

УДК 539.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-27-5

Грабар І. Г., Жуковський О. Є.

Поліський національний університет

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ МЕХАНІЧНО ПОЄДНАНИХ ВАЛІВ З ПЕРЕМІННИМ ЦЕНТРОМ МАС ОДНОГО З НИХ НА ПРИКЛАДІ КАРТОРОБНОЇ МАШИНИ «DORIS»

У статті досліджуються перехідні процеси в електромеханічній системі, що складається з двох механічно поєднаних валів з індивідуальними приводами, один з яких зазнає значної періодичної зміни центру мас. Перехід промисловості до децентралізованих приводів спрощує механічні конструкції, але ускладнює динамічну взаємодію між вузлами, особливо за наявності змінних інерційних параметрів, що може призводити до параметричного збудження та втрати стійкості системи. Метою роботи є експериментальний аналіз впливу зміни центру мас одного з валів на динаміку та коефіцієнт пропорційності моментів на головному та допоміжному приводах. Методологія дослідження полягає у вимірюванні та аналізі миттєвих значень моменту на валах приводних двигунів карторобної машини «Doris» під час технологічного циклу скидання рулону. Експеримент проводився для трьох різних мас намотаного картону: 100 кг, 250 кг та 530 кг, що дозволило оцінити динаміку системи при різному ступені ексцентриситету. Результати показали, що зі збільшенням маси рулону та, відповідно, зміщення центру мас, проста лінійна кореляція між моментами головного та допоміжного приводів втрачається. Однак детальний аналіз процесу скидання рулону виявив складний, але стійкий нелінійний зв'язок, що апроксимується поліномом третього ступеня з високим рівнем кореляції. Графік цієї залежності має характерну точку перегину, що відповідає зміні напрямку зміщення центру мас барабана.

Встановлено, що значна періодична зміна центру мас є ключовим дестабілізуючим фактором, що призводить до виникнення параметричної нестійкості. Виявлений нелінійний характер взаємозв'язку моментів є емпіричним підтвердженням цього явища. Це доводить принципову недостатність стандартних систем керування зі стабілізацією швидкості та обґрунтовує необхідність розробки адаптивних алгоритмів, здатних ідентифікувати змінні параметри системи та активно демпфувати параметричні коливання.

Ключові слова: механічно поєднані вали, перехідні процеси, змінний центр мас, роторна динаміка, параметричне збудження, кореляція моментів, стабілізація швидкості.

Постановка проблеми. Раніше кінематичні системи з багатьма валами, які механічно поєднані між собою, керувалися від одного головного приводу, що забезпечувало синхронне обертання, але вимагало складної і вимогливої до механічної стійкості конструкції. Сучасні системи електроприводу дозволяють відмовитися від одного головного електроприводу, та поставити локальні привідні двигуни в кожну точку кінематичної схеми. Це дозволяє забезпечити синхронізацію на основі мікропроцесорної системи електроприводу. Даний метод набагато спрощує процес конструювання механіки систем, але викликає потребу розуміння природи поведінки механічно зв'язаних між собою валів з окремими привідними точками.

Аналіз літературних джерел. Сучасна роторна динаміка є галуззю, що безперервно розвивається, стимульована невідповідними вимогами промисловості до підвищення ефективності, надійності та продуктивності обертового обладнання. Промислові рушії, із прагнення до вищих робочих швидкостей, збільшення питомої потужності та розробка легших, більш гнучких конструкцій роторів, кардинально змінили ландшафт інженерних викликів.[1] Ці тенденції змушують сучасні машини, від авіаційних двигунів до промислових турбокомпресорів, працювати на швидкостях, що значно перевищують їхні перші, а іноді й другі та треті критичні швидкості.[3] У таких режимах динамічна поведінка системи перестає бути вторинним фактором і стає першочерговим проектним обмеженням.

Класичні підходи, що розглядали ротори як жорсткі тіла, виявилися недостатніми для опису складних явищ, що виникають у високошвидкісних гнучких системах.[4] Значні інерційні сили та моменти, що виникають при високих кутових швидкостях, призводять до суттєвих пружних деформацій, які неможливо ігнорувати.[4] Це призвело до необхідності розглядати роторні системи як складні коливні системи, що складаються з валів, дисків, лопаток та інших

елементів, які підтримуються підшипниками та взаємодіють зі стаціонарними компонентами, такими як корпуси та фундаменти.[4] Розуміння та прогнозування динамічної поведінки, зокрема вібрацій та стійкості, стало ключовим для забезпечення безпечної та довготривалої експлуатації.[1] Незбалансованість ротора, хоч і є фундаментальною причиною вібрацій, вже не розглядається як єдиний значущий фактор. Дестабілізуючі ефекти від ущільнень, підшипників, внутрішні резонанси та теплові ефекти можуть призводити до небезпечних автоколивань, що вимагає значно глибшого аналізу.[1]

У контексті сучасної роторної динаміки аналіз перехідних процесів набуває особливої ваги. Перехідний процес визначається як електромагнітний або механічний процес, що виникає при переході системи від одного усталеного стану до іншого.[5] У роторних системах це охоплює широкий спектр режимів, що відрізняються від стаціонарної роботи: запуск та зупинка машини, проходження через критичні швидкості, а також реакція на раптові збурення, такі як втрата лопатки, ударні навантаження або різкі зміни в робочому процесі.[6]

Аналіз перехідних процесів є найбільш комплексним підходом до дослідження динаміки системи, оскільки він дозволяє отримати вичерпну інформацію про критичні швидкості, вимушені коливання, стійкість, а також реакцію на ударні навантаження, особливо для систем з нелінійними характеристиками.[6] Саме в перехідних режимах роторні системи є найбільш вразливими. Проходження через резонансні зони (критичні швидкості) супроводжується різким зростанням амплітуд вібрацій, що може призвести до контакту ротора зі статором (затирання), передчасного зносу підшипників або навіть катастрофічного руйнування конструкції.[7] Тому точне прогнозування та оцінка нестационарних навантажень і деформацій під час цих режимів є першочерговим завданням для коректного проектування.[9]

Змінність маси фундаментально змінює математичний опис системи, перетворюючи її керівні рівняння з лінійних стаціонарних (Linear Time-Invariant, LTI) на лінійні з періодично змінними в часі параметрами (Linear Time-Periodic, LTP) або, у загальному випадку, на повністю нелінійні, нестационарні системи.[10].

Така трансформація має глибокі фізичні наслідки. Головним з них є виникнення параметричного збудження. Це явище, при якому періодична зміна параметрів системи (таких як жорсткість, маса або момент інерції) може призвести до експоненційного зростання амплітуди коливань і втрати стійкості, навіть за відсутності зовнішніх синхронних сил [10]. Таким чином, аналіз стійкості системи перестає обмежуватися лише уникненням критичних швидкостей і вимагає ідентифікації та уникнення зон параметричної нестійкості.

Інші моменти дослідження динаміки механічно поєднаних валів розглядалися в [11-32].

Мета дослідження. Метою дослідження являється аналіз перехідних процесів які відбуваються на головному та допоміжному приводі для оцінки коефіцієнту пропорційності моменту на валу, та вплив перехідних процесів на нього.

Матеріали і методи досліджень. В якості типового зразка системи з механічно пов'язаними валами та з наявністю валу з змінним центром маси розглянемо картоноробну машину Doris (рис. 1) яка застосовується для випуску якісного електротехнічного картону з целюлозної маси.

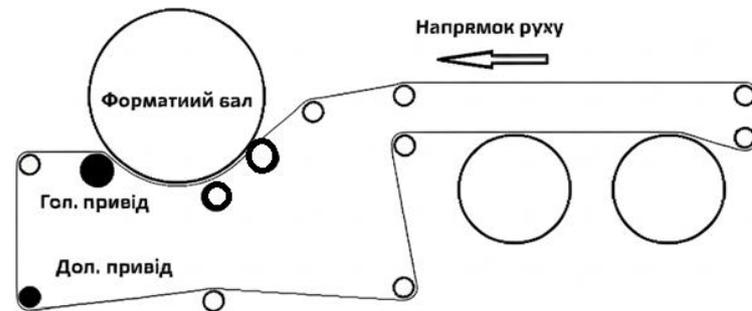


Рисунок 1 – Схема протяжки волокна з вказанням приводних точок

Машина безкінечно транспортує елементарний шар картону на транспортному полотні і виконує його намотку на форматний вал. Товщина картону залежить від кількості намотаних шарів та товщини елементарного шару. Після досягнення заданої кількості шарів відбувається відсічка елементарного шару і радіальний зруб намотаного мокрого листа картону. Таким чином

під час останнього моменту зрубу для даного листа картону відбувається його змотування з форматного валу і початок намотування наступного листа. Після чого цикл повторюється. Асортимент технологічних товщин виробляємої продукції залежить від кількості шарів намотки та товщини елементарного шару.

Головний привід обертає вал, який забезпечує прижим транспортного полотна до форматного валу, та обертає безпосередньо сам форматний вал. Допоміжний привід виконує безпосередньо протяжку транспортного полотна.

Головний привід та допоміжний привід налаштовані таким чином, щоб забезпечити підтримання стабільної швидкості транспортного полотна. Тому обертова швидкість їх стабільна. Технологічно швидкість допоміжного приводу становить 99% швидкості головного приводу. Таке технологічне підгальмовування забезпечує передачу елементарного шару з транспортного полотна на форматний вал.

Система управління забезпечує стабілізацію швидкості, яка є константою в заданих діапазонах регулювання.

Для проведення дослідження було виконано замір моментів на валу двигунів під час процесу зрубу і сходження листа картону розміром 6500x3250мм (ДxШ) для трьох марок картону «1мм» (15 елементарних слоїв 100кг, 3мм фактичної товщини мокрої папки) «3,3мм» (45 елементарних слоїв 250 кг 11 мм фактичної товщини мокрої папки), «7мм» (93 елементарні слої 530кг 24мм фактичної товщини мокрої папки). Графіки наведені на рисунку 2-4. Ряд 1 – дані з головного приводу, Ряд 2 – дані з допоміжного приводу.

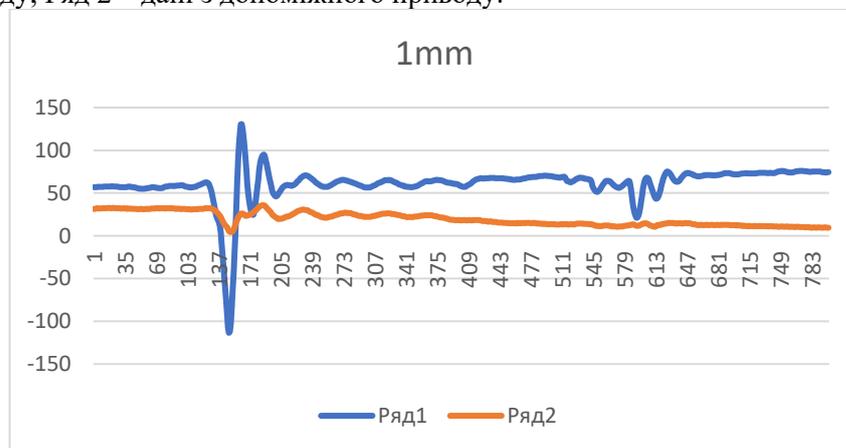


Рисунок 2 – Графіки моментів на валу двигунів головного (ряд 1) та допоміжного (ряд 2) двигунів заміряні на картоні «1 мм»

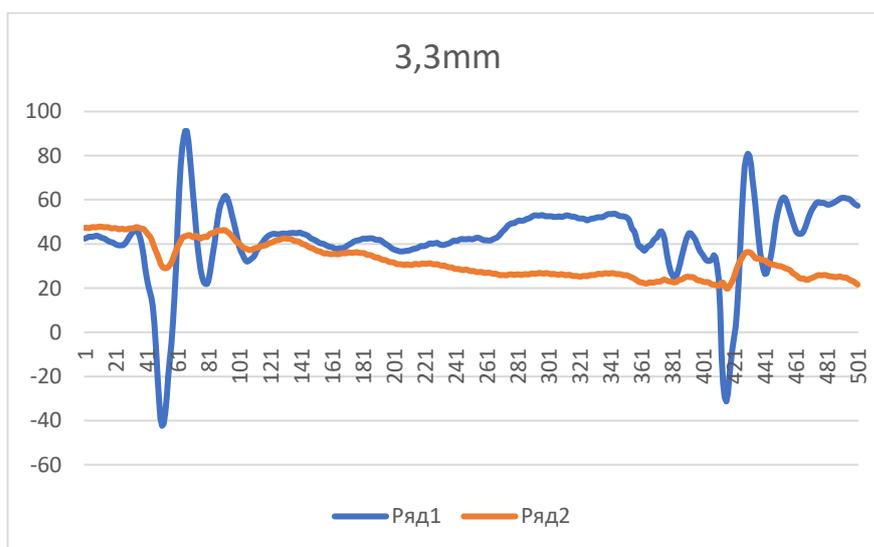


Рисунок 3 – Графіки моментів на валу двигунів головного (ряд 1) та допоміжного (ряд 2) двигунів заміряні на картоні «3,3 мм»

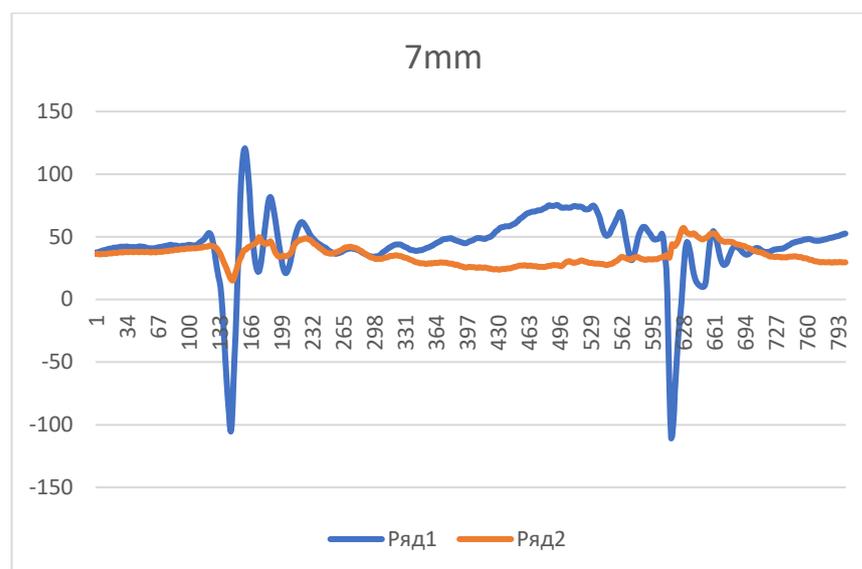


Рисунок 4 – Графіки моментів на валу двигунів головного (ряд 1) та допоміжного (ряд 2) двигунів заміряні на картоні «7 мм»

Розглянемо перехідний процес головного двигуна. Дані графіки мають два збурення на початку і в кінці процесу зрубу. Перше збурення практично ідентичне – так як це збурення викликане ножем який виконує зруб папки і викликає радіальне збурення моменту на валу двигуна. Збурення на кінці процесу викликане ударами прижимних валів під час сходження намотаного листа картону, тому вони залежать від товщини листа який сходить з форматного валу. Збільшення моменту на валу між моментом зрубу і сходу листа картону викликане переміщенням центру мас форматного валу

Щодо перехідного процесу на допоміжному валу який обертає транспортне полотно – на ньому чітко не виділяються моменти зрубу і сходу листа картону, так як основні збурення відбуваються у форматному валі який приводиться в рух головним приводом, але так як дані вали зв'язані одним полотном – перехідні процеси головного приводу мають вплив на допоміжний привод. Між зрубом та сходом лиса картону відмічається зниження моменту на валу двигуна. Це обумовлене тим що основним фактором який впливає на навантаження на даному двигуні являється маса картону на форматному валу, і при сходженні картону з валу – виконується розвантаження транспортувального полотна.

Розглянемо і проаналізуємо графіки пропорційності моменту на валу між головним та допоміжним двигуном ($\frac{M_{гол}}{M_{доп}}$) у зв'язаній системі

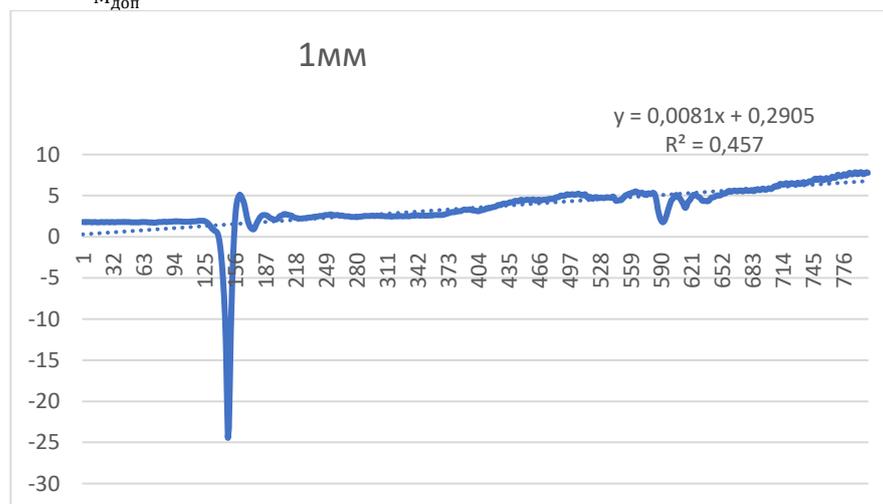


Рисунок 5 – Графік пропорційності моментів ($M_{гол}/M_{доп}$) головного та допоміжного двигунів заміряні на картоні «1 мм»

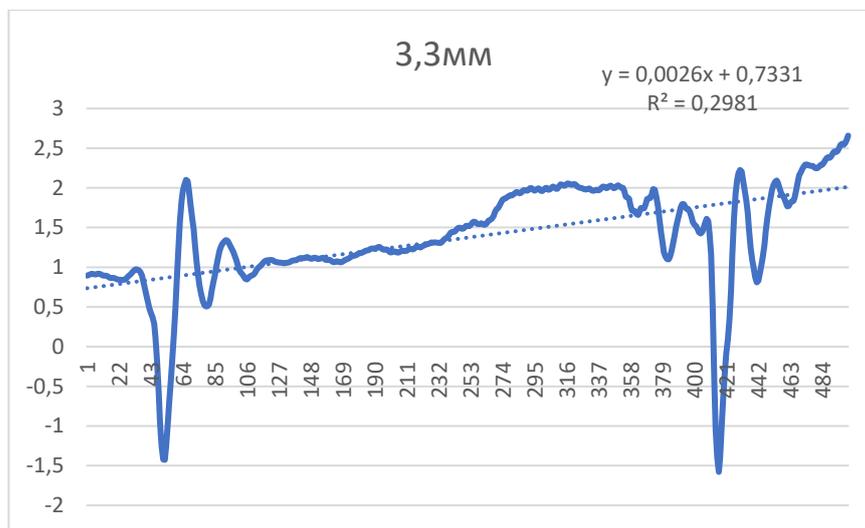


Рисунок 6 – Графік пропорційності моментів ($M_{гол}/M_{дон}$) головного та допоміжного двигунів заміряні на картоні «3,3 мм»

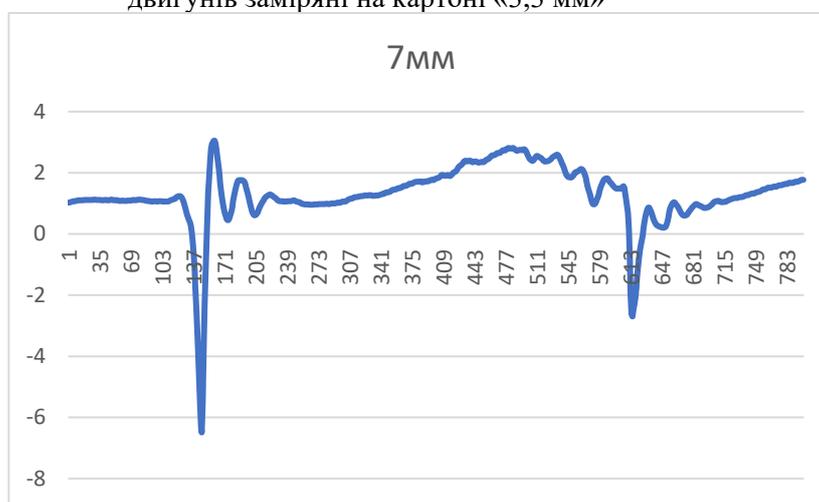


Рисунок 7 – Графік пропорційності моментів ($M_{гол}/M_{дон}$) головного та допоміжного двигунів заміряні на картоні «7 мм»

Аналіз даних графіків показує що у випадку тонкого листа (рисунок 5) який забезпечує незначну зміну маси барабану ми бачимо чітко виділений момент зрубу, та сходу листа з валу (у вигляді реакцій на прижимні вали) який відрізняється від лінії тренду, а на інших етапах маємо кореляцію.

Розглянемо більш детально кореляцію моментів між головним і допоміжним двигуном на рисунку 8-10, де виділена частина процесу сходу намотаної папки картону з барабану для технологічних товщин 1мм, 3,3мм та 7мм відповідно.

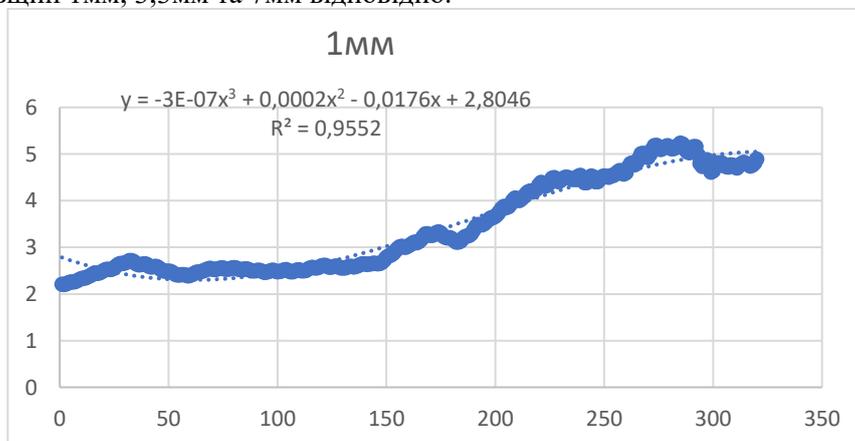


Рисунок 8 – Графік пропорційності моментів ($M_{гол}/M_{дон}$) головного та допоміжного двигунів на ділянці сходу полотна заміряні на картоні «1 мм»

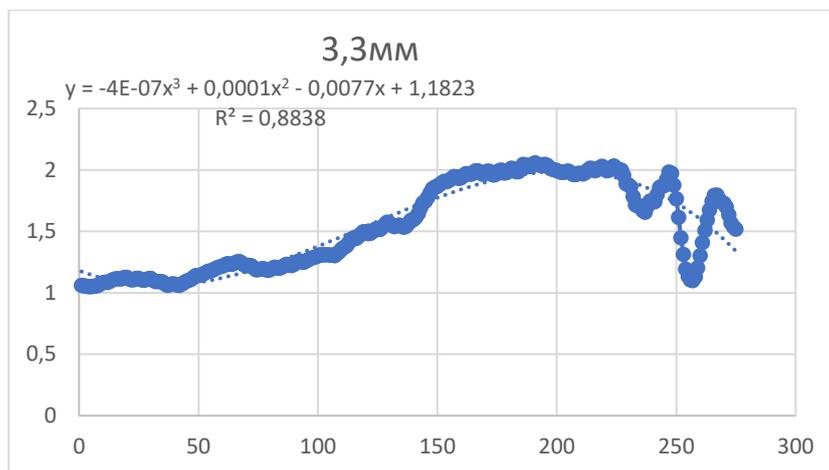


Рисунок 9 – Графік пропорційності моментів ($M_{гол}/M_{дон}$) головного та допоміжного двигунів на ділянці сходу полотна заміряні на картоні «3,3 мм»

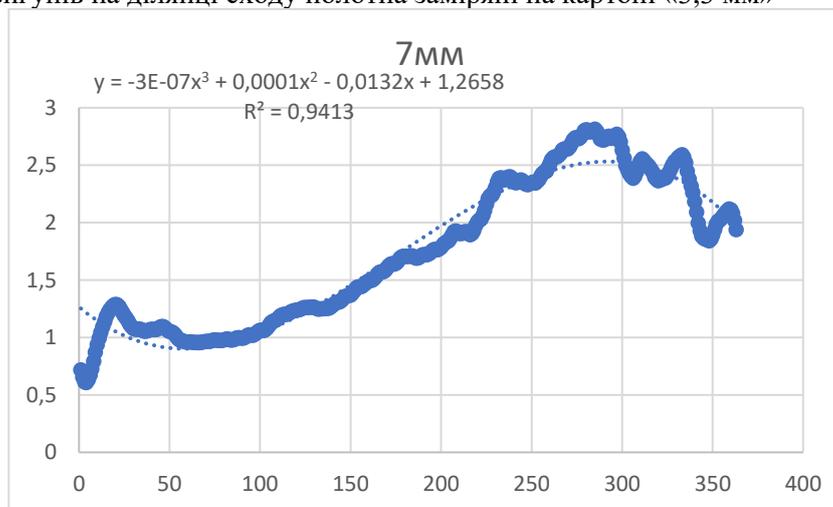


Рисунок 10 – Графік пропорційності моментів ($M_{гол}/M_{дон}$) головного та допоміжного двигунів на ділянці сходу полотна заміряні на картоні «7 мм»

На даних графіках чітко видно що зміна моментів на валах двигунів має нелінійний характер і інтерполюється поліномом третьої степені з високим рівнем кореляції.

Для «1мм»:

$$y = -3 \cdot 10^{-7} x^3 + 0,0002 x^2 - 0,0176 x + 2,8046$$

Коефіцієнт кореляції: $R^2 = 0,9552$

Для «3,3мм»:

$$y = -4 \cdot 10^{-7} x^3 + 0,0001 x^2 - 0,0077 x + 1,1823$$

Коефіцієнт кореляції: $R^2 = 0,8838$

Для «7мм»:

$$y = -3 \cdot 10^{-7} x^3 + 0,0001 x^2 - 0,0132 x + 1,2658$$

Коефіцієнт кореляції: $R^2 = 0,9413$

Такий графік має точку перегину в середній частині яка пояснюється зміною напрямку зміщення центра мас барабану під час скидання мокрої папки картону.

Експеримент показав, що стандартна система керування, орієнтована виключно на стабілізацію швидкості, є принципово неспроможною ефективно протидіяти параметричній нестійкості. Вона реагує на наслідки (відхилення швидкості), а не на першопричину (внутрішню динамічну нестабільність), генеруючи високочастотні коригувальні впливи, що можуть додатково навантажувати механіку [1]. Для надійної та безпечної роботи подібних систем необхідний перехід до більш досконалих, адаптивних алгоритмів керування. Перспективними напрямками є розробка систем, що в реальному часі ідентифікують змінні параметри (наприклад, поточний момент інерції) та проактивно застосовують керуючий вплив для активного демпфування коливань. Це вимагає застосування сучасних методів теорії керування, таких як Model Predictive Control (MPC) або адаптивне керування з ідентифікацією моделі.

Висновки. Проведене експериментальне дослідження перехідних процесів у системі механічно поєднаних валів карторобної машини «Doris» дозволило сформулювати наступні оновлені висновки.

1. Експериментально підтверджено критичний вплив зміни центру мас на динаміку системи. Аналіз даних вимірювання моментів для трьох марок картону («1мм», «3,3мм» та «7мм» відповідно масою 100 кг, 250 кг та 530 кг) однозначно продемонстрував, що збільшення ексцентриситету маси на форматному валу є домінуючим фактором, що визначає характер перехідних процесів. Для головного приводу це проявляється у зростанні амплітуди динамічних збурень, а для допоміжного — у зміні навантаження через перерозподіл маси.

2. Встановлено нелінійний характер взаємозв'язку між моментами приводів. Ключовим результатом дослідження є виявлення того, що хоча проста лінійна кореляція між моментами головного та допоміжного приводів погіршується зі збільшенням маси рулону, між ними існує стійкий, але складний нелінійний зв'язок. Під час процесу скидання рулону цей зв'язок успішно апроксимується поліномом третього ступеня з високою достовірністю. Наявність точки перегину на графіку цієї залежності фізично пояснюється зміною напрямку зміщення центру мас барабана, що підтверджує прямий вплив цього параметра на динаміку системи.

3. Інтерпретовано нелінійну динаміку, як прояв параметричної нестійкості. Періодична зміна моменту інерції системи «вал + рулон» діє як джерело енергії, що "накачує" коливання, перетворюючи керівні рівняння системи на лінійні з періодично змінними параметрами (ЛТР), для яких характерні зони нестійкості. Таким чином, виявлена нелінійна кореляція є експериментальною верифікацією фундаментальних положень теорії роторної динаміки на реальному промисловому обладнанні.

Інформаційні джерела

1. Gupta K. IUTAM Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics [Електронний ресурс] / K. Gupta. Режим доступу: https://archive.org/stream/K._Gupta_IUTAM_Symposium_on_Emerging_Trends_in_Rotor_Dynamics_s/K._Gupta_IUTAM_Symposium_on_Emerging_Trends_in_Rotor_Dynamics_djvu.txt (дата звернення: 31.08.2025).

2. IUTAM Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://epdf.pub/iutam-symposium-on-emerging-trends-in-rotor-dynamics.html> (дата звернення: 31.08.2025).

3. Mechanisms and Machine Science [Електронний ресурс] // National Academic Digital Library of Ethiopia. Режим доступу: <https://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/32219/1/71.pdf> (дата звернення: 31.08.2025).

4. Finite Element-Based Investigation of Rotor-Bearing-Stator Dynamics [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1934745/FULLTEXT01.pdf> (дата звернення: 31.08.2025).

5. Основи теорії кіл. Ч. 2. Аналіз лінійних та нелінійних кіл в перехідному та усталеному режимі [Електронний ресурс] : навч. посіб. Харків : ХУПС. Режим доступу: http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/3531/03_Navch_posibnik_Osnovi_teoriji_kil_ch_2_HUP_S.pdf (дата звернення: 31.08.2025).

6. Kirk R. G., Gunter E. J. Transient Response of Rotor-Bearing Systems [Електронний ресурс] / R. G. Kirk, E. J. Gunter. Режим доступу: <https://dyrobes.com/wp-content/uploads/2012/12/Transient-Analysis-of-Rotor-Bearing-Systems-Kirk-Gunter-1973.pdf> (дата звернення: 31.08.2025).

7. Towards Determination of Critical Speeds of a Rotating Shaft with Eccentric Sleeves: Equations of Motion [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/282680141_Towards_Determination_of_Critical_Speeds_of_a_Rotating_Shaft_with_Eccentric_Sleeves_Equations_of_Motion (дата звернення: 31.08.2025).

8. Proceedings of the Surveillance 10, Vishno and AVE conferences [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://survishno.sciencesconf.org/data/pages/Monday_Proceedings_Survishno_2019.pdf (дата звернення: 31.08.2025).

9. The coupled bending and torsional vibrations of the high-speed geared rotor-bearing system [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/289213895_The_coupled_bending_and_torsional_vibrations_of_the_high-speed_geared_rotor-bearing_system (дата звернення: 31.08.2025).

10. Modal analysis of periodically time-varying linear rotor systems [Електронний ресурс] // ResearchGate. Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/229365668> Modal analysis of periodically time-varying linear rotor systems (дата звернення: 31.08.2025).
11. Cveticanin L. Dynamics of mass variable rotor and its application in modeling turning operation // *Mechanism and Machine Theory*. 2021. Vol. 155. Article 104082.
12. Chen Y., Wang J., Han Q. Dynamic characteristics of a dual-rotor system with inter-shaft bearing and rub-impact fault // *Measurement*. 2021. Vol. 174. Article 109033.
13. Fu C., Sinou J. J., Zhu W., Lu K. Transient response analysis of a misaligned coupled rotor system during start-up // *Journal of Sound and Vibration*. 2020. Vol. 473. Article 115228.
14. Guo Y., He Y., Li D. Vibration analysis of a cracked rotor system with time-varying mass // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 245. Article 108098.
15. He Y., Zhang Y., Yan X. Dynamic behavior of a coupled rotor-bearing system with misalignment and time-varying stiffness // *Applied Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 83. P. 136–154.
16. Li M., Yu L., Sun Y. Dynamic analysis of a twin-rotor system connected by a flexible coupling with angular misalignment // *Shock and Vibration*. 2020. Vol. 2020. Article 8820673.
17. Liu J., Shao Y. Dynamic modeling and vibration analysis of a localized surface defect on a gear-rotor system with time-varying mesh stiffness // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 135. Article 106132.
18. Ma H., Wang X., Niu H. Vibration properties of dual-rotor systems under base excitation, mass unbalance and gravity // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 3. Article 960.
19. Słowik M. Dynamics of a mass variable drum winding a heavy rope // *Archive of Applied Mechanics*. 2021. Vol. 91. P. 819–834.
20. Wang N., Jiang D. Transient vibration analysis of a rotor system with sudden unbalance during acceleration // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 185. Article 109780.
21. Wang Z., Zhang W., Ma H. Nonlinear dynamics of a fluid-filled rotor system with time-varying mass // *Nonlinear Dynamics*. 2022. Vol. 108. P. 1957–1978.
22. Xiang L., Gao X., Hu A. Dynamic analysis of a variable-mass rotor system with rub-impact // *Journal of Vibration and Control*. 2021. Vol. 27, no. 11–12. P. 1325–1338.
23. Xu Z., Liu J., Zhou X. An investigation of vibrations of a flexible rotor system with the unbalanced force and time-varying bearing force // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 35. Article 25.
24. Yang Y., Cao S. Transient analysis of a winding machine rotor with time-dependent mass and stiffness // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. Vol. 38. P. 412–425.
25. Zhang J., Tang X., Zhang Q. Dynamic behavior analysis of the winding rotor with structural coupling and time-frequency varying parameters: Simulation and measurement // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 17. Article 8124.
26. Zhang K., Zhao C. Coupled lateral-torsional vibration of a rotor-bearing-gear system with time-varying mesh stiffness and backlash // *Mechanism and Machine Theory*. 2020. Vol. 154. Article 104044.
27. Zhang W., Chen L. Stability analysis of a rotor system with variable inertia moments and gyroscopic effects // *Journal of Applied Mechanics*. 2020. Vol. 87, no. 5. Article 051003.
28. Zhou H., Chen X. Transient response of a flexible coupling rotor system with misalignment faults during acceleration // *Journal of Vibroengineering*. 2020. Vol. 22, no. 2. P. 345–359.
29. Zhu H., Teo C. J. Flow-induced vibration of a variable mass rotor system: Modeling and analysis // *Journal of Fluids and Structures*. 2023. Vol. 116. Article 103803.
30. Cao S., Sun Y. Vibration characteristics of a coupled rotor-bearing system with rubbing fault during acceleration // *Tribology International*. 2024. Vol. 191. Article 109122.
31. Li H., Santos I. F. On the nonlinear dynamics of a rotor-bearing system with variable mass and active lubrication // *Journal of Sound and Vibration*. 2021. Vol. 501. Article 116045.
32. Gao P., Hou L. Nonlinear dynamic characteristics of a bolted joint rotor system with variable mass distribution // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2023. Vol. 170. Article 113346.

Grabar I., Zhukovsky O.
Polissia National University

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN A SYSTEM OF MECHANICALLY COUPLED SHAFTS WITH A VARIABLE CENTER OF MASS USING THE "DORIS" CARDBOARD MACHINE AS A CASE STUDY

The article investigates transient processes in an electromechanical system consisting of two mechanically coupled shafts with individual drives, where one shaft undergoes a significant periodic shift in its center of mass. The industrial transition to decentralized drives simplifies mechanical designs but complicates the dynamic interaction between components, particularly in the presence of variable inertial parameters. This can lead to parametric excitation and a loss of system stability. The aim of this work is the experimental analysis of the influence of the center of mass shift in one of the shafts on the system's dynamics and the torque proportionality coefficient of the main and auxiliary drives. The research methodology consists of measuring and analyzing the instantaneous torque values on the drive motor shafts of the "Doris" cardboard machine during the roll discharge technological cycle. The experiment was conducted using three different masses of wound cardboard: 100 kg, 250 kg, and 530 kg, which allowed for the assessment of system dynamics under varying degrees of eccentricity. The results showed that as the roll mass increases—and consequently, the center of mass shifts—the simple linear correlation between the torques of the main and auxiliary drives is lost. However, a detailed analysis of the roll discharge process revealed a complex yet stable nonlinear relationship, approximated by a third-degree polynomial with a high level of correlation. The graph of this dependence features a characteristic inflection point corresponding to the change in direction of the drum's center of mass displacement.

It has been established that significant periodic changes in the center of mass are a key destabilizing factor leading to parametric instability. The identified nonlinear nature of the torque relationship serves as empirical confirmation of this phenomenon. This demonstrates the fundamental insufficiency of standard control systems based on speed stabilization and justifies the need for developing adaptive algorithms capable of identifying variable system parameters and actively damping parametric oscillations.

Keywords: *mechanically coupled shafts, transient processes, variable center of mass, rotor dynamics, parametric excitation, torque correlation, speed stabilization.*

Дата першого надходження
статті до видання
08.10.2025 р

Дата прийняття статті
до друку
10.12.2025 р.

Дата
оприлюднення
25.12.2025 р.