

# Особливості побудови системи автоматизованого вибору схем регулювання частоти електроприводів з використанням нечіткої логіки

*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 представлені основи побудови системи автоматизованого вибору схеми регулювання частоти обертання й положення електропривода змінного струму з коливальною механікою. Система будується на основі фаззи-регулятора, ураховує пружні властивості вала механічної передачі, наявність люфту й нелінійного тертя й дозволяє вибрати схему регулювання частоти обертання, що найбільшою мірою задовольняє поставленим вимогам до якості регулювання.*

*Ключові слова: система автоматизованого вибору схеми; електропривод з коливальною механікою; фаззи-регулятор.*

*В статье представлены основы построения системы автоматизированного выбора схемы регулирования частоты вращения и положение электропривода переменного тока с колебательной механикой. Система строится на основе фаззи-регулятора, учитывает упругие свойства вала механической передачи, наличие люфта и нелинейного трения и позволяет выбрать схему регулирования частоты вращения в наибольшей степени удовлетворяющей поставленным требованиям к качеству регулирования.*

*Ключевые слова: система автоматизированного выбора схемы; электропривод с колебательной механикой; фаззи-регулятор.*

*In article bases of construction of system 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 are presented. The system is under construction on the basis of a fuzzy -regulator, considers elastic properties of a shaft of mechanical transfer, presence люфта and a nonlinear friction and allows to choose the scheme of regulation of frequency of rotation to the greatest degree meeting the put requirements to quality of regulation.*

*Keywords: system of the automated choice of the scheme; the electric drive with oscillatory mechanics; fuzzy-regulator.*

## ВСТУП

Конкурентоздатність продукції цукрового виробництва в значній мірі обумовлюється матеріало- та енергоємністю технологічного обладнання. Сучасні методи моделювання та синтезу систем керування технологічним обладнанням дозволяють створити системи, які забезпечують низькі витрати енергії та надійність на рівні найкращих світових зразків.

За останні 20 років розроблено велику кількість різноманітних структури регулювання, які дозволяють значно підвищити точність й покращити динаміку регулювання частоти обертання електроприводів, забезпечивши уникнення механічних перевантажень елементів системи [1-4]. Якість кожної із запропонованих схем регулювання в значній мірі обумовлюються механічними параметрами механічної підсистеми.

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Завдання полягає в розробці автоматизованої системи, яка для конкретної технологічної установки використовує методів ідентифікації механічних й електричних параметрів електропривода, та базуючись на методах нечіткої логіки (фаззи-систем) дозволить вибрати систему регулювання частоти обертання й положення, яка в найбільшій мірі забезпечить отримання необхідних динамічних характеристик регулювання.

## ОСНОВНІ МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕНЬ

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

- оцінка динамічних властивостей каналів регулювання приводу;
- формулювання спеціалізованих вимог до приводу;
- системне порівняння різних систем регулювання й визначення параметрів регулятора за допомогою розробленої методики.

При виборі системи регулювання необхідно враховувати, що динамічні властивості приводу можуть змінюватися в широкому діапазоні. В результаті принципово найкращу схему регулювання необхідно вибирати 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 частоти обертання.

В загальному випадку електропривод з коливальною механікою як об'єкт регулювання достатньо повно описується двома основними параметрами:  $\omega_e T_\Sigma$  - добутком власної кутової частоти об'єкта  $\omega_e$  на сумарну постійну часу контуру регулювання  $T_\Sigma$  і  $V_j = J_2/J_1$  - відношенням приведених моментів інерції валу навантаження  $J_2$  й валу приводного двигуна  $J_1$  [5].

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

- нечутливість до немодельованих властивостей об'єкту регулювання й неточно визначених параметрів, що обумовлюються похибкою визначення або зміною параметрів об'єкту регулювання у часі;
- ширина полоси частот замкненого контуру регулювання забезпечує виконання пов'язаних з цим критеріїв. Для кожного атрибуту  $x$  розраховується «число придатності»  $y^x_i$  (наприклад, для атрибуту нечутливість  $y^{Rob}$  і для атрибуту ширина полоси частот  $y^{Bb}$ ), де фазі-змінна може приймати значення від «0: не підходить» до «1: дуже добре підходить».

Розраховані окремі числа придатності зв'язуються в загальний механізм так званої «загальної придатності»  $y^\Sigma_i$  системи регулювання (рис. 2). Система регулювання з вищою загальною придатністю розглядається, як така, що найкраще задовольняє поставленим вимогам.

Прийняття до специфічних для застосування вимог проводиться за допомогою того, що для формування остаточного висновку використову-

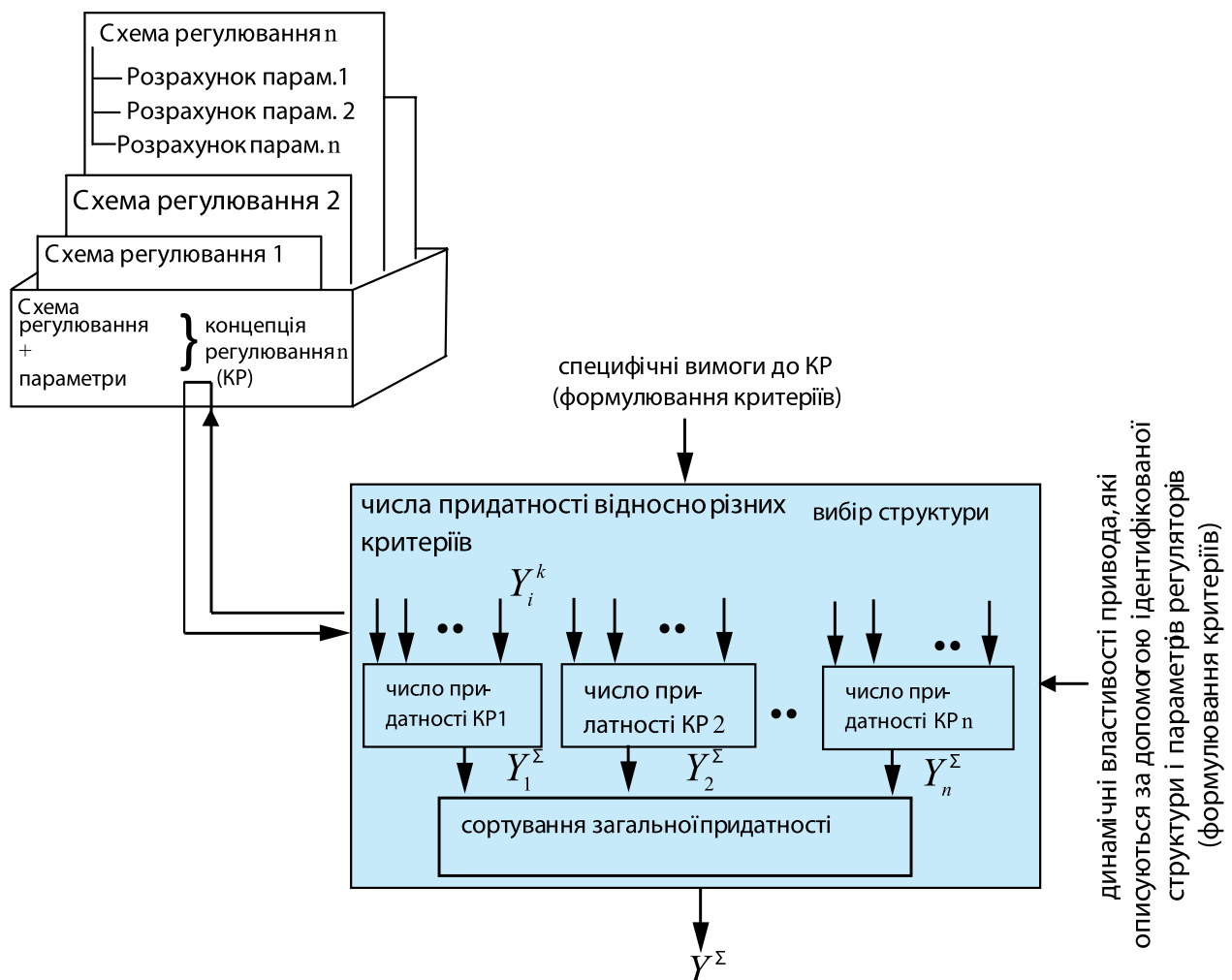


Рис. 1. Алгоритм автоматизованого вибору системи регулювання на основі нечіткої логіки

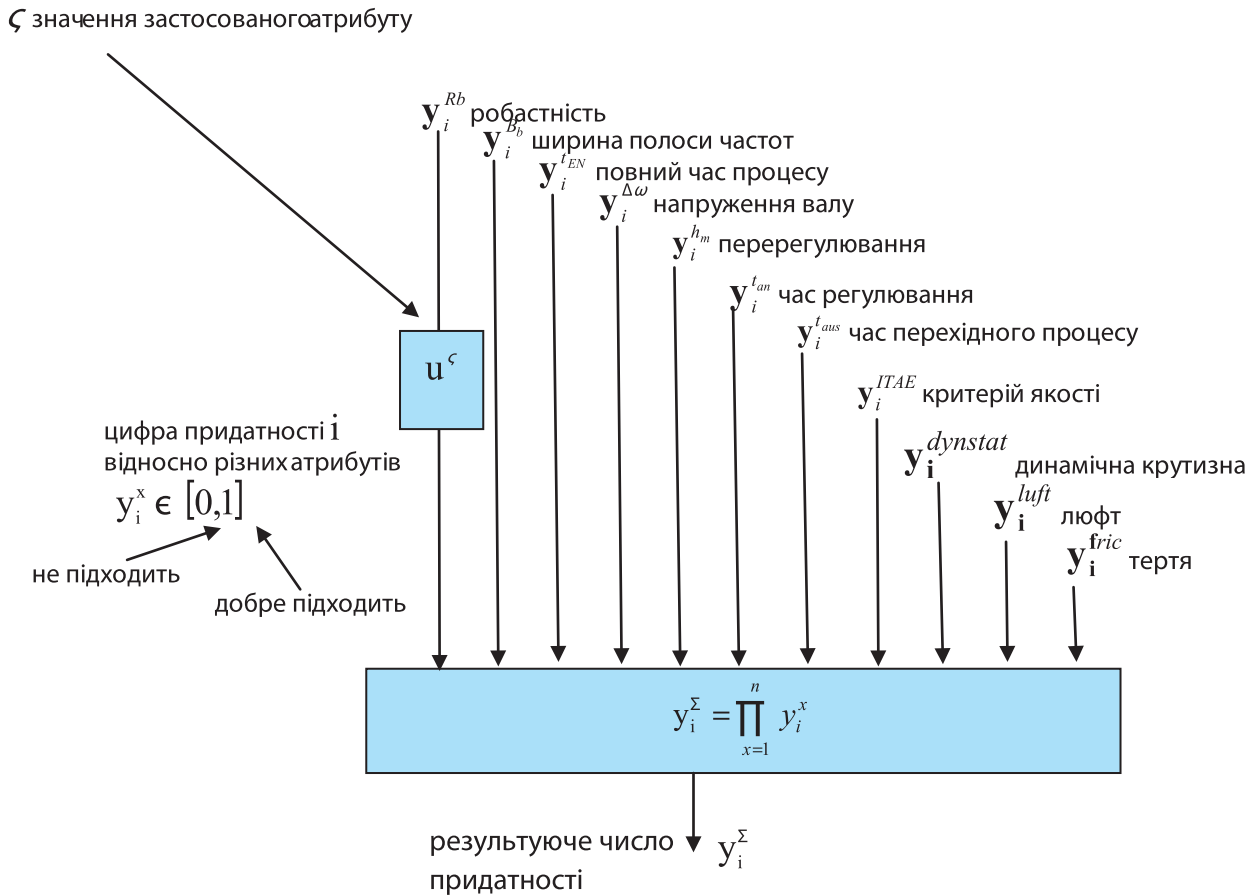


Рис.2. Схема логічного визначення придатності окремих елементів системи для визначення результуючої придатності всієї системи регулювання

ються тільки певні вибрані числа придатності. У випадку якщо системи регулювання, що розглядається, має окремі атрибут невідповідним ( $y_{f_i} = 0$ ), 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 незалежно від використаних атрибутів забезпечує однаково-постійний його вплив на загальну придатність, перед формуванням загального висновку формується атрибут ваги  $\xi$ , що множиться на число придатності  $y^{Rob}$ .

За результатами логічних виводів необхідно визначати максимальні вихідні значення  $T_{Bi}$  й  $T_{Fi} = 1/(2\pi f_{G1})$ .

Нечіткі множини й числа придатності формуються на підставі експериментальних і розрахункових досліджень різних схем регулюванні при зміні параметрів механічної системи й оцінюванні якості перехідного процесу за допомогою критеріїв якості [5].

### Визначення окремих чисел придатності

Основні результати якості регулювання за допомогою різних схем при зміні параметрів об'єкта регулювання представляються у вигляді матриці регуляторів, що містить основні елементи ( $\omega_e T_\Sigma, V_J$ ). При цьому реалізується наступний порядок: якщо позначити величини  $\omega_e T_\Sigma = x$  й  $V_J = y$ , тоді відповідно регульована величина  $t = z$  – визначається на

основі придатності схеми регулювання щодо окремих атрибутів. При цьому звертають особливу увагу на наступні моменти:

- значення величин, що використовуються для синтезу регулятора, обумовлюються визначенням параметрів і збереженням характеристик якості регулювання для різних схем регулювання в матриці регуляторів й, як правило, повинно відрізнятися вже стандартизованим і не стандартизованим видом (запис у матриці регулювання);

- принципово повинна існувати можливість привносити до даних, отриманим моделюванням також дані, отримані експериментальним шляхом. Так що, інформація наприклад, отримана після успішного приведення в дію системи регулювання може знову використатися при наступному виборі регулятора або буде корисною як уже існуюча експертна інформація;

- існує можливість урахувувати числа придатності не тільки для визначення схеми регулювання, але й для синтезу регуляторів.

Розрахунок числа придатності щодо нечутливості (єдина вже нормована величина регулювання) проводиться в порядку, представленому на рис 4. Насамперед, виходячи зі значень параметрів  $\omega_e T_\Sigma$  й  $V_J$ , записаних у матрицю регулювання, визначають значення  $y_{Xi}^{Rob}$ . Для точок ( $\omega_e T_\Sigma, V_J$ ), які не входять безпосередньо в матрицю як опорні, проводиться лінійна інтерполяція.

Щоб виразити довіру до схеми регулюван-

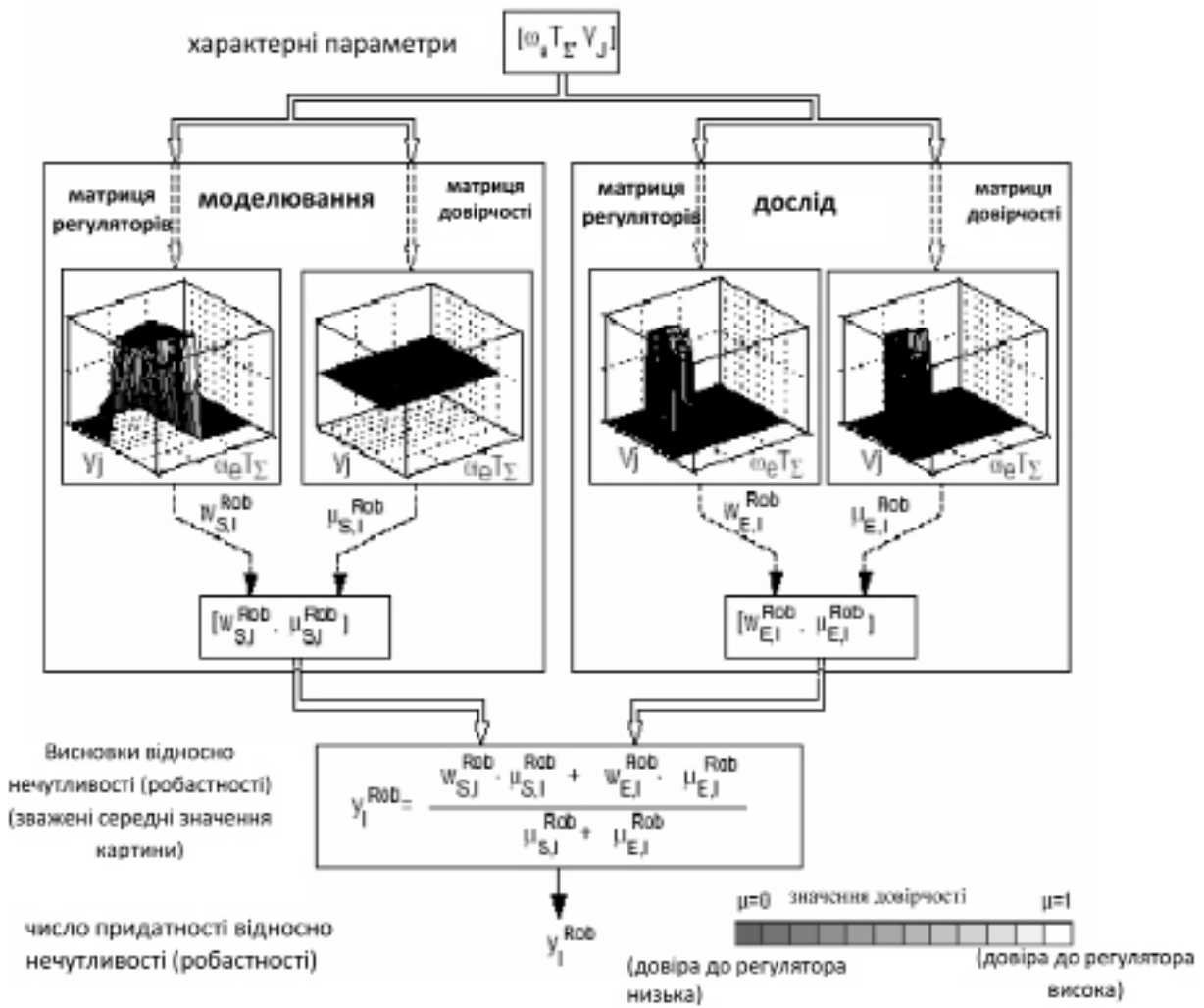


Рис. 3. Розрахунок числа придатності щодо нечутливості (робастності)

ня, використовують так зване значення довірчості  $\mu_{x,i}^{Rob}(\omega_e T_\Sigma V_j)$ . Воно показує довіру до відповідної схеми регулювання як високу ( $\mu = 1$ ) або незначну ( $\mu < 1$ ). Таким чином, кожна схема регулювання характеризується власним значенням схеми регулювання й відповідним значенням довірчості.

Для запису даних поряд з областю моделювання існує область експериментальних даних. Під час нового приведення в дію системи або введенні даних, отриманих на підставі досвіду експертів, необхідно інтегрувати графічну підтримку змін поверхні інформації в базу даних без модифікування інформації, отриманої моделюванням. Особливе значення тут має значення довірчості. Виходячи з того, що при моделюванні не виникало ніяких перешкод й у такий спосіб для всіх елементів матриці в області моделювання задають значення довірчості 1. У теж час, в області експерименту можна задавати опорне значення, наприклад, 1 якщо користувач упевнений, що досліджена схема регулювання досить нечутлива (робастна). У протилежності цьому, значення довірчості можна зменшити, якщо досліджена схема регулювання хоча й забезпечує одержання гарних результатів, однак користувач на основі недостатнього досвіду або тільки невеликого тестування повністю не довіряє отриманому результату.

Розрахункові значення числа придатності  $y_i^{Rob}$ , отримані при моделюванні, і в результаті проведення експерименту зважується усередненням (частковий висновок) (рис.3).

Всі інші атрибути, представлені на рис. 2, відрізняються від атрибута нечутливість наступними пунктами й тому повинні оброблятися модифіковано:

- поле ознак інших атрибутів містить нестандартизовані значення регулятора; оскільки принципово потрібно забезпечити нечутливість системи, тоді зважування й відповідно застосування інших атрибутів залежить від спеціальних вимог, сформованих користувачем і тому повинне бути вибірково вільно від користувача;

- хоча значення цих атрибутів також установлюються експериментально й могли б записуватися й використатися в межах бази знань, однак існує обмеження на значення, установлені теоретично й відповідно моделюванням. Це пояснюється тим, що з однієї сторони значення, установлені експериментально на основі всіляких величин перешкод повинні підкорятися сильній дисперсії, а для інших атрибутів, які описують характеристику збурення, без датчика на стороні вихідної ділянки механізму в найкращому разі використовують оціночні значення, отримані за допомогою спостерігача.



• порядок дій для атрибутів, представлених на **рис. 2**, пояснюється на прикладі атрибута ширини смуги частот. Враховуючи, що порядок дій для тертя й люфту значно відрізняються, тому вони будуть розглянуті окремо.

**Зважування атрибутів - установка спеціалізованих запитів**

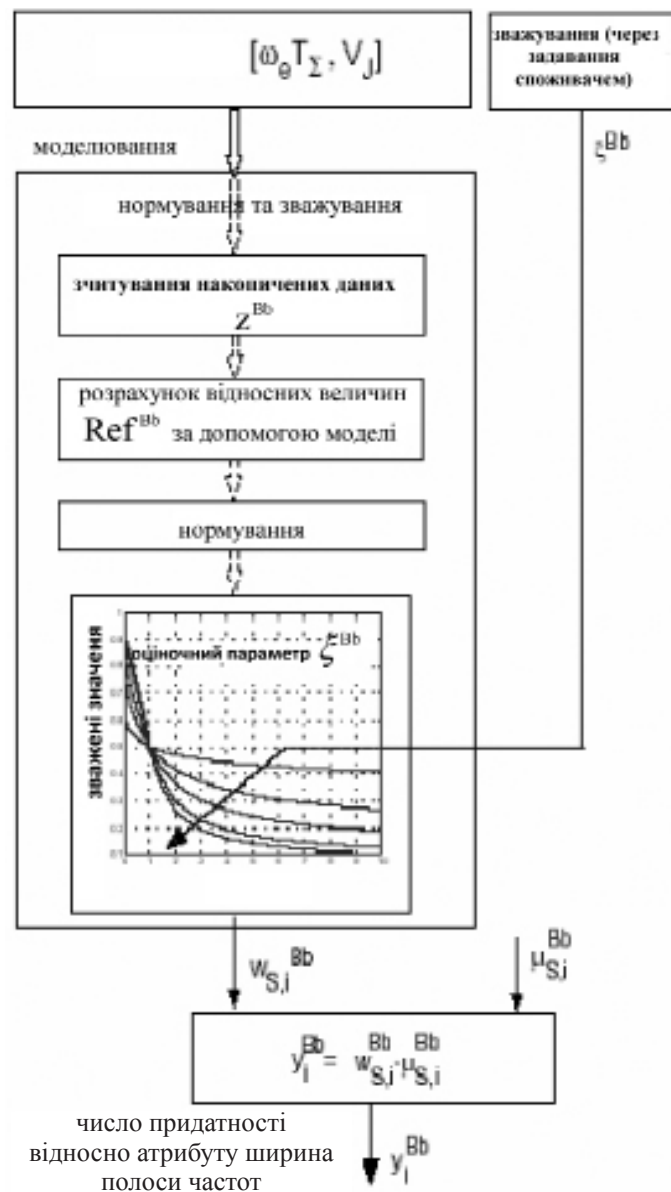
Порядок зважування атрибутів показаний на прикладі ширини смуги частот (Bb) представлений на **рис.4**. Для кожної схеми регулювання частоти обертання визначаються ознаки і формується матриця регуляторів. Насамперед, визначається абсолютне значення ширини смуги частот  $z^{Bb}$  в залежності від опорного значення, що для подальшого розрахунку відображається на інтервалі [0, 1].

Для різних параметрів, за допомогою вагової функції [6]  $w_{S,i}^{Bb}$  визначається відсортоване значення атрибута z. Зокрема для ширини частоти  $Re f^{Bb}$ , отриманих за допомогою моделі рекомендації, отримаємо

$$w_{S,i}^{Bb} = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} - arctg \left( 3 \cdot \zeta^{Bb} \cdot \lg \frac{Re f^{Bb}}{z^{Bb}} \right) \right)$$

Якщо відсортоване значення й значення рекомендації ідентичні, тоді стандартизоване значення регулювання  $w_{S,i}^{Bb}$  задається 0,5. При цьому крутість підйому функції зважування залежить від заданого користувачем атрибута зважування  $\zeta^{Bb}$ .

Якщо атрибут, наприклад, ширини діапазону користувачем розглядається як важливий ( $\xi \rightarrow 1$ ), то крутизна функції задається настільки великою, що малі зміни в діапазоні значень рекомендації призводять до явних відхилень змінних регулювання. В той же час, у випадку, коли ширина смуги частот розглядається як не дуже важлива ( $\zeta^{Bb} \rightarrow 0$ , тоді підйом крутизни  $\rightarrow 0$ ) майже не залежить від ширини смуги частот і значення регулювання задається приблизно 0,5. Це призводить до того, що результуюче число придатності  $y_i^{Bb}$  для всієї схеми регулювання залишається



**Рис.4.** Визначення чисел придатності ненормованих атрибутів (на прикладі ширини смуги частот)

ся приблизно однаковим й у такий спосіб незначно впливає на співвідношення всіх чисел придатності.

**Система рекомендації**

Як уже згадано, для аналізу нестандартизованих значень атрибутів необхідні значення рекомендацій, як формуються на основі оцінки перехідних характеристик за завданням і за збурюванням.

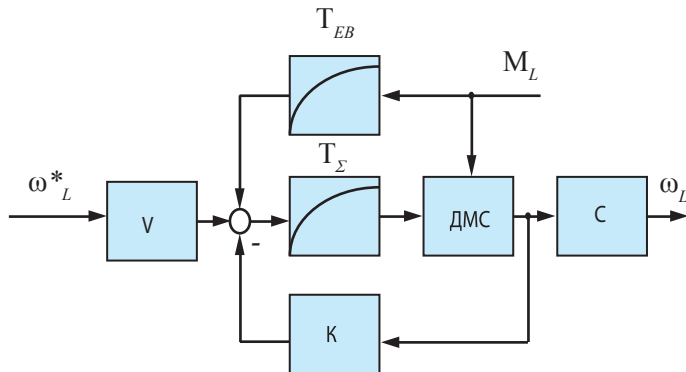


Рис.5. Схема формування сигналу рекомендації

Як рекомендація для всіх схем регулювання застосовується повний регулятор стану (рис.5). Для замкнутого контуру регулювання з регулятором стану полюси задаються таким чином, щоб передатна функція за завданням  $W_{Ref}(s) = \omega^*_L(s)$  відповідала передатній функції  $W_{Ref}(s) = 1/N_{Norm}(s)$  [ 5 ].

Для схеми регулювання ПРРЧО розраховується еквівалентна постійна часу  $T_E = \sqrt{\alpha^3} / \omega_0$ . Для наближеного врахування впливу спостерігачів і відповідно коректного відтворення моменту наван-

таження його значення вводяться через інерційну ланку з постійною часу.

**Врахування нелінійностей**

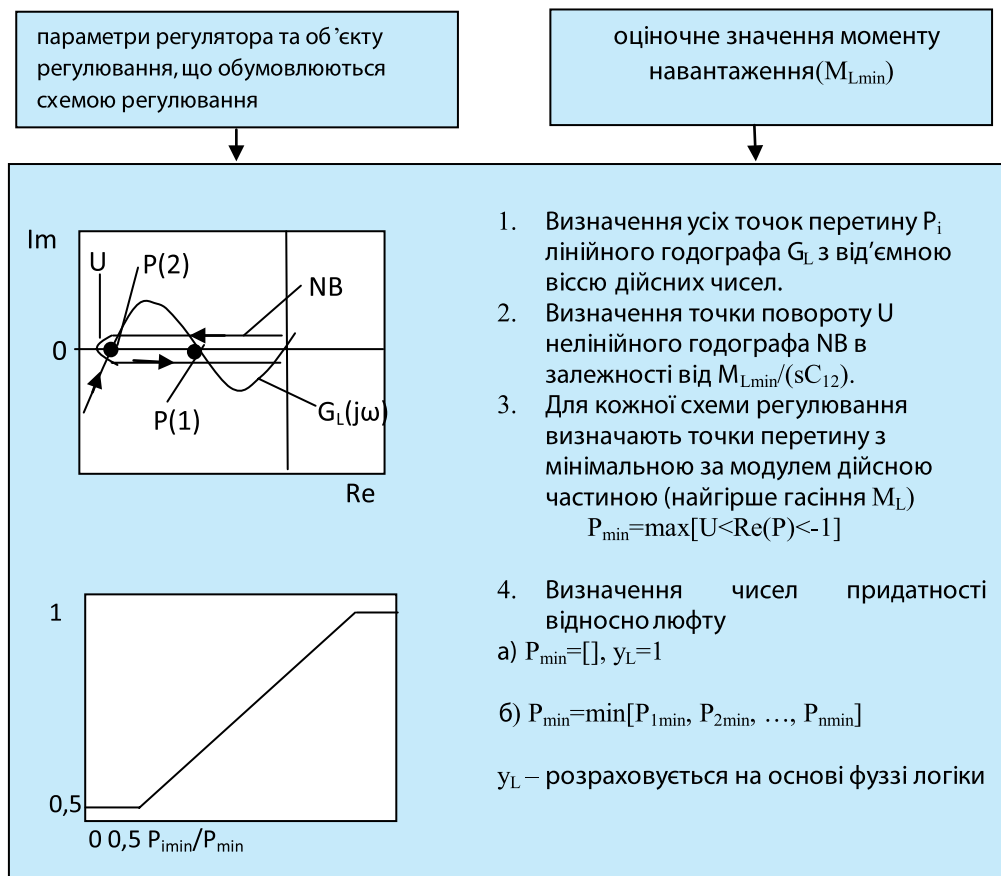
На відміну від інших параметрів об'єкта регулювання вплив нелінійностей, не можна записати у формі поверхні значень.

Тому для врахування нелінійностей люфту й тертя на стороні вихідної ділянки механізму при проведенні автоматизованого вибору регулятора обмежуються прогнозуванням можливих автоколивальних циклів. Для цього використовують метод гармонійного балансу [5].

У результаті розрахунок чисел придатності щодо люфту й/або тертя зводиться до порівняння різних схем регулювання. При цьому розраховується різновид «ймовірності» появи автоколивальних циклів. Якщо ймовірність їх виникнення є великою, тоді розглянута схема регулювання одержує дуже незначне число придатності. Таким чином, може вибиратися схема регулювання, що найкраще підходить, хоча це не гарантує відсутності автоколивальних циклів.

**Придатність щодо люфту**

Насамперед, для кожної схеми регулювання (СР) розраховуються годограф Найквіста лінійної системи (рис. 7), що базується на ідентифікованих параметрах об'єкта регулювання й установлених параметрах регулятора, будується графік негативної зворотної функції нелінійного опису (НІВ) і визначаються всі точки їх перетинання  $P_i^{10}$ . При



1. Визначення усіх точок перетину  $P_i$  лінійного годографа  $G_L$  з від'ємною віссю дійсних чисел.
2. Визначення точки повороту  $U$  нелінійного годографа  $NB$  в залежності від  $M_{Lmin}/(sC_{12})$ .
3. Для кожної схеми регулювання визначають точки перетину з мінімальною за модулем дійсною частиною (найгірше гасіння  $M_L$ )  
 $P_{min} = \max[U < \text{Re}(P) < -1]$
4. Визначення чисел придатності відносно люфту  
 а)  $P_{min} = [], y_L = 1$   
 б)  $P_{min} = \min[P_{1min}, P_{2min}, \dots, P_{nmin}]$   
 $y_L$  – розраховується на основі фuzzi логіки

Рис.6. Визначення придатності схеми регулювання щодо люфту

Параметри й відповідно критерії для структур регуляторів, а також для моделі рекомендації

Вид схеми	Загальні критерії			Регулювання за заданням				Регулювання за збуренням		
	$f, \Gamma$	$T_{E_{0,MC}}$	$W_{\Delta \omega_2} / W_{\Delta \omega_{Ref}}$	$h_{nr}, \%$	$t_{auss}, MC$	$t_{nr}, MC$	$W_{ITAE} / W_{ITAE,Ref}$	Сдин, Нм/градий	$t_{nr}, MC$	$W_{ITAE} / W_{ITAE,Ref}$
Модель	16,5	24	1	6,2	51	35,9	1	1,36	81,7	1
ПРС2.0	14,7	25,8	1,24	15,2	88,9	37,3	1,95	1,34	95,7	1,72
ПРЕМО2.0	15,17	24,9	1,23	14,6	91,8	35,9	1,90	1,24	100	1,54
ПРРЧО2.0	11	38,9	0,46	6,8	76,9	55,8	2,62	1,3	106	1,35
ПЧС2.0	16	27,8	1,47	14,9	105	37,8	2,4	1,27	126	1,79
ПССРЧ2.0	8,2	48,3	0,2	1,5	71,8	83,9	3,6	1,23	106,6	1,91

Таблиця 2

Числа придатності різноманітних структур регуляторів для досліджуваного механічного приводу:  $N_G = 23$  бит/об (П - прогноз, М - отримані з вимірів)

Вид схеми	$y^{\Sigma} / y^{\Sigma}_{\#1}$		$y^{Rob} / y^{Rob}_{\#1}$		$Yb / y^{bB}_{\#1}$		$y^{ITAE} / y^{ITAE}_{\#1}$		$y^{ITAE(F)} / y^{ITAE(F)}_{\#1}$		$y^{dyn} / y^{dyn}_{\#1}$	
	П	М	П	М	П	М	П	М	П	М	П	М
ПРС2.0	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1
ПРЕМО2.0	0,63	1,18	1,02	-	0,85	1,03	0,87	1,02	0,93	1,11	0,86	0,93
ПРРЧО2.0	0,53	0,79	1,02	-	0,78	0,77	0,5	0,79	1,17	1,25	1,09	0,97
ПЧС2.0	0,5	0,91	1,02	-	1	1,08	0,55	0,84	0,78	0,97	1,06	0,95
ПССРЧ2.0	0,11	0,34	1,02	-	0,52	0,58	0,34	0,63	0,59	0,91	0,97	0,93

цьому точка повороту  $U$  залежить від мінімального, стаціонарного моменту  $M_{Lmin}$  й повинна вказувати користувачеві можливість розгляду  $M_{Lmin}$  для «гіршого випадку». У іншому випадку виходять зі співвідношення  $M_{Lmin} = 0$ .

Для всіх схем регулювання із значень  $P_i^{min} \in \{P_1^{min}, P_2^{min}, \dots, P_n^{min}\}$  екстрагують приблизно «некритичний» цикл автоколивань  $Pmin$  і за допомогою на функцій приналежності в діапазоні між 0 й 0,8 будують  $P_i^{min} / P^{min}$  (рис.7). У результаті значення функції приналежності інтерпретуються як придатність розглянутої схеми регулювання щодо люфту.

Якщо не існує ніякої точки перетинання, то число придатності приймається 1, що означає необмежену придатність схеми регулювання при наявності люфту.

**Придатність схеми при наявності нелінійно-го тертя**

Принципово порядок дій при розрахунку придатності щодо тертя близький до порядку, що використовується для люфту. Зрозуміло, функцію, що описує тертя, визначати значно важче, оскільки вона залежить не тільки від робочої точки, що зада-

ється, але й від характеристики лінії тертя й відповідно її апроксимації. Тому працюють із узагальненими характеристиками нелінійного тертя [5].

Як вже відмічено, за допомогою визначення придатності при терті на стороні вихідної ділянки механізму не можна гарантувати, що не можуть виникнути цикли автоколивань. Шляхом порівняння схем регулювання, вибирається схема регулювання, що з високою ймовірністю в стаціонарному режимі викликає самі незначні перешкоди. Автоколивальних циклів повністю уникають відповідними заходами, які, як правило, реалізуються, за рахунок підтримки в регуляторі постійної стаціонарної точності вихідний сигнал інтегратора[5].

**Практичні результати**

При проведенні досліджень запропонованої системи автоматичного вибору схеми регулювання були сформульовані такі основні вимоги до схеми регулюванню числа обертів:

- гарна характеристика за завданням і за збуренням (загальна вимога),
- гарна характеристика регулювання за збуренням: швидке відрегулювання впливу величини збурення, і, по можливості, більш висока жор-

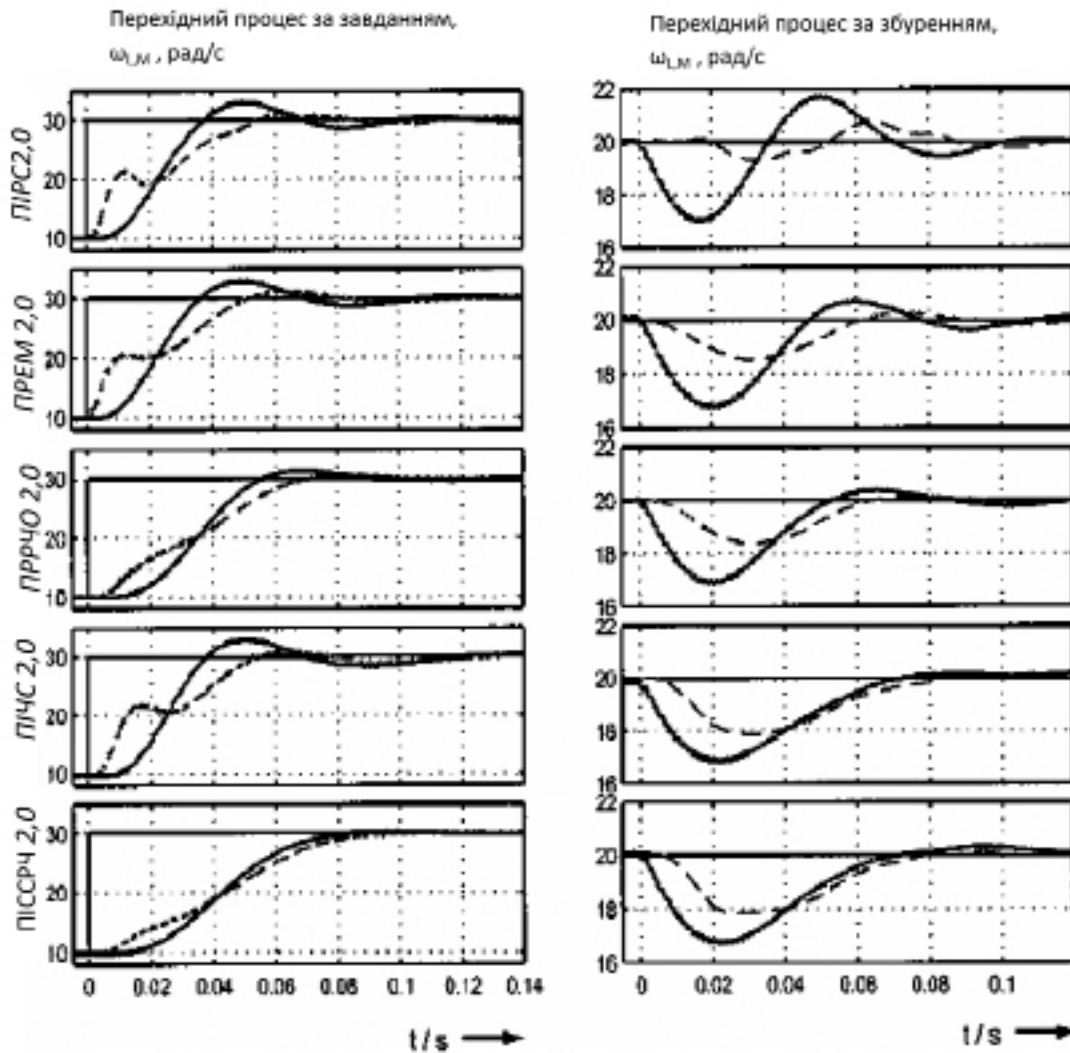


Рис. 7. Перехідні характеристики регулювання числа обертів для різних схем регулювання

сткість системи регулювання (наприклад, рівномірне регулювання переміщення) або незначне навантаження пружної муфти (у випадку неширокого діапазону смуги частот) і необхідність швидкого регулювання величини, що задається, у поєднанні з гарною характеристикою збурення, урахується попередньо визначається певними окремими вимогами (задається профіль регулювання (ЗПР)) і попередньо приймаються початкові значення зважування параметрів.

Як правило, використовують декілька атрибутів без зважування ( $\xi=1$ ). Одночасне використання всіх атрибутів не тільки ускладнює оцінку результату, а крім того, може частково спотворити одержуваний результат. Наприклад, такі атрибути як ширина смуги частот системи регулювання, еквівалентна постійна часу й час перехідного процесу в замкнутому контурі регулювання числа обертів на основі їхньої надмірності навіть можуть призводити не тільки до перекошування інтерпретація результатів, але й до переоцінки бажаних властивостей.

Дослідження запропонованої системи автоматизованого вибору схеми регулювання проводилося для електромеханічної системи, що складається із приводного синхронного двигуна із час-

тотним перетворювачем, механізму навантаження у вид машини постійного струму з регульованим випрямлячем і муфти пружного зв'язку. Співвідношення моментів інерції двигуна й навантаження складо  $V_e = 1,1$  власна частота механічної системи  $f_e = 22,5$  Гц й  $f_e = 73$  Гц. Сумарна постійна часу  $T_\Sigma$  змінюється в залежності від граничної частоти фільтра  $T_{FI}$ .

Дослідження за допомогою представленої системи автоматизованого вибору системи регулювання частоти обертання показали, що для представленої механічної системи найкращу якість регулювання забезпечує схема регулювання з ПІ-регулятором стану (ПРС). Для кількісного порівняння, у таб. 1 для кожної зі схем регулювання представлені характеристики якості регулювання. Приймаючи схему регулювання (ПРС) за базову, для кожної із зазначених схем розраховані стандартизовані числа придатності (таб. 2).

Перехідні характеристики за завданням і за збурюванням для усіх схем регулювання (при заданні коефіцієнту затухання коливань  $\alpha=2,0$ ), що отримані шляхом моделювання, показані на рис. 7.

Аналіз кривих показав, що із зменшенням числа придатності схеми регулювання перехідний процес загасає чітко повільніше. Для основних параметрів



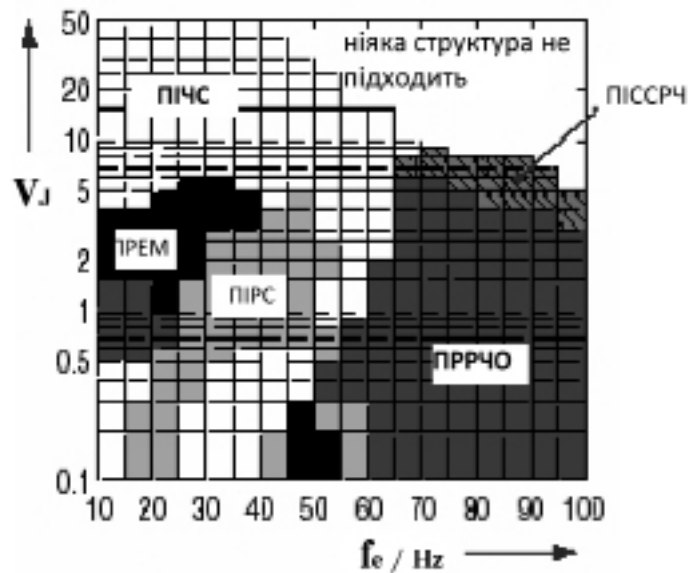


Рис.8. Поле придатності схем регулювання, побудоване на площині  $f_e \sim V_j$  в сполученні з вимогою  $y^{Rob} > 0,8$  і  $N_{ам} = 23$

механічної системи проведено порівняння різних схем регулювання, визначена загальна придатність кожної із схем і нанесені на площину  $f_e \sim V_j$ . В результаті сформована матриця, схем регулювання і на площині  $f_e \sim V_j$  чітко виражені області застосування окремих структур регулювання (рис. 8).

При аналізі рис. 9 потрібно звернути увагу на наступні моменти:

- оскільки список сформований на співвідношенні всіх чисел придатності, тому для схеми регулювання, що найкраще підходить, умова  $y^{Rob} > 0$  і  $y^{Bb} > 0$  виконується навіть тоді, коли вона на основі дуже малих абсолютних значень величин чисел придатності ледь задовольняє поставленим вимогам. Щоб запобігати такому вибору для забезпечення достатньої нечутливості схеми регулювання необхідно вводити додаткову умову  $y^{Rob} > 0,8$ ,

- існують випадки, коли розходження всіх чисел придатності двох або декількох схем регулювання є дуже незначними. Це призводить до того, що утворюються кластери, які не відрізняються числами придатності (рис.8). Таким чином відбувається часткове накладення полів придатності для різних схем.

В результаті можна зробити висновок, що для механічних систем із власними частотами в діапазоні до 50-60 Гц доцільно використати схеми регулювання ПІРС, ПІЧС і ПРМО, які в порівнянні з ПІ регуляторами стану відрізняються більшою шириною смуги частот. Починаючи з  $V_j \approx 5$  до застосування рекомендується схема регулювання ПРМО, що має більшу нечутливість (робастність) до зміни параметрів.

### ВИСНОВКИ

Застосування системи автоматизованого вибору системи регулювання частоти обертання й положення електроприводів з коливальною механікою разом з методами визначення механічних й електричних параметрів дозволяє на основі методів не-

чіткої логіки створити сучасні інтелектуальні електромеханічні системи, що відрізняються малими габаритами, низькою енергоємністю й високою надійністю.

### 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. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовський Г.Г., Рюмишин Н.А. Системы функции управления. - Київ, Техніка, 1997.- 206 с.