

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ І РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Подана класифікація структур електроприводів сільськогосподарських машин. Для визначених класів запропоновані алгоритми і аналітичні залежності для обчислення оптимальних параметрів і раціональних режимів роботи. Вироблені рекомендації щодо застосування різних законів регулювання залежно від технологічних вимог до якості регулювання. Подані результати виробничих випробувань створених систем оптимізації режимів роботи сільськогосподарських машин.

Майже 55 % від загальної кількості електроприводів, що використовуються у сільськогосподарському виробництві, працюють у постійних динамічних режимах, зумовлених випадковими або різкозмінними навантаженнями. При таких режимах роботи строки служби електродвигунів у 7-10 разів менші від нормативних, зменшується на 30-40 % продуктивність робочих машин, зростають втрати при електромеханічному перетворенні електроенергії, електромісткість процесів виробництва і переробки сільськогосподарської продукції. Для підвищення техніко-економічних показників електроприводу, поліпшення якості переробки продукції необхідно зменшувати рівень динамічного навантаження системи: робоча машина-електропривід. На стадії проектування і експлуатації електроприводу є два шляхи зменшення динамічного навантаження: розрахунок та вибір параметрів електроприводу і створення та реалізація замкнутих систем регулювання режимами роботи. Перший не дуже ефективний у зв'язку з обмеженнями, що накладаються на махові маси електроприводу, і обмеженим вибором асинхронних електродвигунів за жорсткістю їх механічної характеристики. Другий шлях, хоч і має широкі можливості підвищення техніко-економічних показників електроприводів, потребує додаткових капітальних вкладень і може бути прийнятий до реалізації на основі оптимізаційних обчислень. Однією із складових таких обчислень є залежність якості регулювання процесу (завантаження, дозування, подрібнення та ін.) від реалізованих законів регулювання, параметрів регуляторів і електроприводу, статистичних характеристик збурень, що надходять до системи. Встановлення таких залежностей дозволяє оцінити можливості замкнених систем електроприводу, їх техніко-економічні показники та визначити доцільність реалізації певної схеми регулювання. Для електроприводів на базі електродвигунів постійного струму такі залежності встановлені і широко використовуються на практиці [1,2]. Для електроприводів на базі електродвигунів змінного струму у зв'язку із значними нелінійностями як каналів регулювання, так і взаємозв'язків між змінними електродвигуна, при випадкових і різкозмінних навантаженнях залежності для інженерних оцінок якості регулювання струму, ковзання електродвигуна, продуктивності робочої машини досі не визначені. Методика розв'язання цієї задачі передбачає встановлення динамічних характеристик (передавальних функцій) об'єктів регулювання за різними каналами (момент опору робочої машини – струм, ковзання, момент електродвигуна; подання продукції – дисперсія продуктивності робочої машини в потоці); подання навантаження до систем регулювання як ймовірносних математичних моделей; розв'язання варіаційної задачі, результатом якої є оптимальний оператор замкнутої системи керування при мінімумі дисперсії вихідної величини регулювання.

Дослідження навантаження сільськогосподарських машин показує, що реалізації потужності, струму електродвигуна, продуктивності робочої машини як випадкові функції стаціонарні у широкому і вузькому розумінні. Обробка вказаних реалізацій за допомогою методів випадкових функцій [3] дозволила отримати ймовірносні

характеристики навантаження (математичне очікування; дисперсії і коефіцієнти варіації струму і продуктивності), визначити види спектрів і оцінити їх характеристики (коефіцієнт згасання кореляційного зв'язку і переважну частоту коливань випадкового процесу навантаження) (Табл.1).

Аналіз спектрів навантаження дозволив поділити робочі машини на чотири основні класи відповідно до типів спектрів: постійний, експоненційний, експоненційно-косинусний і поєднання у різних сполученнях названих спектрів.

Результати досліджень: ймовірнісні характеристики, види і характеристики спектрів навантаження кваліфікуються як ймовірнісні моделі навантаження сільськогосподарських машин.

Таке узагальнення дозволяє аналізувати і синтезувати структури електроприводів не для деяких робочих машин, а для певних класів, які визначаються за видом спектрів навантаження.

Дослідження показують, що електроприводи робочих машин за видами передавальних функцій на каналах: момент опору – струм навантаження, момент опору – дисперсія продуктивності робочої машини - можна поділити на чотири основні класи: аперіодичні ланки, аперіодичні із запізненням, коливальні ланки, дві послідовно з'єднані аперіодичні ланки із запізненням. Математичні вирази для передавальної функції цих ланок відповідно виглядають так:

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{K_1}{T_m p + 1}; & W_2(p) &= \frac{K_2}{T_m T p^2 + T p + 1}; \\ W_3(p) &= \frac{K_3}{T_m p + 1} e^{-p\tau_3}; & W_4(p) &= \frac{K_3}{T_1 p + 1} \frac{K_4}{T_2 p + 1} e^{-p\tau_3}, \end{aligned} \quad (5)$$

де T , T_m – електромагнітна постійна часу електродвигуна і електромеханічна постійна часу електроприводу, с;

K_1, K_2, K_3, K_4 – коефіцієнти підсилення на каналах регулювання;

τ_3 – час запізнення, с.

Аналіз структурних схем електроприводів сільськогосподарських машин як реалізованих на практиці, так і потенціально можливих показує, що за типами структур і місцем прикладання випадкових збурень їх можна поділити на п'ять основних класів (табл. 2). Перший – це нерегульовані електроприводи, в яких вхід – момент опору робочої машини ($M_c(p)$), а вихід – ковзання, струм, момент електродвигуна ($s(p)$, $I(p)$, $M(p)$). Другий клас – системи стабілізації навантаження сільськогосподарських машин. За входом керування задається рівень навантаження (Q_3), а збурення надходять каналом навантаження із спектром $G_m(\omega)$, заданим за таблицею 1. Третій клас – електроприводи поточкових ліній, у яких випадкові збурення надходять як каналом керування ($G_1(p)$) від ведучого електроприводу, так і каналом навантаження ($G_m(\omega)$). Перші повинні відтворюватися на виході, а другі – згладжуватися. Четвертий клас - це одно- і двоконтурні системи стабілізації з об'єктами із запізненням (τ_3) і вхідним збуренням при навантаженні $G(\omega)$. П'ятий клас характерний для деяких робочих машин з двостадійним циклом переробки продукції, наприклад, пастоприготовлювачі, що мають передавальну функцію двох послідовно з'єднаних аперіодичних ланок із запізненням (5).

Таблиця 1

Узагальнені ймовірнісні моделі навантаження і класифікація за ними сільськогосподарських машин

Вид спектральної щільності функції навантаження	Модель спектральної щільності	Типи робочих машин	Межі зміни ймовірнісних характеристик		Межі зміни спектральних характеристик	
			D_1 А ²	v_1 В.О.	α_1/α_2 с ⁻¹	β_1/β_2 рад.с ⁻¹
Постійний спектр	$G_1(\omega) = \text{const}$ (1)	РК-50, ДК-2, ДС-15, ИГК-30Б, ИРТ-Ф-80, Волгар-5, ТРЛ-100А	0,08-457	0,08-0,5	-	-
Експоненціальний спектр	$G_1(\omega) = \frac{v_1^2}{\pi} \frac{\alpha}{\omega^2 + \alpha^2}$ (2)	КДМ-2, ДКМ-5, ИГК-50	0,1-225	0,14-0,4	0,9-2,2	-
Експоненціально-косинусний спектр	$G_1(\omega) = \frac{\alpha v_1^2}{\pi} \frac{\omega^2 + \alpha^2 + \beta^2}{(\omega^2 - \alpha^2 - \beta^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}$ (3)	ИС-30, ИСК-3А, С-12А, ИКС-5М, ИКМ-Ф-10, Ф-1М, ДЗ-Ф-2, ОГК-3, РКР-2, ЗБ-50	0,15-500	0,1-0,95	0,5-1,1	1,0-3,4
Сума експоненціально-косинусних спектрів	$G_1(\omega) = \sum_{j=0}^n \frac{v_{1j}^2 \alpha_j}{n} \frac{(\omega^2 + \alpha_j^2 + \beta_j^2)}{(\omega^2 - \alpha_j^2 - \beta_j^2)^2 + 4\alpha_j^2 \omega^2}$ (4)	КПК-1,5, ДК-10, КСП-Ф-08, ТЗБ-30, ИКС-5, РСС-6Б, ДБ-5, КИР-1, УВУ-Ф-230	0,02-890	0,06-0,7	$\frac{0,1-0,7}{0,06-0,73}$	$\frac{0,2-2,0}{1,5-5,5}$

$D_1(v_1^2)$ – дисперсія; α і β - коефіцієнт згасання кореляційного зв'язку і переважна частота коливань випадкового процесу навантаження.

Для знаходження оптимальної структури будь-якого із поданих класів електроприводів (табл.2) при збуреннях будь-якого виду за спекторами (табл.1), необхідно розв'язати варіаційну задачу мінімізації функціоналу:

$$J_1(k) = J(k) + \lambda N(k), \tag{6}$$

де

$$J(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(\tau) d\tau \int_{-\infty}^{\infty} R_1(\tau - \theta) \chi(\theta) d\theta - 2 \int_{-\infty}^{\infty} k(\tau) d(\tau) \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} R_1(\tau - \theta) \chi(\theta) d\theta + \int_0^{\infty} k(\tau) d\tau \int_0^{\infty} [R_1(\tau - \theta) + R_m^*(\tau - \theta)] k(\theta) d\theta + \\ + R_m^*(0) - 2 \int_0^{\infty} R_m^*(\tau) k(\tau) d\tau;$$

λ - множник Лагранжа;

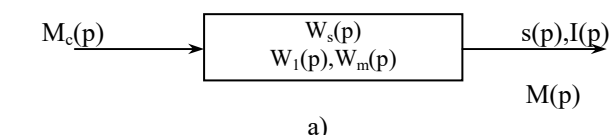
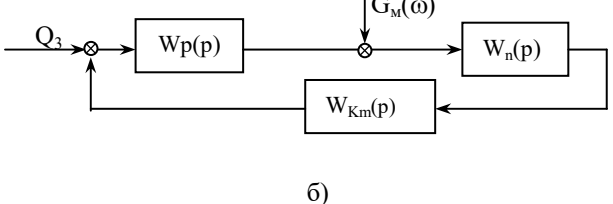
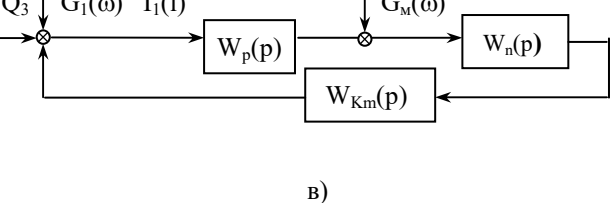
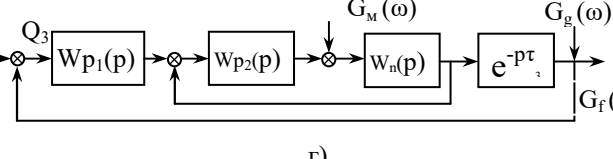
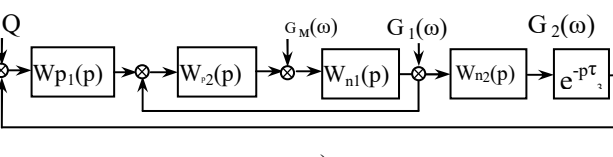
$$N(k) = \sum_{i=0}^n \int_0^{\infty} \left[\frac{d^i k(t)}{dt^i} \right]^2 dt - \text{функціонал складності};$$

$$R_m^* = \int_0^{\infty} W_n(\sigma) d\sigma \int_0^{\infty} R_m(\tau + \sigma - \theta) W_n(\theta) d\theta - \text{кореляційна функція навантаження } R_m(\tau),$$

подана до входу системи через її незмінну частину з імпульсною функцією $W_n(\tau)$; $\chi(\tau)$, $k(\tau)$ - імпульсна перехідна функція ідеальної і оптимальної замкнутих САР, $R_1(\tau)$ - кореляційна функція сигналу керування.

Таблиця 2

Класифікація схем електроприводів сільськогосподарських машин і механізмів

Назва робочих машин	Тип електропривода, назва процесу управління	Структурні схеми електропривода Рис. 1
Всі електрифіковані машини с/г виробництва	Нерегульовані	 <p style="text-align: center;">а)</p>
Дробарки, подрібнювачі, гранулятори, транспортери, машини для очищення зерна, роздавачі кормів, змішувачі	Регульований. Керування процесами завантаження	 <p style="text-align: center;">б)</p>
Машини поточних ліній очищення зерна, кормоприготування на свинарських фермах і фермах ВРХ	Регульований. Стабілізація процесів завантаження, відтворення сигналу з ведучого електроприводу	 <p style="text-align: center;">в)</p>
Шнекові дозатори кормів, транспортери, дозатори соковитих кормів, с/г машини із транспортним запізненням	Регульований. Стабілізація процесів завантаження, керування процесами дозування	 <p style="text-align: center;">г)</p>
Дозатори-нагромаджувачі грубих і соковитих кормів, концкормів, пастопріготовлювачі.	Регульований. Керування процесами дозування за заданими програмами	 <p style="text-align: center;">д)</p>

Умова мінімуму функціоналу (6) згідно з [4] виглядає:

$$\lambda \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{d^{2i} k(\tau)}{d\tau^{2i}} + \int_0^{\infty} [R_1(\tau - \theta) + R_m^*(\tau - \theta)] k(\theta) d\theta =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} R_1(\tau - \theta) \chi(\theta) d\theta + R_m^*(\tau) \quad (7)$$

При відсутності збурень на каналі навантаження або керування у виразах (6) і (7) вважається $R_m(\tau)$ або $R_1(\tau)$ дорівнює нулеві. Вираз для імпульсивної передавальної функції незмінної частини електроприводу (електродвигун - робоча машина) перебуває в залежності від виду її передавальної функції (5) за відомими виразами теорії автоматичного керування.

У результаті розв'язання варіаційної задачі мінімізації функціоналу (6) для найбільш загальної структури електроприводу (рис. 1г) при двох входах і спектральній щільності збурення керівного сигналу виду (3) і збурення за навантаженням у вигляді (1) отримано вирази для оцінки оптимальної імпульсної функції оператора замкнутої системи електроприводу і значення дисперсії вихідної величини при реалізації цього оператора:

$$k(\tau) = \sum_{i=1}^4 B_i e^{-p_i \tau}; \quad (8)$$

$$D_{\mathcal{E}} = D_1 - \sum_{i=1}^4 \frac{B_i e^{-\alpha \tau_3}}{(\alpha - p_i)^2 + \beta^2} [(\alpha c - p_i c - \beta S) \cos \beta \tau_3 - (\alpha S - p_i S - \beta c) \sin \beta \tau_3] + \lambda \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 \frac{B_j B_i}{p_i + p_j} \quad (9)$$

де B_i, C, S - коефіцієнти, що є функціями $T_1, T_2, \tau_3, \alpha, \beta$; p_i - корені рівняння чисельника спектральної щільності загального випадкового збурення, прикладеного до входу системи на каналі керування. Ця щільність складається з щільності випадкового коливання сигналу керування і поданої до цього входу спектральної щільності навантаження з урахуванням величини коефіцієнта Лагранжа.

Для схеми рис. 1в у формулах (8) і (9) $i=3$, а для схеми рис. 1б $R_1(\tau) = 0$.

При спектрах сигналу керування відмінного від виразу (3) у виразах (8) і (9) необхідно прирівняти відсутні змінні до нуля. Наприклад, при спектрі виду (2) вважаємо, що $\beta=0$.

Передавальна функція оптимального регулятора визначається з виразу:

$$W_p(p) = \frac{W(p)}{1 - W_n(p)W(p)}, \quad (10)$$

де $W(p)$ – передавальна функція оптимального оператора замкнутої системи регулювання, імпульсна функція якої визначається виразом (8);

$W_n(p)$ - передавальна функція незмінної частини електроприводу.

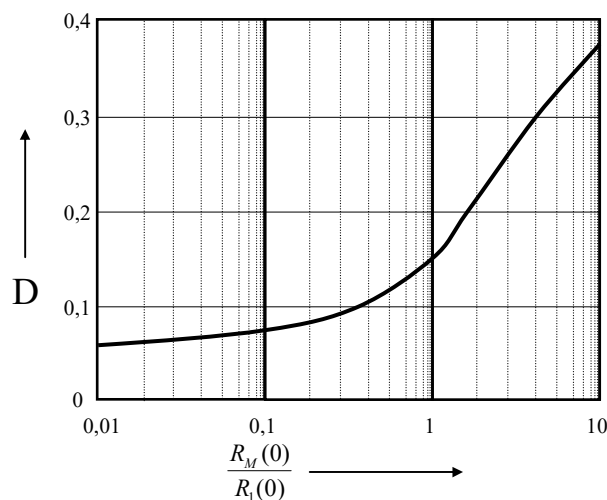


Рис. 2. Залежність похибки регулювання від співвідношення шум/сигнал D_M/D_1 при $D_1=1, \alpha_1=0.5, \beta_1=1.0$.

Похибка регулювання у схемах типу рис.1б залежить від співвідношення дисперсій збурень за навантаженням і сигналом керування (рис.2) і чим вище це співвідношення, тим більша дисперсія вихідної величини. Як бачимо з рисунка збільшення цього співвідношення навіть у 100 разів до збільшує дисперсію у 3 рази, що свідчить про високі регульовані якості оптимального контура.

Похибка регулювання об'єктів із запізненням (рис.1г і д) залежить від величини дисперсії тієї частини випадкових збурень, у яких напівперіод коливань менший за час запізнення. У цьому випадку системою регулювання корегується тільки та частина

збурень навантаження, напівперіод яких перевищує час запізнення. Частина збурень, у яких напівперіоди менші за час запізнення, надходячи до входу системи, змушують останню виконувати компенсаційні рухи, однак вони прикладатимуться не до тієї частини приводу, де виникли відхилення, а зсунуться на величину запізнення. Це призводить до похибки, що складається з дисперсії низькочастотних збурень на виході і похибки в результаті некоректних компенсаційних рухів системи регулювання.

Дослідження показують, що коли електромеханічна постійна часу електроприводу незначна ($T_m \leq 1c$), то агро- та зоотехнічні вимоги до величини дисперсії вихідних змінних електроприводу (струм електродвигуна, продуктивність робочої машини) задовольняються одноконтурними схемами регулювання. В іншому випадку необхідно переходити до двоконтурних схем регулювання виду рис. 1г, д. На рис.3 подана залежність зміни якості регулювання від статистичних характеристик навантаження при переході від одно- до двоконтурних САР електроприводом. Як бачимо, якість регулювання при двоконтурних схемах у 3-7 разів вища від зменшення дисперсії вихідної величини.

Слід пам'ятати, що реалізація оптимальних контурів регулювання (8) і регуляторів (10) дозволяє отримати системи, що дають незначну похибку регулювання, яка визначається виразом (9). Однак у багатьох випадках у сільськогосподарській практиці вимоги до обмеження дисперсії вихідних величин електропривода невисокі.

Так, наприклад, для дозаторів кормів коефіцієнт варіації дозування не повинен перевищувати 15 %. При таких вимогах недоцільно застосовувати складні закони регулювання (10), що визначаються оптимальним оператором (8). У таких випадках визначають оптимальний регулятор за (10) і будують його амплітудно-частотну характеристику (АЧХ). Використовують для установки серійний регулятор типу П, ПІ, ПІД – і підбирають таким чином параметри настроювання, щоб його АЧХ приблизно відповідала АЧХ оптимального регулятора. Здебільшого таке рішення задовільняє вимогам якості регулювання.

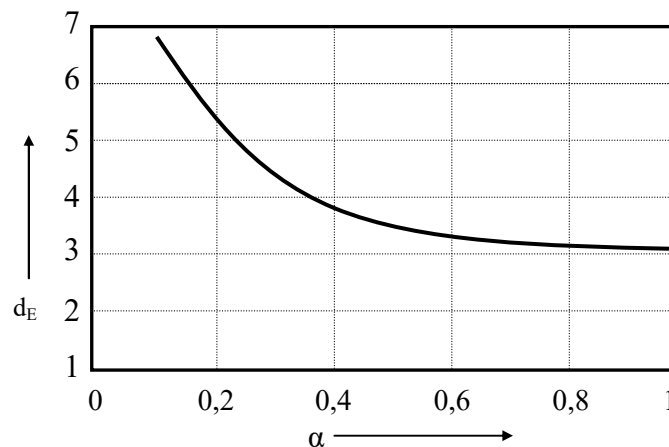


Рис. 3. Зміна відношення дисперсій вихідних величин ($dε$) при одноконтурній ($Dε_1$) і двоконтурній ($Dε_2$) САР від статистичних характеристик навантаження ($dε = Dε_1/Dε_2$).

Для апробації одержаних алгоритмів і аналітичних виразів за їх допомогою обґрунтовані оптимальні параметри і раціональні режими роботи електроприводів безрешіткових дробарок, дозаторів грубих кормів і пастопріготовлювачів. Вказані робочі машини і електроприводи є типопредставниками класифікацій як за структурами (табл.2), так і за видом спектральної щільності випадкової функції навантаження (табл.1). Визначивши за виразами (8) і (10) передавальні функції

регуляторів, їх АЧХ відтворювалися АЧХ пропорційного регулятора для безрешіткової дробарки ДМБ-5, ПИ-регулятора для дозатора ПЗМ-1,5 і пастоприготовлювача ПП-Ф-5.

Виробнича перевірка виявила, що системи регулювання забезпечують: для безрешіткової дробарки підвищення продуктивності праці у 2 рази і продуктивності машин на 20 %, зменшення питомої енергомісткості на 19,5 %, поліпшення якості дроблення зернофуражу; для дозаторів грубих кормів зменшення коефіцієнта варіації дозування у 1,3...3,2 рази, питомої енергомісткості на 12-15 %, отримання додаткового технологічного ефекту за рахунок поліпшення збалансованості кормосумішей; для пастоприготовлювача ПП-Ф-5 зменшення коефіцієнта варіації виходу пасти у 2-3 рази, енергомісткості – на 14-19 %, додатковий технологічний ефект.

Запропоновані методики, алгоритми і аналітичні вирази дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначити оптимальні параметри і раціональні режими роботи електроприводів сільськогосподарських машин і цим забезпечити потрібну якість виконання технологічних і виробничих процесів.

The classification of structures of electric drives of agrarian machines is carried out (spent). For defined classes the algorithms and analytical dependences for account of optimal parameters and rational modes of operations are offered. The recommendations for application of the different laws of regulation are stated depending on the technological requirements to quality of regulation. The results of industrial trials of the created systems of optimization of modes of operations of agrarian machines are given.

Література

1. Чернышов В.М., Голицын В.В. Анализ точности систем автоматической стабилизации скорости электропривода при случайных возмущениях // Электромашиностроение и электрооборудование. – К., 1976. – Вып.23. – С.7-10.
2. Иванов Г.М., Никитин Б.К. Автоматизированный электропривод агрегатов непрерывного действия. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
3. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 460 с.
4. Солодовников В.В., Матвеев П.С. Расчет оптимальных систем автоматического управления при наличии помех. – М.: Машиностроение, 1973. – 240 с.

Одержано 07.02.2000 р.