нечіткого логічного виводу у формі функції приналежності вихідної лінгвістичної змінної, відповідному вихідному сигналу.

Використовуючи ідентифіковані параметри і постійні часу за допомогою правил нечіткої логіки вибирають систему регулювання, яка підходить найкраще, потім для цієї системи визначають параметри об'єкта регулювання й розраховують параметри регулятора [5].

Для аналізу прийняті наступні системи регулювання частоти обертання та положення, в яких використані різні типи регуляторів: ПРС- ПІ-регулятор стану; ПРЕМО – П-регулятор з використанням еталонної моделі; ПРРЧО – П-регулятор з використанням різниці частот обертання валу двигуна й валу навантаження; ПРС – ПІ-регулятор із скороченим спостерігачем; ПССРЧ - регулятор зі скороченим

спостерігачем і приєднанням різниці частот обертання валу двигуна й валу навантаження [5].

При створенні фазі-системи, насамперед, проаналізуємо, які параметри мають переважний вплив на встановлення постійних часу спостерігача T_{B1} й фільтра $T_{F1} = 1/(2\pi n_G)$. Встановлено, що основний вплив на вказані параметри мають розрізняюча здатність датчика вимірювання кута повороту ротора привідного двигуна, сумарний момент інерції валів привідного двигуна та навантаження, номінальний момент привідного двигуна, власна частота механічної системи. Розглянемо зазначені параметри докладніше.

Зокрема, на вибір граничної частоти фільтру істотно впливає складова шуму сигналу датчика кута повороту й числа обертів. Тому за допомогою фільтру необхідно згладжувати значення змінних стану, отриманих за допомогою спостерігача. Шум у сигналі, одержуваному з датчика кута повороту валу двигуна, залежить від погрішності квантування $\Delta \epsilon_M = 2\pi/2^N$ [5]. Тому характерною й просто обумовленою вхідною величиною фазі регулятора задається довжина слова N датчика положення, що дозволяє оцінити погрішність датчика й блоку оцінки результатів. Для врахування погрішності датчика використовують «ефективну» довжину слова датчика N_G , де $N_G = N-2$ [4]. Враховуючи, що при виборі регулятора припускається розгляд приводів із різноманітними характеристиками механічної системи, тому при їхньому застосуванні необхідно враховувати наявність різних вимірювальних систем положення ротора - від резольвера з типовою розрізняючою здатністю, до оптичних покровкових датчиків із синусоїдальними вихідними сигналами. Ефективна довжина слова кута повороту ротора перебуває в межах від 11 до 23 біт / оберт [5].

Зі зростанням сумарного моменту інерції J_Σ , у загальному випадку, відповідно збільшуються коефіцієнти підсилення регулятора. Це впливає на обмеження розрізняючої здатності датчика чис-

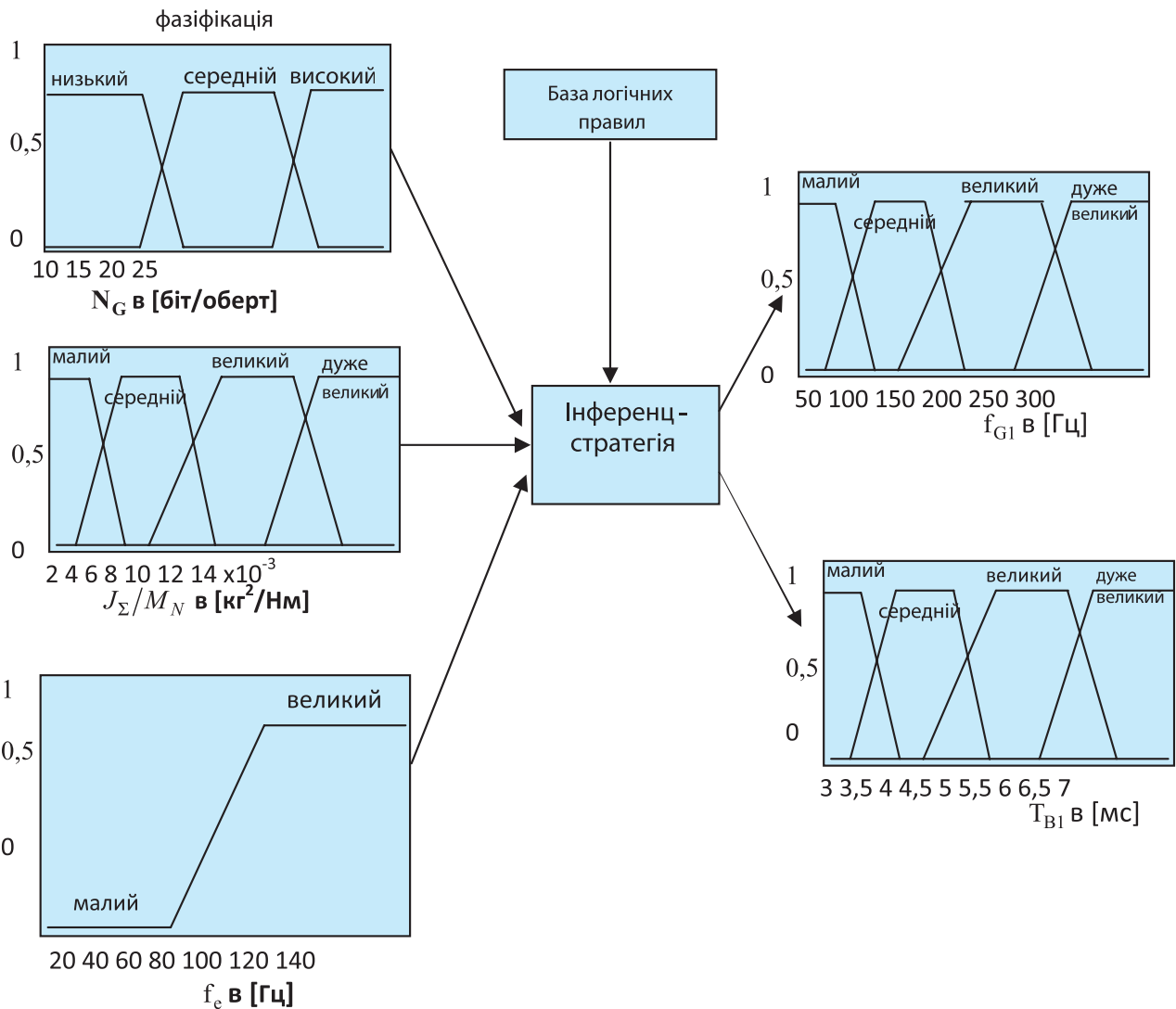


Рис. 3. Визначення постійних часу фільтра й спостерігача за допомогою фазі-регулятора

ла обертів. Тому беручи до уваги втрати сигналу й розвиток шуму, при зростанні співвідношення J_{Σ}/M_N відношення сигналу перешкод до корисного сигналу повинне залишатися приблизно постійним. Крім того, за допомогою фільтра й спостерігача підсилюється придушення перешкод.

При синтезі регулятора приймають, що сумарна постійна часу системи регулювання T_{Σ} повинна бути малою. В той же час, ця стала часу містить у собі постійну часу фільтра. Тому потрібно шукати компроміс між придушенням перешкод (велика T_{FI}) і динамікою регулювання (мала T_{FI}). Для високих власних частот значення T_{FI} необхідно вибрати по можливості більше малим і придушення перешкод робити за рахунок збільшення постійних часу спостерігача [5]. Цей спосіб не можна реалізувати без обмежень, тому що з однієї сторони ширина смуги частот спостерігача повинна була бути значно ширшою ніж смуга частот регулятора, а з іншого боку, у випадку спостерігача величини збурення, чітко погіршуються характеристики регулювання за збурюванням.

Розрізняюча здатність датчика числа обертів $\Delta\omega_M = \Delta\epsilon_M/T$ через період дискретності T пов'язана з довжиною слова датчика положення.

Тому зміна періоду дискретності може призвести до зміни модифікованої розрізняючої здатності датчика кута повороту. Таким чином, період дискретності може випадати як безпосередня вхідна величина фазі-системи. Отже як вхідні величини фазі-системи [6] використовують параметри f_c , J_{Σ}/M_N та ефективну довжину слова сигналу датчика положення N_G (рис. 3).

У блоці висновків нечіткої логіки на підставі трьох вхідних величин за допомогою представлених функцій приналежності й логічних правил (таблиця. 2) з використанням лінгвістична змінних проводиться порівняння різних характеристик, а в блоці дефазифікації висновку за принципом мінімум - максимум формується результат. Вплив періоду дискретності на динаміку системи враховується за допомогою сталої часу, оскільки $T_{\Sigma} = T_{I\Sigma} + T_{AH} + T_{Ei}$.

За результатами логічних висновків визначають максимальні значення вихідних величин T_{Bi} й $T_{Fi} = 1/(2\pi f_{G1})$. Так званий фазі висновок одержують за допомогою методу основного запиту. На стороні виходу знову використовуються логічні функції, які представлені в табл. 2.

В схемах регулювання ПРЕМО й ПЧС/

Основні логічні правила

IF	N_G мале	THEN	f_{G1} мале AND T_{Ni} велике
IF	N_G середнє	THEN	f_{G1} середнє AND T_{Ni} середнє
IF	N_G велике	THEN	f_{G1} велике AND T_{Ni} мале
IF	J_{Σ}/M_N мале	THEN	f_{G1} велике
IF	J_{Σ}/M_N середнє	THEN	f_{G1} середнє
IF	J_{Σ}/M_N велике	THEN	f_{G1} д мале
IF	J_{Σ}/M_N дуже велике	THEN	f_{G1} дуже мале
	f_{ϵ} велике	THEN	f_{G1} велике AND T_{Ni} мале
IF	N_G мале J_{Σ}/M_N дуже велике	THEN	f_{G1} дуже мале AND T_{Ni} велике
IF	N_G середнє AND J_{Σ}/M_N дуже велике	THEN	f_{G1} дуже мале

ПССРЧ число обертів одержують безпосередньо за результатами вимірів (розраховують із кута повороту) і не використовують значення, отримані за допомогою спостерігача, в результаті це дозволяє знизити граничну частоту фільтра керуючого впливу до значення $2/3 f_{G1}$.

Необхідно враховувати, що нечіткі множини й числа придатності формуються на підставі експериментальних і розрахункових досліджень різних систем регулюванні при зміні параметрів механічної системи й оцінюванні якості перехідного процесу за допомогою критеріїв якості, використовуючи нечіткі множини [6].

ВИСНОВКИ

Використання правил нечіткої логіки дозволяє побудувати автоматизовану систему вибору системи автоматичного керування частоти та положення електромеханічних систем змінного струму з коливальною механікою, яка враховує зміну параметрів об'єкта керування в широкому діапазоні, особливості датчика частоти обертання, спостерігача змінних стану та вимоги до якості системи керування.

Список використаних джерел

1. *Brandenburg, G.; Kaiser, W.* : On PI motion control of elastic systems with notch filters in comparison with advanced strategies. IFAC Workshop on Motion Control. Munich, 1995, pp. 863-875.
2. *Brandenburg, G.; Papiernik, W.* : Feedforward and Feedback Strategies Applying the Principle of Input Balancing for Minimal Tracking Errors in CNC Machine Tools. Proceedings of the 4th International Workshop on Advanced Motion Control, 1996. Japan, pp. 612-618.
3. *Brandenburg, G.; Schafer, U.* : Cascade-State Control of an Elastic Three Mass System for Cold Rolling Mill Main Drives. IFAC Workshop on Motion Control. Grenoble, France, Sept. 21-23, 1998, pp. 159-172.
4. *Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В.* Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков, УИПА, 2005. – 512 с.
5. *Балюта С.М.* Частотно-регульовані електромеханічні системи з інтелектуальним керуванням у системах автоматизації технологічних процесів/ С.М. Балюта. - К. : НУХТ, 2005.- 281 с.
6. *Архангельський В.И., Богаенко И.Н., Грабовський Г.Г., Рюмшин Н.А.* Системы фuzzi управления. - Київ, Техніка, 1997.- 206 с.