

УДК 62.505

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.190-194](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.190-194)

О. К. Дідик, доц., канд. техн. наук, О. М. Сербул, доц., канд. техн. наук, С. В. Тесля
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: didyk_s79@ukr.net

Аналіз об'єкта керування для розробки системи автоматичної стабілізації завантаження молотарки зернозбирального комбайну

В статті приводиться аналіз об'єкта керування, розглядаються фактори, що ускладнюють досягнення максимальної якості стабілізації завантаження молотарки, серед яких розглядаються динамічні характеристики елементів об'єкта керування, динамічні характеристики збурень, що діють на об'єкт керування.
об'єкт керування, стабілізація завантаження молотарки, зернозбиральний комбайн

Постановка проблеми. Для досягнення максимальної якості стабілізації завантаження молотарки зернозбирального комбайну необхідно застосовувати методи динамічного проектування та аналітичного конструювання при побудові оптимальної системи [1]. Перед розробкою системи потрібно проаналізувати фактори, врахування яких дасть можливість досягти необхідної якості. Дані фактори можна розділити на три групи: динамічні характеристики елементів системи автоматичної стабілізації; динамічні характеристики збурень, що діють в системі; шуми вимірювачів.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Зернозбиральний комбайн є досить складним об'єктом, що включає нелінійні елементи, нестационарні елементи та складні взаємозв'язки між елементами. В літературі [2,3] описана велика кількість математичних моделей як окремих вузлів так і великих агрегатів та навіть і всього комбайну. Дані моделі складаються для вирішення різних задач.

Характерною ознакою сучасного розвитку систем автоматизації керування технологічними процесами на вітчизняних та зарубіжних комбайнах [1-3] є застосування новітніх методів, прийомів та засобів розробки бортових систем керування. Новітні методології створення систем керування дозволяють враховувати реальний стохастичний характер зміни сигналів, які діють у контурах керування та визначати структуру, а не тільки параметри, бортового регулятора, які доставляють екстремум обраному критерію якості.

З точки зору динамічних характеристик найскладнішим елементом системи є об'єкт керування, входом якого є кут нахилу шайби блоку циліндрів гідронасоса, а виходом – потік хлібної маси на вході в молотарку.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз об'єкта керування системи автоматичної стабілізації завантаження молотарки зернозбирального комбайна. З позиції задачі стабілізації завантаження молотарки необхідно одержати модель узагальненого об'єкта керування, а саме динамічні характеристики елементів об'єкта керування, динамічні характеристики збурень, що діють на об'єкт керування.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо модель узагальненого об'єкта керування „кут нахилу шайби блоку циліндрів – потік хлібної маси на вході у молотарку” (рис. 1), до якої входять гідротрансмісія (ГСТ), що змінює частоту обертів вала гідромотора ω в залежності від кута нахилу шайби блоку циліндрів гідронасоса γ , трансмісія комбайна (К), що перетворює обертання вала гідромотора в поступальний

рух комбайна та математична залежність, що пов'язує потік хлібної маси Q з поступальною швидкістю комбайну V

$$Q = VBY(1 + \varepsilon), \quad (1)$$

де Q – потік хлібної маси на вході в молотарку комбайна, кг/с; V – швидкість комбайна, м/с; B – ширина захвату жатки, м; Y – урожайність культури, кг/м²; ε – відношення зерна до незернової частини хлібної маси.

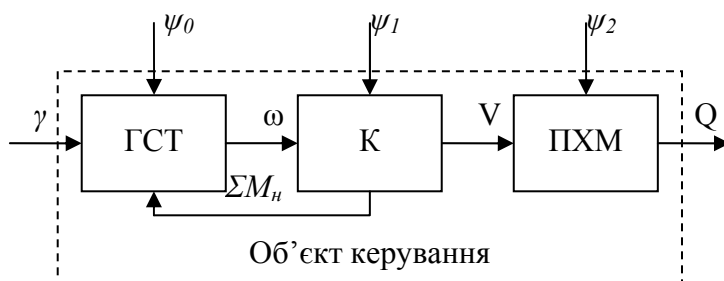


Рисунок 1 – Структура об'єкта керування

Джерело: розроблено автором

На об'єкт керування впливають збурення ψ_i , причому точки прикладання їх різні. Також в об'єкті керування є внутрішній зворотній зв'язок, який обумовлений сумарним впливом моментів сил ΣM_n , пов'язаних з поступальним рухом комбайна, на частоту обертання вала гідромотора.

Розглянемо кожен елемент об'єкта керування окремо. На сьогоднішній день більшість сучасних комбайнів використовують гідротрансмісію для керування швидкістю поступального руху. Гідротрансмісія досить складний технічний об'єкт.

Розглянемо математичну модель. При виведенні даної моделі було прийнято деякі припущення. Двигун обертає вал насоса з постійною кутовою швидкістю Ω_p . Під час роботи гідроприводу тиски в трубопроводах не досягають значень, при яких відкриваються запобіжні клапани. Тиск p_s у магістралі перед підживлювальними клапанами підтримується постійним. Зусилля, подолані гідромотором при керуванні об'єктом, можуть бути представлені сумою моментів від дії приведених до вала гідромотора інерційного навантаження, позиційного навантаження й гідравлічного тертя. Трубопроводи будемо приймати настільки короткими, щоб можна було зневажати інерцією рідини й втратами тиску в них через опір тертя.

Ця модель розглянута в роботах [4,5], де одержана передаточна функція для кутової швидкості вала гідромотора Ω по куту нахилу блоку циліндрів (або шайби) γ , при описаних вище припущеннях

$$W_{\Omega\gamma}(s) = \frac{\Omega(s)}{\gamma(s)} = \frac{1}{T_{hd}(T_m^2 s^2 + 2\zeta_m T_m s + 1)}, \quad (2)$$

де $T_{hd} = \frac{q_m}{2\pi k_{Q\gamma}}$ – постійна часу гідроприводу;

$T_m = \sqrt{\frac{2\pi^2 J W_0}{q_m^2 E_f}}$ – постійна часу гідромотора;

$\zeta_m = \frac{\pi(2J E_f k_{\Sigma} + k_{fr} W_0)}{\sqrt{2J W_0 E_f q_m^2}}$ – коефіцієнт відносного демпфування гідромотора;

q_m – робочий об'єм гідротрансмісії;

W_0 – внутрішній об'єм трубопроводу з урахуванням підключених до нього об'ємів порожнин гідромотора та насоса;

E_f – об'ємний модуль пружності робочої рідини;

k_{QY} – коефіцієнт лінеаризації відношення подачі насоса до кута нахилу шайби;
 J – момент інерції обертових з валом гідромотора частин;
 k_{fr} – коефіцієнт моменту тертя.

Розглянемо сили та моменти, що супроводжують поступальний рух зернозбирального комбайна, які описуються в теорії руху колісних машин. Всі сили та моменти, що діють на комбайн можна поділити на зовнішні та внутрішні. Зовнішніми по відношенню до комбайна є сили, що діють зі сторони навколишнього середовища, тобто дороги та повітря. Ці сили можна розділити на активні та пасивні. Перші можуть бути або рушійними силами, або силами опору руху, залежно від того яку роботу вони виконують. Пасивні сили – це сила тяжіння та нормальні реакції.

Сила опору повітря P_w відноситься до активних сил опору та зумовлена тертям в прилеглих до поверхні машини шарах повітря, стисненням повітря рухомою машиною, розрідженням за машиною, вихроутворенням в шарах повітря, що оточують машину. Чим більша площа поперечного перерізу, тим більша кількість повітря повинна огинати машину. Складова сили опору повітря, що залежить від цієї площі називається лобовим опором, є основною частиною всієї сили опору повітря.

На опір руху машини в деякому середовищі впливають щільність даного середовища та швидкість руху машини. Щільність повітря на певній висоті над рівнем моря можна вважати постійною. Вплив швидкості руху машини на силу опору повітря значний. Якщо при швидкостях порядку одиниць кілометрів за годину сила прямопропорційна швидкості, то при значних швидкостях руху сила опору повітря пропорційна квадрату швидкості. Оскільки під час збиранні зернових комбайн рухається з невеликими швидкостями, то будемо вважати силу опору повітря прямопропорційною швидкості руху комбайна.

Силу тяжіння машини G_m можна розкласти на дві складові: $G_m \cos \alpha$ та $G_m \sin \alpha$. При русі по негоризонтальній поверхні друга складова є активною силою: силою опору руху, якщо машина рухається вгору, і рушійною силою, якщо рухається вниз. Отже, складова $G_m \sin \alpha$ залежить від макрорельєфу поля і має суттєвий вплив на швидкість руху комбайна. Дана складова враховується у якості позиційного навантаження $M_{\text{поз}}$.

Також значний вплив на динаміку руху комбайна має сила інерції, оскільки комбайн має велику масу порядку 10-15 тонн. Інші сили та моменти, що супроводжують поступальний рух комбайна порівняно мало впливають на динамічні властивості об'єкта керування.

Розглянемо збурення, що діють на об'єкт керування. При виведенні математичної моделі гідротрансмісії були описані деякі припущення, але в реальних умовах експлуатації гідротрансмісія являє собою складний об'єкт з нелінійними та нестаціонарними елементами. Дані властивості об'єкта практично неможливо врахувати при аналітичному виводі математичної моделі. Тому при складанні моделі описані вище припущення будуть враховані у якості внутрішніх збурень ψ_0 , що діють на гідротрансмісію.

Що стосується збурень ψ_1 (рис. 1), що супроводжують поступальний рух комбайна та впливають на його швидкість, то серед них можна виділити нерівномірність рельєфу поля, пориви вітру, проковзування ремінних передач та ін. Основний вплив має нерівномірність рельєфу поля. Звичайно мова не йде про мікрорельєф, більш визначальною є динаміка зміни макрорельєфу поля.

Класифікація спектральних щільностей профілю ґрунтових доріг та місцевості виконується по трьом основним показникам: рівню нерівностей макропрофіля (довжина хвилі $\lambda > 100$ м); рівню і характеру нерівностей мікропрофілю ($\lambda \approx 10$ м); рівню коротких нерівностей мікропрофіля ($\lambda < 1$ м).

Нерівності макропрофілю мають спектральну щільність виду

$$S(\lambda) = D_M / \lambda^2 \quad (3)$$

За даними нерівностями місцевість класифікується: дуже рівна місцевість ($D_M = 10^{-4}$ м); рівнинна місцевість ($D_M = 10^{-3}$ м); помірна горбиста ($D_M = 10^{-2}$ м); горбиста і сильно пересічена ($D_M = 10^{-1}$ м); горна ($D_M = 10^0$ м). Для хвиль довжиною більше 1 км рівень спектральної щільності визначається виключно характером місцевості.

Для нерівностей середньої довжини спектральну щільність приблизно можна представити у вигляді

$$S(\lambda) \approx D_C / \lambda^n \quad (0 \leq n \leq 4) \quad (4)$$

Різним значенням D_C відповідають наступні рівні спектральної щільності нерівностей довжиною порядку 10 м: $D_C \approx 3 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3}$ – малий (мало зношена ґрунтова дорога, рівне поле); $D_C \approx 3 \cdot 10^{-3}$ – середній; $D_C \approx 10^{-2}$ – великий; $D_C \approx 3 \cdot 10^{-2} \div 10^{-1}$ – дуже великий (із-за валів довжиною 5 м рух машин практично неможливий).

Для коротких нерівностей спектральна щільність може бути задана

$$S(\lambda) \approx D_K / \lambda^2 \quad (5)$$

Різним значенням D_K відповідають різні рівні коротких нерівностей: $D_K = 10^{-5} \div 10^{-4}$ – дуже малий (укатані ґрунтові дороги); $D_K = 10^{-4} \div 10^{-3}$ – малий (ґрунтові дороги задовільної якості, рівне поле без горбків і явно виражених коротких нерівностей); $D_K = 10^{-3} \div 3 \cdot 10^{-3}$ – середній (розбиті ґрунтові дороги, поле без явно виражених горбків); $D_K = 3 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$ – великий (сильно розбиті ґрунтові дороги, поле з великим рівнем коротких нерівностей, місцевість з неоднорідним ґрунтом і каменистими вклученнями, оранка); $D_K = 10^{-2} \div 3 \cdot 10^{-2}$ – дуже великий (луг з дуже високими горбками, крупне каміння).

Розглянемо збурення ψ_2 , що впливають на потік хлібної маси. З виразу (1) видно, що на потік хлібної маси окрім швидкості руху комбайну впливають урожайність культури, ширина захвату жатки та відношення зерна до незернової частини хлібної маси. Серед них основний вплив на нерівномірність потоку звичайно має урожайність культури. Оскільки ширина захвату жатки контролюється комбайнером або відповідними автоматичними системами і підтримується на заданому рівні з незначними коливаннями. Відношення зерна до незернової частини хлібної маси залежить від висоти стеблостою і також може підтримуватися за допомогою зміни висоти зрізу стебла в ручному або автоматичному режимі. Тоді як на урожайність в процесі збору вплинути неможливо.

Для визначення спектральної щільності зміни урожайності по ходу руху комбайна необхідно проаналізувати карти урожайності полів для відповідного регіону.

Висновки. Аналіз показав, що кожна складова об'єкта керування є досить складним механізмом, на який діють складні стохастичні зовнішні та внутрішні впливи. Одержати аналітично модель динаміки об'єкта керування яка б, з одного боку, була достатньо простою для успішного вирішення задач розробки системи керування, а з іншого враховувала головні фактори, що впливають на якість процесу стабілізації потоку хлібної маси в реальних умовах функціонування досить складно. Отже для вирішення задачі стабілізації потоку хлібної маси пропонується застосування експериментально-аналітичної концепції визначення моделі динаміки об'єкта керування та збурень, що діють на нього.

Список літератури

1. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін., Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.

2. Войтюк Д. Г., Яцун С. С., Довжик М. Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посібник / За ред.: Д. Г. Войтюка. Суми: Університетська книга, 2008. 43 с.
3. Проектування сільськогосподарських машин: навч.-метод. посібник / І. М. Бендера та ін., Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В. Абетка, 2010. 640 с.
4. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 17. No 1. 2017. P. 27-32.
5. Sokolov V., Krol O., Stepanova O., Tsankov P. Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. 2020. Vol. 73. No 5. P. 691-702.

References

1. Blohin L.N., Osadchyi S.I., Didyk O.K. et al. (2023) Technologies for designing modern competitive complexes for controlling stochastic movement of objects. *Kropyvnyts'kyi: Lysenko V.F.* [in Ukrainian].
2. Voitiuk D. H., Yatsun S. S., Dovzhyk M. Ya. (2008) Agricultural machinery: basics of theory and calculation. Sumy: Universytets'ka knyha [in Ukrainian].
3. Bendera I. M., Rud' A.V., Koziy YA.V. et al. (2010) Design of agricultural machines: teaching-methodical manual. Kam'yanets'-Podil's'kyi : FOP Sysyn O.V. Abetka [in Ukrainian].
4. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Mathematical model of the automatic electrohydraulic drive with volume regulation. *TEKA. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 17. No 1. 2017. P. 27-32.
5. Sokolov V., Krol O., Stepanova O., Tsankov P. Dynamic characteristics of rotary motion electrohydraulic drive with volume regulation. *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*. 2020. Vol. 73. No 5. P. 691-702.

Oleksandr Didyk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Serbul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Serhiy Teslya**
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Analysis of the Control Object for the Development of a System for Automatic Stabilization of the Loading of the Threshing Machine of a Combine Harvester

This article provides an analysis of the control object, considers factors that complicate the achievement of maximum quality stabilization of the threshing machine loading, including the dynamic characteristics of the elements of the control object, the dynamic characteristics of the disturbances acting on the control object.

To achieve the maximum quality of stabilization of the threshing machine loading of a combine harvester, it is necessary to apply methods of dynamic design and analytical construction when building an optimal system. Before developing the system, it is necessary to analyze the factors, the consideration of which will allow achieving the required quality. These factors can be divided into three groups: dynamic characteristics of the elements of the automatic stabilization system; dynamic characteristics of disturbances acting in the system; noise of the meters.

From the point of view of dynamic characteristics, the most complex element of the system is the control object, the input of which is the angle of inclination of the washer of the hydraulic pump cylinder block, and the output is the flow of grain mass at the entrance to the threshing machine. From the position of the problem of stabilizing the threshing machine loading, it is necessary to obtain a model of a generalized control object, namely, the dynamic characteristics of the elements of the control object, the dynamic characteristics of the disturbances acting on the control object

Each component of the control object is a rather complex mechanism, which is affected by complex stochastic external and internal influences. It is quite difficult to obtain an analytical model of the dynamics of the control object, which, on the one hand, would be simple enough to successfully solve the problems of developing a control system, and on the other hand, would take into account the main factors affecting the quality of the process of stabilizing the flow of grain mass in real operating conditions. Therefore, to solve the problem of stabilizing the flow of grain mass, it is proposed to use the experimental-analytical concept of determining the model of the dynamics of the control object and the disturbances acting on it.

control object, threshing machine loading stabilization, combine harvester

Одержано (Received) 19.03.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.04.2025

Прийнято до друку (Approved) 06.05.2025