

МАШИНОБУДУВАННЯ І ТРАНСПОРТ

<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-153-160>

УДК 539.3

І. Г. Грабар¹
О. Є. Жуковський¹

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ ДИНАМІКОЮ ПОЗДОВЖНЬО-РІЗАЛЬНОГО СТАНУ

¹Поліський національний університет, Житомир

Розглянуто проблематику процесів перемотки паперу і дотримання технологічних параметрів для забезпечення якості цього процесу. Проведено огляд складових сучасної елементної механічної та електронної бази для проектування та створення машин, які виконують процеси перемотки різних рулонних матеріалів і паперу зокрема. Приділено увагу специфіці використання програмованих логічних контролерів та електроприводу для проектування машин перемотки.

Експериментально досліджено кінетику електричних (напруга і струм) та механічних (кутова швидкість ротора та крутний момент на валу) характеристик верстата ПРС-501 у перехідних процесах розгону й гальмування у разі переходу із заправної на робочу швидкість.

На основі отриманої раніше динамічної моделі запропонована система керування, розроблена на основі SIEMENS SIMATIC S7-300 та електроприводу SIEMENS SINAMICS DCM. Виявлено високу достовірність кореляції кутової швидкості від напруги якоря ($R^2 = 0,8588$) та моменту на валу від струму споживання ($R^2 = 0,8337$) в режимі розгону. В режимі гальмування відповідно $R^2 = 0,9117$ та $R^2 = 0,8865$.

Досліджено механічні параметри міцності перемотуваного паперу та залежності між індексом міцності та механічними параметрами вузла розмотки для дотримання заданого для якісної перемотки натягу. Проведено аналіз статистичних даних за індексом міцності в поздовжньому та поперечному напрямках для одного сорту паперу.

Запропонована система управління натягом двигуна розкату на основі ПІД-регулятора. Вивчені механічні властивості паперу в поздовжньому та поперечному напрямках показують, що у всьому діапазоні їх варіації виконується основна умова міцності $\sigma_{\text{техн}} < [\sigma]$, і відповідно $M_m < [M]$. В системі управління запропонована концепція обмеження робочого моменту для забезпечення натягу замість прямого керування моментом задля забезпечення безпечного процесу перемотки в разі обриву полотна.

Ключові слова ПРС; управління натягом; перехідний процес;

Вступ

Технологія виготовлення паперу вимагає від виробника паперу виробництво в необхідних для ринку розмірах-форматах рулонів, а також з гарантованою якістю паперу по всій намотці рулону. Для забезпечення нормального безперебійного процесу конвертингу (вироблення готової продукції з рулонної сировини (аркуші, серветки, елементи фільтрів, тощо)) та цих вимог якості потрібно організувати процес стабільного натягу, лінійної швидкості перемотки та прорізки готових тамбурів на товарні рулони. Процес перемотки є динамічним, тому система управління має реагувати на всі зміни, забезпечувати стабільний натяг та цілісність паперу в процесі перемотування.

Процеси перемотування є складними нелінійними з широким діапазоном зміни параметрів. Під час перемотування суттєво змінюються такі параметри, як діаметр рулону, кутова швидкість, і як наслідок — масо-інертні показники [1]. Також особливістю паперу є те, що це волокновмістний матеріал, механічні характеристики якого залежать від багатьох параметрів, таких як тип волокон, ступінь помелу, додавання додаткових клейових компонентів, технологічної товщини, та попередньої механічної обробки (каландрування, крепування) [2]—[4]. Для забезпечення стандартизації якості і характеристик, які має отримати вироблений папір, використовуються чотири основні

параметри якості: маса (г/м^2), товщина (мкм), щільність (г/см^3), індекс міцності (Нм/г) [5]. Індекс міцності є тим параметром, згідно з яким можна розрахувати граничну міцність полотна паперу та визначити вимоги для системи керування, які дозволять отримати необхідний стабільний натяг та неруйнування полотна.

Сучасні установки для перемотки та порізки рулонних матеріалів (поздовжньо-різальні стани) складаються з частини намотки (накат), яка має забезпечити стабільну лінійну швидкість намотки після вузла порізки, а також з частини розмотки (розкат), яка має забезпечити потрібний натяг паперу у вузлі розмотки. Розкат може працювати на двох принципах — гальмування тамбуру паперу за допомогою класичного гальма з фрикційними колодками або гальмування за допомогою електричного двигуна, який працює в генераторному режимі. Перший спосіб набагато простіший з точки зору управління, але вимагає додаткового обслуговування. Другий спосіб не вимагає обслуговування, але вимагає складної системи керування, яка можлива в реальних умовах розвитку технічного прогресу. *Об'єктом дослідження* є поздовжньо-різальний стан з розкатом на основі двигуна постійного струму.

Поздовжньо-різальні стани мають забезпечити такі етапи перемотки:

- заправка паперу на низькій швидкості на початку, та перезаправка під час обривів або місць склейки;
- робоча перемотка на максимальній швидкості. Максимальна швидкість стану має у два рази перевищувати швидкість машини виробництва паперу для забезпечення безперервного циклу виробництва;
- плавна зупинка шляхом переходу з робочої швидкості на швидкість заправки в точках обривів і склейок [6]—[7].

Таким чином, до складної динаміки в стаціонарному режимі перемотування додаються два перехідних процеси, які вимагають досліджень та оптимізації.

Сучасні системи автоматизації мають достатній рівень апаратного забезпечення для виконання з високою швидкістю складних математичних алгоритмів. Провідні виробники, такі як SIEMENS, забезпечили можливість виконання будь-яких математичних та алгебраїчних операцій на своїх контролерах, а також для багатьох стандартних алгоритмів та рівнянь розроблено готові бібліотечні блоки, протестовані як в лабораторіях, так і на реальних об'єктах керування [8]—[10]. Як показав досвід реалізації систем управління, універсальним засобом для стабілізації параметрів та оптимізації перехідних процесів є ПД-регулятор, який є досить гнучким та адаптованим елементом управління [11]—[12].

Сучасний електропривод є високо-інтелектуальною системою, яка створює «міст» між програмовано-логічним контролером, який виконує математичні функції і механікою, яка має відпрацювати всі розраховані показники в 100 % реальному механічному еквіваленті. Тому правильно розрахований, підібраний і налаштований комплект електроприводу є однією з головних складових реалізації задачі [13].

Пуско-налагодження електроприводу дозволяє виконати налаштування ланки механічного виконавчого механізму (точність підтримання швидкості, крутного моменту, динаміки перехідних процесів) шляхом конфігурування обладнання, яке містить у собі спеціалізовану запатентовану математичну базу, яка постійно розвивається виробником, що також дозволяє науковцям і інженерам концентруватися на глобальних математичних моделях складного технологічного обладнання, використовуючи електропривід, як типову структурну ланку системи зі стандартним інтерфейсом обміну інформацією. Також крім функції керування сучасний електропривід дозволяє визначити велику кількість основних і похідних параметрів механічної системи, які можна використовувати в системі керування [14]—[17].

Дослідження динаміки роботи реального поздовжньо-різального стану виконано на базі верста- та ПРС-501 та його системи керування на базі обладнання для системи управління SIEMENS SIMATIC S7-300 та електроприводу SINAMICS DCM [18].

Метою роботи є дослідження динаміки перехідних процесів (розгін-гальмування) роботи поздовжньо-різального стану, оцінки умов витримки стабільного натягу та лінійної швидкості перемотки на вузлі різання.

Матеріали і методи досліджень

Для оцінювання перехідних процесів проведено експеримент з вимірюванням параметрів двигуна розкату на режимах розгону та гальмування.

Дані вимірювань показані на графіках (рис. 1—4).



Рис. 1. Графік змін швидкості та напруги якоря під час розгону

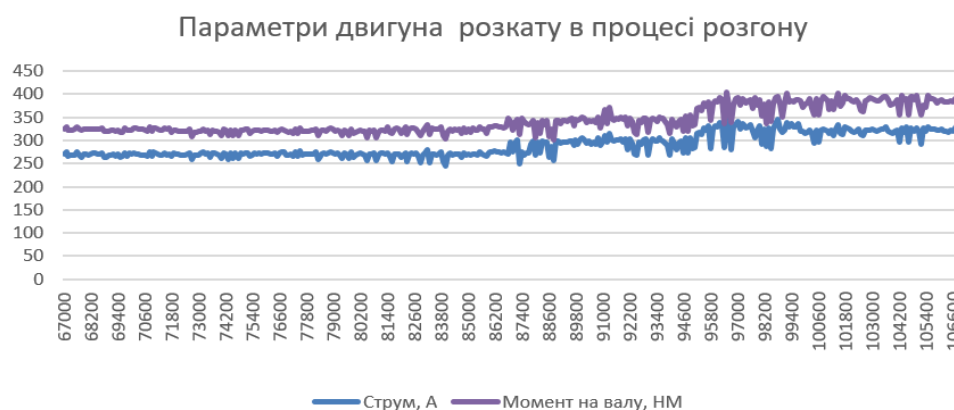


Рис. 2. Графік змін моменту та струму під час розгону

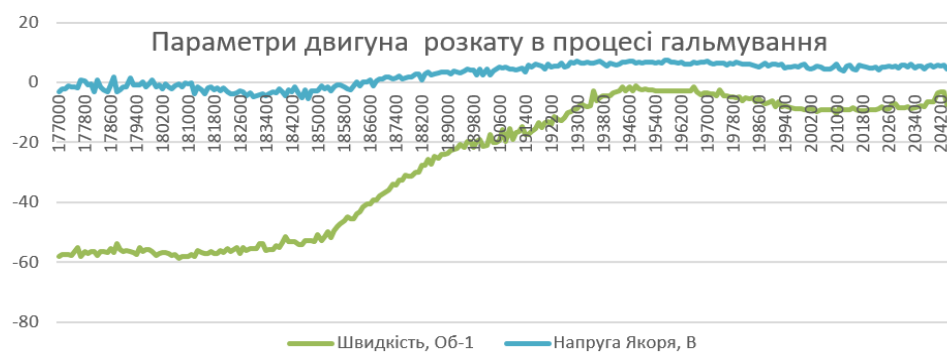


Рис. 3. Графік змін швидкості та напруги якоря під час гальмування

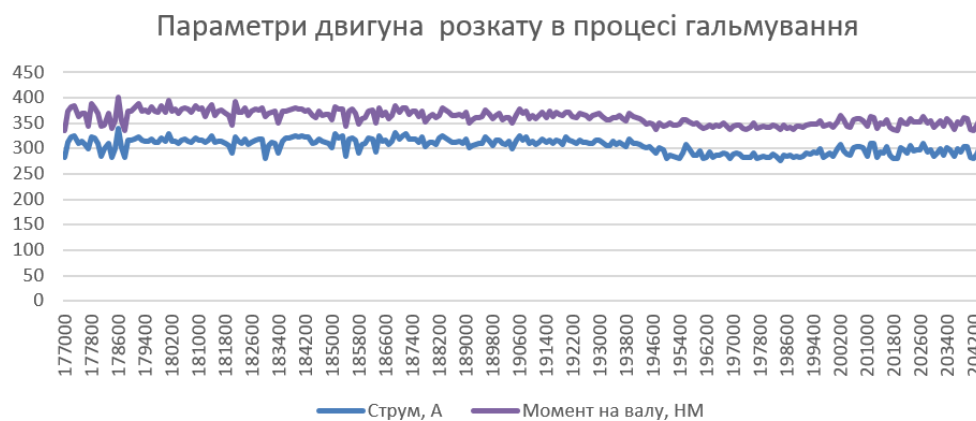


Рис. 4. Графік змін моменту та струму під час гальмування

Візуально відпрацювання цих режимів супроводжувалося плавною зміною швидкості та стабільного натягу без пошкодження паперового полотна.

Ці графіки показують лінійну залежність моменту на валу двигуна від струму якоря та відображують перехідний процес по швидкості з перерегулюванням, а також роботу двигуна в генераторному режимі (напруга якоря на робочій швидкості близько нуля). Ці залежності показано на графіках рис. 5—7.



Рис. 5. Кореляція параметрів в режимі розгону



Рис. 6. Кореляція моменту на валу та струму споживання в режимі гальмування

Графіки на рис. 5, 6 показують високу достовірність кореляції кутової швидкості від напруги якоря ($R^2 = 0,8588$) та моменту на валу від струму споживання ($R^2 = 0,8337$) в режимі розгону. В режимі гальмування відповідно $R^2 = 0,9117$ та $R^2 = 0,8865$.

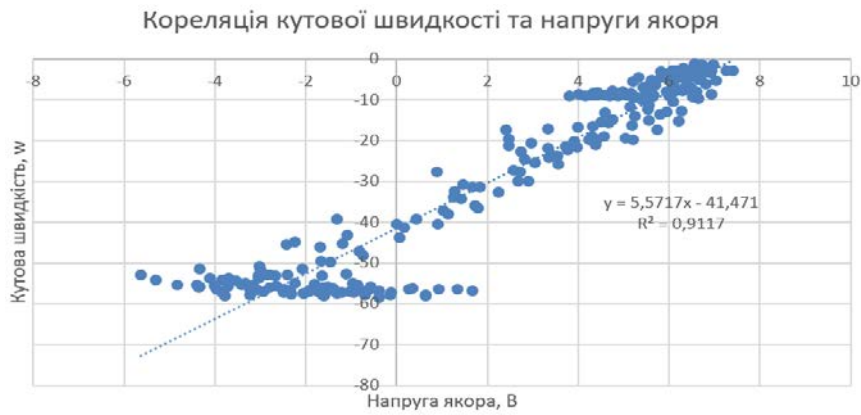


Рис. 7. Кореляція кутової швидкості в режимі гальмування

Блок схема системи керування натягу, яка забезпечувала відпрацювання цього перехідного процесу, показана на рис. 8.

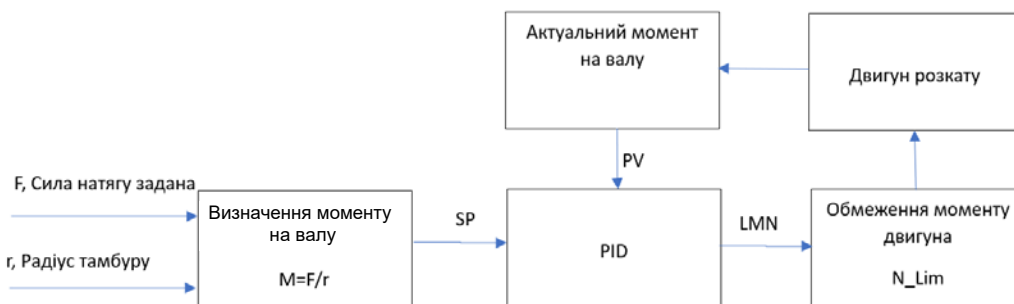


Рис. 8. Структурна схема керування натягом двигуна розкату

Базово система виконана так, що двигуни намоту і розкату обертаються на режимах, що забезпечують постійну лінійну швидкість полотна. Лінійна швидкість полотна намоту пропорційна швидкості двигуна, а лінійна швидкість полотна розкату пропорційна швидкості обертання двигуна та обернено пропорційна до поточного значення радіуса тамбура (розмотуваного рулону паперу). Вхідними даними для регулювання є задане оператором значення натягу паперу та поточний радіус тамбура. Згідно з цими даними виконується розрахунок необхідного крутного моменту на валу блоком обчислення і вже крутний момент на валу є уставкою для блока ПІД. Іншим вхідним параметром ПІД є актуальний момент на валу, який вимірюється в електроприводі і передається в систему керування. Далі ПІД на основі підібраних під час налагодження машини коефіцієнтів обчислює керувальний параметр LMN, інформація про який надходить на вхід блока обмеження крутного моменту двигуна. Обмеження крутного моменту замість прямого керування використовується для того, щоб у випадку обриву паперу не відбувалося неконтрольованого небезпечного розмотування тамбура. Під час замкнутої паперовим полотном системи виконується обмеження натягу, а під час обриву — двигуни обертаються на заданій швидкості, пропорційній лінійній швидкості переміщення полотна паперу.

Таким чином отримуємо стабілізацію натягу шляхом підтримання необхідного моменту на валу в залежності від поточного радіусу розкату на режимах постійної швидкості, а також перехідну характеристику швидкості яка підтримує параметр моменту на валу в процесах розгону і гальмування, які не пошкоджують паперове полотно.

Також з результатів експерименту випливає, що на низькій заправній швидкості чітко видно протилежну ЕДС на якорі двигуна для забезпечення натягу. На робочій швидкості видно, що ЕДС практично наближається до нуля. Моментотворювальний струм при цьому лишається стабільним і пропорційним моменту на валу двигуна.

Схема поздовжньо-різального стану показана на рис. 9.

Оцінювання натягу паперу виконувалась після валу заведення паперу (1).

Для оцінки механічних характеристик паперу отримано з лабораторії заводу дані щодо індексу міцності паперу, на основі якого виконувалися вимірювання динамічних характеристик приводу розмотування.

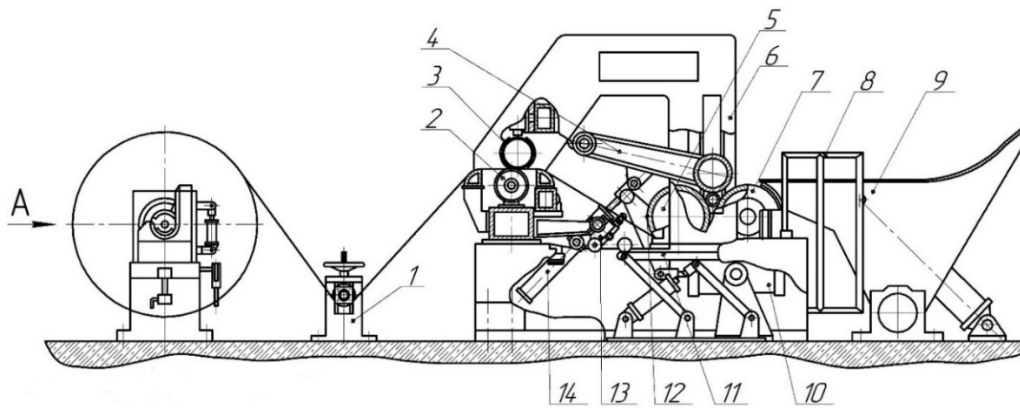


Рис. 9. Схема поздовжньо-різального стану: 1 — вал заправлення паперу, 2 — вал порізки, 3 — ножі, 4 — важіль притискування ножів, 5, 7 — вали намоту, 6 — рама, 8 — захисні огороження, 9 — механізм знімання порізаних рулонів, 10, 11, 12, 13, 14 — пневмоциліндри притискування валів після заправлення

На рис. 10—11 показана статистична вибірка індексу міцності тестового паперу в «Машинному» МН (поздовжньому) та поперечному ПН напрямках. А також залежність цих характеристик.

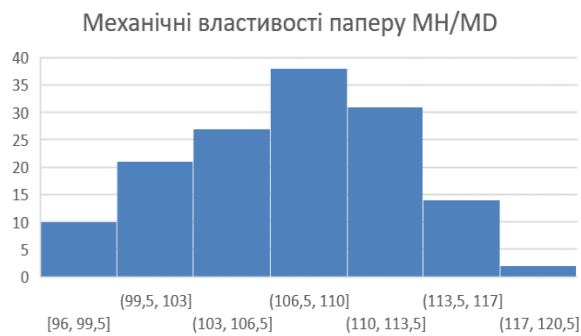


Рис. 10. Індекс міцності в «машинному» напрямку



Рис. 11. Індекс міцності в поперечному напрямку

Індекс міцності визначається за формулою

$$\sigma_{\omega}^T = 1000 \cdot \sigma_T^b / w, \quad (1)$$

де, σ_T^b — максимальна сила натягу до розриву; w — маса квадратного метру паперу (г/м^2).

Максимальна сила натягу до розриву обчислюється за формулою

$$\sigma_T^b = \bar{F}_T / b, \quad (2)$$

де $\bar{F}_T$ — зусилля розриву, Н; b — ширина рулону, мм.

Отже, знаючи потрібний індекс міцності для конкретного типу картону, можна визначити граничну силу натягу

$$\bar{F}_T = (w \cdot \sigma_T^w \cdot b) / 1000, \quad (3)$$

де σ_T^w — індекс міцності, Нм/г.

Розрахуємо силу обриву для експериментального паперу з індексом міцності 107 Нм/г, масою 80 г/м^2 та шириною рулону 1800 мм.

$$\bar{F}_T = (80 \cdot 107 \cdot 1800) / 1000 = 15408 \text{ Н}. \quad (4)$$

Момент на валу, необхідний для забезпечення натягу, обчислюється за формулою

$$M = \bar{F} \cdot r, \quad (5)$$

де $\bar{F}$ — сила натягу, r — радіус розкату.

Головною умовою стабільного процесу перемотування без руйнування паперу є умова меншого значення натягу

$$\vec{F} < \vec{F}_T. \quad (6)$$

Відповідно до експериментальних даних, для певного сорту паперу робоче зусилля має бути

$$\vec{F} < 15408 \text{ Н}. \quad (7)$$

І відповідно робочий крутний момент на валу двигуна має бути

$$\vec{M} < \vec{M}_T. \quad (8)$$

Висновки

Розроблено, налагоджено та впроваджено у виробництво електронну систему управління поздовжньо-різального стану.

1. Побудовано модель процесу управління динамікою поздовжньо-різального стану на всіх режимах роботи: розгону, робочих режимах та в режимі гальмування.

2. Отримані параметри струму $I(t)$, напруги $U(t)$ та механічні параметри $M(t)$ і $w(t)$ на всіх режимах роботи.

3. Виявлено тісну кореляцію між $w(t) = \psi [U(t)]$ та між $M(t) = \psi [I(t)]$.

4. Реалізована структурна схема керування натягом паперу двигуном розмотування повністю задовольняє технологічні вимоги процесу перемотування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] І. Г. Грабар, О. Є. Жуковський, і Сенн Філіпп, «Моделювання динаміки роторів змінної маси технологічних машин», *Вісник Хмельницького національного університету, серія: Технічні науки*, вип. 323 (4/2023), с. 73-81, 2023.
- [2] Держстандарт України, ДСТУ 3467-96 «Папір конденсаторний. Загальні технічні умови», 1998
- [3] О. М. Мовчанюк, і А. А. Остапенко, *Технологія приготування паперової маси*. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
- [4] В. А. Осика, Л. А. Коптюх, В. О. Комаха, і О. С. Шульга, «Формування якості паперу-основи для виготовлення водонепроникних пакувальних матеріалів», *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3/2019.
- [5] ISO 1924-2:2008, *Paper and board — Determination of tensile properties*, 2008.
- [6] Jurgen Blechschmidt, und Hans-Joachim Naujock, *Taschenbuch der Papiertechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2021.
- [7] Jurgen Blechschmidt, Sabine Heinemann, und Hans-Joachim Naujock, *Papier-verarbeitungs-technik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.
- [8] Hans Berger, *Automation with STEP7 LAD and FBD Programs*, 2nd revised edition, 2001.
- [9] SIEMENS AG, *List of System Instructions S7-300 CPU 31xC, CPU 31x, IM 151-7 CPU, BM 147-1 CPU, BM 147-2 CPU Edition 12/2003*.
- [10] SIEMENS AG, *SIMATIC NET PROFINET Networks Manual*, 2014.
- [11] SIEMENS AG, “Standard PIDControl,” User's Guide 03/99,” Release 01.
- [12] SIEMENS AG, *SIMATIC-Based Control Practical Guide to SIMATIC-Based Control and SIMATIC PCS7 by Jürgen Müller from 2nd edition*, 2002.
- [13] SIEMENS AG, *Motor configuring with SIZER and taking account of the utilization of the deployed third-party motor Retrofit – replacement of a third-party motor FAQ*, January 2012.
- [14] SIEMENS AG, *SINAMICS DCM Parameterization Manual Edition*, 02/2015.
- [15] SIEMENS AG, *SINAMICS DCM Control module operating instructions*, 02/2015.
- [16] SIEMENS AG, *SINAMICS DCM DC Converter, Control Module Supplement for Catalog D 23.1*, 2014.
- [17] SIEMENS AG, *SINAMICS S120 Commissioning Manual with STARTER Commissioning Manual Edition*, 11/2017.
- [18] М. Малин, *Інструкція з експлуатації ІПС-501*, ПАТ «Вайдманн-МПФ», 2014.
- [19] І. Г. Грабар, *Термовживаційний аналіз і синергетика руйнування*, Житомир ЖІТІ, 2002, 312 с.
- [20] І. Г. Грабар, *Хаос*. Житомир, 2019.
- [21] І. Г. Грабар, О. Є. Жуковський, і А. М. Талько «Модель регулювання кінематичних та динамічних параметрів технологічних машин», *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, вип. 2 (106), с. 252-268, 2024.
- [22] I. G. Grabar. *Synthesis of multifractals*. Zhytomyr, Ukraine: Polissia National University, 2023, 200 p.
- [23] I. G. Grabar, and O. I. Grabar, “Influence of the stationary and perturbed state of the central force field on the fractal characteristics of the attractor,” *Scientific Horizons*, no. 23 (11), 39. 52, 2020. [https://doi.org/10.48077/scihor.23\(11\).2020.39-52](https://doi.org/10.48077/scihor.23(11).2020.39-52).
- [24] I. G. Grabar, and O. I. Grabar, *Fractal ornaments: design, properties, 3D production*. Zhytomyr, Ukraine: Polissia National University, 2021, 308 p.
- [25] I. G. Grabar, O. I. Grabar, Y. O. Kubrak, and M. M. Marchuk, “Chaos and a quantitative modeling of the kinetics of phase transitions on the final measure areas,” *10th International Conference on Chaotic Modeling and Simulation, CHAOS 2017; Casa Convalescencia of the Universitat Autònoma de Barcelona; Barcelona; Spain; 30 May 2017 through 2 June 2017; Code 151090, 277{288}*, 2017.
- [26] І. Г. Грабар, *Термоактиваційний аналіз та синергетика руйнування*. Житомир: ЖІТІ, 2002, 312 с.
- [27] «Термоактиваційний аналіз руйнування ОЦК і ГЦК металів та концепція взаємозв'язку параметрів кривої втоми», *Проблеми міцності*, № 11, 1989.

Грабар Іван Григорович — д-р техн. наук, професор кафедри агроінженерії та технічного сервісу, e-mail: ivan-grabar@ukr.net ;

Жуковський Олександр Євгенович — аспірант кафедри агроінженерії та технічного сервісу, e-mail: olexandr.zhukovsky@encon.com.ua .

Поліський національний університет, Житомир

I. G. Grabar¹
O. Ye. Zhukovsky¹

Modeling the Process of Controlling the Dynamics of a Longitudinal Cutting Mill

¹Polissia National University, Zhytomyr

The paper considers the issues of paper rewinding processes and compliance with technological parameters to ensure the quality of this process. A review of the components of the modern elemental mechanical and electronic base for the design and creation of machines that perform the rewinding processes of various materials and paper in particular is carried out. Attention is paid to the specific features of using the programmable logic controllers and electric drives for the design of rewinding machines.

The kinetics of electrical (voltage and current) and mechanical (rotor angular velocity and shaft torque) of the PRS-501 machine tool were experimentally investigated in the transient technological processes of acceleration and braking when switching from refueling to operating speed

Based on the previously obtained dynamic model, a control system is proposed, developed on the basis of SIEMENS SIMATIC S7-300 and SIEMENS SINAMICS DCM electric drive. High reliability of the correlation of angular velocity from armature voltage ($R^2 = 0.8588$) and shaft torque from consumption current ($R^2 = 0.8337$) in acceleration mode was revealed. In braking mode, respectively, $R^2 = 0.9117$ and $R^2 = 0.8865$.

The mechanical parameters of the strength of the paper being rewound and the dependence between the strength index and the mechanical parameters of the unwinding unit to maintain the tension specified for high-quality rewinding were investigated. Statistical data on the strength index in the longitudinal and transverse directions for one grade of paper were analyzed.

A tension control system for the unwinding motor based on a PID controller was proposed. The mechanical properties of the paper in the longitudinal and transverse directions were studied and show that the basic strength condition $\sigma_{techn} < [\sigma]$, and, respectively $M_t < [M]$ is fulfilled in the entire range of their variation. The control system proposes a concept of limiting the operating torque to ensure tension instead of direct torque control to ensure a safe rewinding process in the event of a web break.

Keywords: LCM; tension control; transition process.

Grabar Ivan G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Agricultural Engineering and Technical Service, e-mail: ivan-grabar@ukr.net ;

Zhukovskyi Oleksandr Ye. — Post-Graduate Student of the Chair of Agricultural Engineering and Technical Service, e-mail: olexandr.zhukovsky@encon.com.ua