

## Прогнозування структури та дослідження динаміки системи автоматичного завантаження зернозбиральних комбайнів хлібною масою

У статті приведені результати дослідження динаміки системи автоматичного завантаження зернозбиральних комбайнів хлібною масою. Показано, що основною з вимог до даної системи є забезпечення монотонного перехідного процесу. Запропонована структура системи забезпечує такий перехідний процес.

**система автоматичного завантаження, динаміка, зернозбиральний комбайн, перехідний процес, структура**

Україна є однією з обмеженої кількості держав, на території якої вирощують багато зернових культур: озима пшениця, яра пшениця, жито, ячмінь, овес, просо, гречка та ін. На кінець 2003 року в сільському господарстві використовувалось 32480,2 тис. гектар ріллі, зернові культури займали 12495 тис. га. [1]. Частка землі під зернові культури із року в рік збільшується. Оскільки багато зернових культур досягають практично одночасно, то постає питання збирання врожаю у стислі терміни, що приводить до пере навантаження як зернозбиральних комбайнів, так і персоналу. Задача ускладнюється ще й тим, що парк зернозбиральних комбайнів в цей час постійно зменшується, і має наступні показники: 1990 р. – 107, 2000 р. – 65, 2001 р. – 61, 2002 р. – 57, 2003 р. – 54 тис. одиниць [1]. Скорочення парку зернозбиральних комбайнів в Україні зв'язано з рядом причин – зменшення випуску в республіках колишнього Радянського Союзу, ускладнення економічних зв'язків, значне зменшення випуску сільськогосподарської техніки в Україні, ослаблення економіки агропромислового комплексу та ін. Такий стан справ приводить до використання в масовій кількості застарілої, фізично та морально зношеної техніки та прийняття рішень щодо дозволу у виді виключення на ввіз в Україну зернозбиральних комбайнів, виготовлених вісім і більше років тому.

Як відомо, однією з найбільш важливих нерозв'язаних проблем зернозбиральних комбайнів є великі втрати зерна та значне скорочення ресурсу при експлуатації. Тому розв'язання даної проблеми спрямоване на реалізацію напряму „Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромислового комплексу,” передбаченого Законом України від 11 липня 2001 року № 2623 – III „Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки.”

Розробка нових зернозбиральних комбайнів „Славутич” та „Лан” в Україні не привела до розв'язання цієї проблеми. З іншого боку, потужності вітчизняних заводів поки що не в змозі забезпечити технологічну проблему агропромислового комплексу України в зернозбиральних комбайнах.

На сьогодні навантаження на один зернозбиральний комбайн в Україні в 1,4 рази більше, ніж у Росії, і в 4,5 рази більше, ніж у розвинутих країнах світу. За таких умов втрати зерна стають значно більшими, а ресурс зернозбиральних комбайнів прогресивно зменшується. Сприяє цьому і зниження агрокультури виробництва зернових культур та погіршення погодних умов збирання врожаю в останні роки.

Великі втрати зерна при збиранні та значне скорочення ресурсу при експлуатації комбайнів залежать від ряду факторів. Одним із найбільш важливих є забезпечення рівномірного завантаження комбайна хлібною масою. Рівномірність завантаження можливо забезпечити при незмінній швидкості руху комбайна та рівномірній

врожайності по ширині захвату та вздовж гонів. Однак ці параметри при роботі змінюються, особливо змінною є врожайність, яка залежить від стану окремої ділянки ґрунту, кількості та складу в ній добрив, умов живлення вологою, орієнтації до сонця, особливості висіяних зерен, умов залягання снігу, вимерзання, пошкодження хижаками та ін. Отже, якщо прийняти швидкість руху комбайна вздовж гін незмінною, то завантаження його хлібною масою буде випадковою функцією часу, яка визначається перерахованими факторами. До них ще можуть додатися і природні фактори, що формуються безпосередньо при збиранні врожаю. Так, наприклад, в умовах жнив 2004 року, коли спостерігалися часті зливи, бурі та грози, підвищилися нерівномірність розташування хлібної маси вздовж поля в наслідок полягання рослин. Крім того, склалися умови швидкого неперервного збирання врожаю в періоди просихання ґрунту. Вручну керувати рівномірністю завантаження комбайна хлібною масою в таких умовах практично не можливо. Тому розроблялись автоматичні пристрої рівномірного завантаження зернозбиральних комбайнів хлібною масою.

У результаті виконаних рядом авторів та наукових організацій досліджень встановлено, що найбільш прийнятним параметром в системах автоматичного регулювання подачі хлібної маси в комбайн є величина крутного моменту на валу барабана молотарки [2], оскільки він враховує зміни фізико-механічних властивостей матеріалу, що обробляється. Однак, істотний недолік даного підходу – виникнення транспортного запізнювання – практично спростовує його переваги. З врахуванням цього в системах автоматичного завантаження все ширше розповсюджуються датчики товщини шару хлібної маси. В таких системах практично не виникає запізнювання, а стан хлібної маси може оцінити комбайнер, встановивши необхідне завдання на підтримання товщини шару хлібної маси. Система автоматичного регулювання подачі хлібної маси в молотарку зернозбирального комбайна по товщині її шару в нахиленій камері конструктивно відпрацьована і встановлювалась на виробничих зразках комбайна СК-5. вона складається з датчика товщини шару хлібної маси, виконаного у вигляді вала, що спирається трьома ползками на нижні гілки ланцюгів транспортера похилої камери. Важіль вала через гнучкий трос і пружинний компенсатор зв'язаний з плунжером розподільника. Пружина розподільника і пружинний компенсатор виключають наявність люфтів у системі передачі і притискають ползки датчика подачі до ланцюгів похилого транспортера. Масло під тиском від золотника надходить до гідроциліндра керування варіатором ходової частини комбайна, що забезпечує необхідну зміну його швидкості в залежності від товщини шару хлібної маси. Настроювання регулятора на задану величину подачі хлібної маси здійснюється спеціальною рукояткою [2].

Як показала практика, розроблені системи, які відрізнялися простотою і надійністю, в подальшому не використовувались. Задача залишилась не розв'язаною, при збиранні врожаю зернових культур відбувається втрата його значної частини, ресурс комбайнів зменшується в наслідок перевантаження окремих його вузлів. Тому розв'язання цієї задачі є актуальним.

В даній статті ставиться задача відшукування основної причини невикористання розроблених систем, формування основних вимог до системи автоматичного завантаження комбайнів хлібною масою та перевірки можливості її реалізації.

Як вже було показано, врожайність на окремих ділянках поля є випадковою величиною. При незмінній швидкості руху комбайна товщина шару хлібної маси в нахиленій камері являє собою випадкову функцію часу. Характер впливу відмічених факторів на врожайність формує невеликі часті зміни даної функції часу, накладені на низькочастотну складову, викликану більш глобальними коливаннями параметрів зернового поля. Високочастотні складові в більшій мірі згладжуються та осереднюються в процесі транспортування матеріалу. Низькочастотні складові даною системою згладжуватись не можуть. Тому в процесі збирання врожаю під впливом існуючого автоматичного регулятора змінюється швидкість руху комбайна до відновлення в кожній ситуації заданого значення товщини шару хлібної маси.

Врожайність зменшується циклічно, характер її коливань вздовж гін можна наближено подати як синусоїду з певною частотою і амплітудою. В цих умовах під дією відомого автоматичного регулятора комбайн перші пів періоду буде гальмуватись, а другі пів періоду – прискорюватись. Степінь гальмування і прискорення визначається амплітудою коливань врожайності. Такий же характер руху комбайна буде і при подоланні окремих „пиків” випадкового процесу. В цих умовах коливальні процеси як за періодом, так і за амплітудою приймуть випадковий характер. Наявність жорсткого зв'язку між датчиком товщини шару хлібної маси і виконавчим елементом та коливальних ланок у цьому ланцюзі робить перехідний процес в системі коливальним. При стрімких змінах врожайності рух комбайна буде здійснювати затухаючі коливання з показниками, що залежать від параметрів автоматичної системи. Такий рух комбайна створює дискомфортні умови для персоналу та перевантажує самі відповідальні його вузли, чим зменшує ресурс. Швидка втомлюваність комбайнера не дозволяє чітко відслідковувати стан роботи окремих агрегатів та своєчасно приймати вірні рішення щодо встановлення завдання на товщину шару хлібної маси в залежності від зміни фізико-механічних властивостей рослин. Отже, основною причиною відомого автоматичного регулятора, що не дозволяє його широко використовувати, є формування коливальних режимів руху, що створює дискомфортні умови для оператора, швидко його втомлює, спонукає приймати помилкові рішення, перевантажує відповідальні агрегати і знижує ресурс машини. Зрозуміло, що втрати зерна в таких умовах також будуть значними.

Із виконаного аналізу витікає, що структура системи автоматичного завантаження зернозбирального комбайна хлібною масою повинна бути зміненою. В системі не повинно бути жорсткого зв'язку датчика шару хлібної маси з виконавчим елементом, абсолютно необхідним є встановлення інтегратора сигналу датчика товщини шару хлібної маси. Однією з основних вимог до системи автоматичного завантаження комбайна хлібною масою є забезпечення монотонного перехідного процесу. В певній мірі допустимим може бути аперіодичний перехідний процес з одним коливанням і невеликим перерегулюванням.

Розглянемо можливість виконання системного автоматичного завантаження комбайна хлібною масою однієї з основних вимог до неї – забезпечення монотонного перехідного процесу.

Регульованим об'єктом в системі буде зернозбиральний комбайн. Його по керуючому діяння з достатньою для практики точністю можна описати передавальною функцією [3]

$$W_{зк}(p) = \frac{K_{зк}}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} \cdot e^{-p\tau}, \quad (1)$$

де  $K_{зк}$  - передавальний коефіцієнт комбайна;

$T_1, T_2$  - сталі часу комбайна;

$\tau$  - час запізнювання.

Оскільки сталі часу  $T_1$  і  $T_2$  є функціями швидкості руху, комбайн є регульованим об'єктом зі змінними параметрами. Зважаючи на невелике запізнювання у даному випадку, знехтуємо ним, прирівнявши  $\tau = 0$ .

Характеристичне рівняння регульованого об'єкта

$$T_2^2 p^2 + T_1 p + 1 = 0. \quad (2)$$

Корені характеристичного рівняння при сталих часу, визначених в [3], є від'ємними різними в усьому діапазоні змін швидкості руху. Тому зернозбиральний комбайн є аперіодичною динамічною ланкою другого порядку.

Щоб позбавитись недоліків відомого регулятора виконаємо автоматичний регулятор електричним. В якості датчика товщини шару хлібної маси приймемо механічний сканатор [4] з важільним первинним та індуктивним вторинним

перетворювачем, який має випрямляч, згладжувальний фільтр та інтегратор. Елемент порівняння виконаємо на операційному підсилювачі. В якості підсилювачів приймемо підсилювач на інтегральній мікросхемі.

Виконавчий механізм приймемо соленоїдний з рухомим осердям, пружиною та обмоткою.

Перейдемо від принципів елементів до динамічних ланок і отримаємо структурну схему системи автоматичного завантаження комбайна хлібною масою. Операційний підсилювач, що реалізує елемент порівняння, амплітудний підсилювач та підсилювач потужності є підсилювальними динамічними ланками [5]. Позначимо їх результуючу передавальну функцію  $W_{\Pi}(p) = K_{\Pi}$ . Соленоїдний виконавчий механізм являє собою поєднання двох динамічних ланок – коливальної і аперіодичної. Механічна частина (маса, пружина і сила тертя) є коливальною ланкою з передавальною функцією

$$W_M(p) = \frac{K_M}{T_M^2 p^2 + 2\xi_M T_M p + 1}, \quad (3)$$

де  $K_M$  - передавальний коефіцієнт механічної частини;

$T_M$  - стала часу механічної частини;

$\xi_M$  - коефіцієнт демпфірування механічної частини.

Для даних умов роботи виконавчого механізму  $T_M$  складає близько 0,04 с., а  $\xi_M = 0,2$ . При таких значеннях параметрів механічна частина виконавчого механізму є аперіодичною ланкою другого порядку.

Електрична частина виконавчого механізму – електромагніт має передавальну функцію [5]

$$W_E(p) = \frac{K_E}{T_E p + 1}, \quad (4)$$

де  $K_E$  - передавальний коефіцієнт електромагніта;

$T_E$  - стала часу електромагніта  $T_E = \frac{L_E}{R_E}$ , де  $L_E, R_E$  - відповідно індуктивність та

активний опір обмотки електромагніта.

В даному пристрої стала часу  $T_E$  може бути забезпеченою порядку  $T_E = 0,1$  с.

З врахуванням сказаного передавальна функція виконавчого механізму буде дорівнювати

$$W_{BM}(p) = \frac{K_{BM}}{(T_M^2 p^2 + 2\xi_M T_M p + 1)(T_E p + 1)}, \quad (5)$$

де  $K_{BM} = K_M \cdot K_E$  - передавальний коефіцієнт виконавчого механізму.

Важільний первинний перетворювач товщини шару хлібної маси є підсилювальною динамічною ланкою [5]. Підсилювальними динамічними ланками також є індуктивний вторинний перетворювач, підсилювач його сигналу і випрямний перетворювач [5]. Позначимо їх передавальну функцію  $W_d(p) = K_d$ . Зважаючи на невелике запізнювання у даному випадку знехтуємо ним, прирівнявши  $\tau = 0$ .

Згладжувальний фільтр є аперіодичною ланкою з передавальною функцією [5]

$$W_{3\Phi}(p) = \frac{K_{3\Phi}}{T_{3\Phi} p + 1}, \quad (6)$$

де  $K_{3\Phi}$  - передавальний коефіцієнт згладжувального фільтра,  $K_{3\Phi} = 1$ ;

$T_{3\Phi}$  - стала часу згладжувального фільтра,  $T_{3\Phi} = R_{3\Phi} \cdot C_{3\Phi}$ , де  $R_{3\Phi}, C_{3\Phi}$  - відповідно опір та ємність згладжувального фільтра.

Інтегруючий аперіодичний підсилювач є аперіодичною динамічною ланкою з передавальною функцією

$$W_y(p) = \frac{K_y}{T_y p + 1} = \frac{R_2 / R_1}{R_2 \cdot C \cdot p + 1}, \quad (7)$$

де  $K_y$  - передавальний коефіцієнт інтегратора;

$T_y$  - стала часу інтегратора;

$R_1$  - опір, встановлений на вході операційного підсилювача;

$R_2$  - опір, встановлений в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача;

$C$  - ємність, встановлена у колі зворотного зв'язку операційного підсилювача.

Стала часу інтегратора достатньо велика, тому її доцільно компенсувати. Для цього введемо в прямий контур системи операційний підсилювач з опором  $R_1$  на вході та ланцюгом зворотного зв'язку, який складений з послідовно ввімкнутих ємності  $C$  і опору  $R_2$ . Передавальна функція коректуючого пристрою буде [5]

$$W_K(p) = \frac{T_{21} p + 1}{T_{11} p + 1}, \quad (8)$$

де  $T_{21} = R_2 \cdot C$ ;  $T_{11} = R_1 \cdot C$ .

Параметри  $R_2 C$  виберемо так, щоб  $T_{21} = T_y$ .

Структурна схема системи автоматичного завантаження комбайна хлібною масою приведена на рис. 1.

Передавальна функція розімкненої системи відповідно рис. 1 буде дорівнювати

$$W_p(p) = \frac{K_{\Pi} \cdot K_{\text{ВМ}} \cdot K_{\text{ЗК}} \cdot K_{\text{Д}} \cdot K_y}{(T_M^2 p^2 + 2\xi_M T_M p + 1)(T_E p + 1)(T_{11} p + 1)(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)(T_{3\Phi} p + 1)} = \frac{K}{A(p)}, \quad (9)$$

де  $K$  - коефіцієнт підсилення розімкненої системи, що дорівнює

$$K = K_{\Pi} \cdot K_{\text{ВМ}} \cdot K_{\text{ЗК}} \cdot K_{\text{Д}} \cdot K_y, \quad (10)$$

$A(p)$  - операторний багаточлен.

Перетворивши вираз  $A(p)$  і підставивши чисельні дані, отримаємо

$$A(p) = 2304 \cdot 10^{-12} p^7 + 6384 \cdot 10^{-10} p^6 + 4238 \cdot 10^{-8} p^5 + 1156 \cdot 10^{-6} p^4 + 2654 \cdot 10^{-5} p^3 + 2831 \cdot 10^4 p^2 + 1,071 p^2 + 1. \quad (11)$$

Враховуючи незначну величину коефіцієнтів при старших похідних, спростимо рівняння (11). Нехтуючи членами  $p^7$ ,  $p^6$ ,  $p^5$  та  $p^4$ , запишемо спрощений вираз операторного багаточлена розімкненої системи

$$A(p) = 0,026 p^3 + 0,283 p^2 + 1,071 p + 1. \quad (12)$$

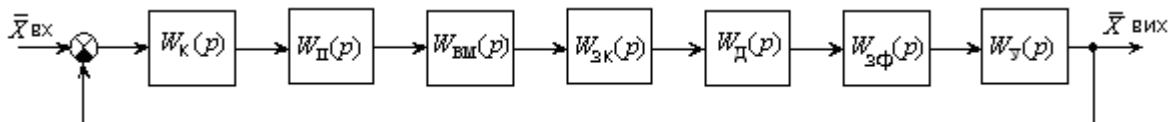


Рисунок 1 – Структурна схема системи автоматичного завантаження комбайна хлібною масою

Характеристичне рівняння замкненої системи дорівнює

$$A(p) + K = 0. \quad (13)$$

З врахуванням (12) рівняння (13) прийме вигляд

$$0,026 p^3 + 0,283 p^2 + 1,071 p + 1 + K = 0. \quad (14)$$

Поділимо рівняння (14) на коефіцієнт при  $p^3$  і отримаємо

$$p^3 + 10,67p^2 + 40,36p + 37,68 + 37,68K = 0. \quad (15)$$

Введемо позначення:  $a_3 = 37,68 \cdot (1 + K)$ ;  $a_2 = 40,36$ ;  $a_1 = 10,67$ .

Визначимо координати точок для діаграми Вишнеградського [6]

$$X = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_3}} = \frac{10,67}{\sqrt[3]{37,68(1 + K)}}, \quad (16)$$

$$Y = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_3^2}} = \frac{40,36}{\sqrt[3]{[37,68(1 + K)]^2}}. \quad (17)$$

Для аперіодичного перехідного процесу точка з координатами  $X$ ,  $Y$  на діаграмі Вишнеградського повинна потрапити в зону В [6]. Цій умові задовольняє значення  $Y = 6$ . Знайдемо значення коефіцієнта підсилення розімкненої системи  $K$  при  $Y = 6$  відповідно рівняння (17), отримаємо від'ємне значення  $K$ . Тобто, задача не має змісту. При  $Y = 6$  аперіодичний перехідний процес в системі не можливий. Менші значення  $Y$ , наприклад 4, відповідають вузькому діапазону зміни  $K$ , що практично реалізувати не можливо.

Перевіримо можливість здійснення монотонного перехідного процесу при наявності в характеристичному рівнянні комплексних спряжених коренів. Відповідно діаграмі Вишнеградського, при  $Y = 3$  діапазон зміни  $X$  ще залишається значним, тому перевіримо можливість реалізації даної умови при заданих параметрах системи. Дослідження показали, що на всіх режимах роботи комбайна при  $K = 0,3$  система автоматичного завантаження буде мати монотонний перехідний процес.

Отже, проведені дослідження показали, що при використанні відомого регулятора в умовах зміни врожайності комбайн входить в режим коливальних рухів, що негативно відбивається як на втратах та ресурсі агрегату, так і на самопочутті комбайнера. Показано, що основною з вимог до системи автоматичного завантаження комбайна хлібною масою є забезпечення монотонного перехідного процесу. Розглянута прогнозна структура системи, як підтвердили дослідження, забезпечує такий перехідний процес. Розробка і використання таких систем забезпечить значний соціально-економічний ефект. Подальші розробки даної системи будуть зв'язані зі створенням окремих вузлів та перспективних структур системи автоматичного завантаження комбайна хлібною масою.

## Список літератури

1. Статистичний щорічник України за 2003 рік / За ред. О. Г. Осауленка. – К.: Консультант, 2004. – 632 с.
2. Носов Г. Р., Кондратец В. А., Сакало Л. Г., Серeda Л. И. Автоматика и автоматизация сельскохозяйственных машин. – К.: Вища школа, 1984. – 248 с.
3. Шеповалов В. Д. Автоматизация уборочных процессов. – М.: Колос, 1978. – 383 с.
4. А. С. 1404828, А1, кл. GOIF 1/52, 1988.
5. Танатар А. И. Элементы промышленной автоматизации и их динамические свойства. – К.: Техника, 1975. – 232 с.
6. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машгиз, 1962. – 628 с.

В статье приведены результаты исследования динамики системы автоматической загрузки зерноуборочных комбайнов хлебной массой. Показано, что основным требованием к данной системе есть обеспечение монотонного переходного процесса. Предложенная структура системы обеспечивает такой переходной процесс.

In clause results of research of dynamics of system of automatic loading of combine harvesters in grain weight are resulted. It is shown, that the basic requirement to the given system is maintenance of monotonous transient. The offered structure of system provides such transitive process.

*Одержано 30.03.05*