

**Грабар І. Г., д.т.н., професор** (<https://orcid.org/0000-0002-7193-6960>),  
**Жуковський О. Є., аспірант** (<https://orcid.org/0009-0006-1870-1341>),  
**Талько А. М., асистент** (Поліський національний університет,  
[ivan-grabar@ukr.net](mailto:ivan-grabar@ukr.net), [olexandr.zhukovsky@encon.com.ua](mailto:olexandr.zhukovsky@encon.com.ua),  
[Andriy.talko@encon.com.ua](mailto:Andriy.talko@encon.com.ua))

## **МОДЕЛЬ РЕГУЛЮВАННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН**

На основі дослідження динаміки параметри роторів змінної маси намотувально-розмотувальних машин в нелінійній постановці запропоновано та реалізовано модель регулювання параметрів кінематики та динаміки. Ця робота дозволила створити програмно-апаратний комплекс динамічного управління та підтримки заданих параметрів розмотувально-намотувальних технологічних машин в режимі онлайн. Було розглянуто класичні методи управління перемоткою та на основі недоліків було проведено оптимізацію системи управління для забезпечення регулювання натягу без використання додаткового валу вимірювання натягу, а шляхом математичної обробки параметрів електроприводу та генерації параметрів керування. Був розроблений алгоритм роботи системи, який забезпечував плавний набір необхідного натягу, що не дає можливості розриву матеріалу, що перемотується, в циклах старту-зупинки. Розробка системи управління виконана на обладнанні компанії SIEMENS, а саме реалізація математичної моделі на програмовано-логічному контролері SIEMENS SIMATIC, а частина управління двигуном постійного струму на перетворювачі SIEMENS SINAMICS DCM. Проведено комп'ютерне тестування моделі та розроблено систему автоматичного управління параметрами конкретної технологічної машини – продольно-різального стану ПРС5-201. Показано, що результати добре співпадають з експериментальними даними, було виконано оцінку зміни динамічних параметрів на різних швидкостях роботи, а також на перехідних режимах з різною зміною динаміки. Розробка впроваджена на кількох підприємствах паперової галузі України та Європи і може бути цікава для модернізації інших перемотуючих машин, в яких критичний контроль натягу матеріалу.

**Ключові слова:** технологічна машина; регулювання параметрів; нелінійна динаміка; динамічні параметри.



**Вступ.** Сучасні переробні технології використовують високопродуктивні намотувально-розмотувальні машини для компактного пакування та переробки стрічок, полос, листів, тросів, канатів, тканин і нетканих матеріалів тощо. Висока продуктивність вимагає максимально можливих швидкостей процесу намотування-розмотування, що, в свою чергу, обмежується механічними характеристиками намотуваних матеріалів. З іншої сторони, наявність динамічних моделей цих процесів сприяє підвищенню продуктивності технологічних процесів, а управління переходом на жорсткі режими з обмеженими прискоренням дозволяє не перевищувати динамічні навантаження та граничну межу міцності намотуваного матеріалу, що сприяє також покращує якість виконання технологічних операцій. Крім цього, максимально можлива стабільність натягу матеріалу, що перемотується, дозволяє стабілізувати локальні деформації на необхідному рівні.

**Аналіз публікацій.** Регулюванню кінематичних та динамічних параметрів в технологічних машинах в останнє десятиріччя приділяється велика кількість наукових досліджень. Аналіз частини інноваційних підходів до розв'язку цієї задачі наведено в [1–11].

Так, в [1] досліджено динамічне моделювання та робастне керування паралельною кінематичною машиною (ПКМ). Шляхом введення коефіцієнта розподілу маси спрощені динамічні рівняння були виведені за принципом віртуальної роботи і перевірені на віртуальному прототипі за допомогою програмного пакету ADAMS. На основі створеної моделі на ПКМ 3-PRC було апробовано три регулятори динаміки. Моделювання за допомогою комбінації MATLAB/Simulink і ADAMS показує, що ефективність керування ні регулятора зворотної динаміки, ні робастного регулятора зворотної динаміки не є задовільною за наявності параметричних невизначеностей в динаміці ПКМ. Навпаки, регулятор на основі пасивної робастної схеми керування є більш придатним для слідкуючого керування ПКМ як з погляду ефективності керування, так і процедур проєктування регулятора. Дані результати забезпечують надійну основу як для проєктування механічної системи, так і для проєктування системи керування ПКМ з 3-ПРК.

В [2] показано, що динамічне моделювання є всеосяжною темою для систем з багатьма тілами. Для паралельних механізмів в літературі вже запропоновано велику кількість підходів, однак все ще існує потреба у спрощенні та систематизації процедур моделювання, що полегшить генерування та модифікацію моделі,

досліджуючи внутрішню модульність цих систем. Методологія модульного моделювання (МММ), яку нещодавно було запроваджено для загальних систем з багатьма тілами, має на меті покращити процес отримання моделей шляхом використання бібліотек математичних моделей, вже доступних для механічних підсистем (модулів), разом з обчислювальними інструментами загального призначення. Враховуючи особливу топологію паралельних механізмів, у цій статті представлено новий ієрархічний метод, заснований на МММ, для отримання математичних моделей для цих систем.

В [3] для підвищення точності відстеження складних зовнішніх сил у робочому середовищі в механізмах відстеження широко застосовуються алгоритми керування на основі динамічних моделей. Кінематична модель отримана шляхом диференціального відображення моделей топології на основі скінченних і миттєвих гвинтів (FIS). Відповідно до принципу віртуальної роботи будується динамічне рівняння. Щоб зменшити вартість обчислень на практиці, для динамічної ідентифікації сформульовано лінійну модель з інерційними параметрами та параметрами тертя. Застосовано метод прямої ідентифікації, і всі параметри отримано одночасно. Проведено експерименти, які показують точність та ефективність результатів ідентифікації. В роботі надано стислий метод побудови моделей швидкостей і прискорень компонентів без виснажливого аналізу, розроблено повну динамічну модель переобтяженого паралельного механізму, що слідкує та здійснено практичну динамічну ідентифікацію, яка є компромісом між точністю та ефективністю.

В [4] запропоновано новий вид руху з трьома поступальними і двома обертаннями ступенями свободи. Синтезовано послідовні кінематичні ланцюги (ПКЛ), які генерують запропоновані рухи. Вони суттєво відрізняються від запропонованих раніше моделей. Ця робота надає теоретичні основи для дослідження рухів, що генеруються складними динамічними системами, а також моделей руху зі змінними напрямками та центрами обертання.

В [5] представлено дослідження п'яти алгоритмів оптимізації на основі імітаційного моделювання для задач робототехніки, де потрібні надійні рішення. Запропоновано методи оптимізації на трьох прикладах використання. Досліджено динамічні симуляції для моделювання сценаріїв використання, які охоплюють найважливіші фізичні аспекти. Зосереджено увагу на стійкості до критичних системних невизначеностей, що важливо в промислових умовах. Також обговорюється вибір параметризації та цільових оцінок,



оскільки цей вибір має певний вплив на продуктивність алгоритмів оптимізації. Для всіх задач запропоновано реалістичні рішення, готові до тестування в реальних умовах.

В [6] представлено підхід, який дозволяє враховувати як кінематичні, так і динамічні властивості паралельних кінематичних машин. На основі результатів попередньої кінематичної оптимізації розроблено модель з довільними вхідними параметрами. Забезпечується повна кінематична функціональність використовуваних стійок і шарнірів. Розроблено алгоритм оптимізації, що може впливати на довільні вхідні параметри моделі в процесі оптимізації. Таким чином, модель автоматично оптимізується для певного процесу обробки та/або динамічної поведінки. Цю процедуру продемонстровано на прикладі дельта-структури робота.

В [7] показано, що динамічні моделі роботи технологічних машин, зокрема металорізальних верстатів, має враховувати чинники вібрацій. Вібрація верстата спричиняє нестабільність обробки, шорсткість поверхні та знос інструменту в процесах різання металу. Відповідно до різних механізмів виникнення, вібрації можна класифікувати на регенеративні вібрації, вібрації від перемикання режимів, фрикційні вібрації та силово-теплові вібрації. Під час процесу обробки може виникати як вібрація зв'язку режимів, так і регенеративна вібрація, залежно від конкретного верстата та умов обробки. Регенеративне биття виникає локально на заготовці або ріжучому інструменті. Бовтанка зв'язку режимів відбувається глобально, включаючи всю конфігурацію. Це дослідження розширює аналіз стійкості до вібрацій до роз'єданого паралельного кінематичного верстата (ПКМ). Вібраційна модель ПКМ фокусується на регенеративних коливаннях, тоді як роз'єднана конструкція машини пропонується для усунення будь-яких проявів коливань зв'язку режимів. Отримано вібраційну модель ПКМ, в якій розглядається динамічна поведінка системи шпindelь/державка/інструмент. Розглянуто графіки стійкості до вібрацій для різних параметрів обробки, спеціально розробленого для використання на верстатах.

В [8–11] наведено аналіз процесів розвитку діджиталізації відносно суспільно корисних змін та розвитку технічного прогресу [8]. Показано, що ідеологія діджиталізації будується на трьох основних етапах:

- Впровадження технології «Інтернет речей» (Internet of Things, IoT) які забезпечують збір інформації про стан і роботу машин і механізмів і передачу їх до глобальної мережі Internet.

- Впровадження хмарних технологій для збереження цих даних, та розробка методів обробки цих даних «Big data», які являють собою величезні структуровані масиви інформації.

- Створення «цифрових двійників» процесів, машин і механізмів на основі цих накопичених і оброблених даних. Створений таким чином «двійник» дозволяє проводити віртуальні зміни в процесах, моделювати їх без фізичного обладнання, і, фінально, після оцінки результатів та їх ефективності приступати до змін (модернізацій) у процесах [9].

Як показує наш аналіз, всі механічні привідні системи можна звести до стандартних моделей, так званих «технологічних об'єктів». Ці технологічні об'єкти мають набір параметрів, характеристик стану та керуючих впливів – які дозволяють виконувати керування на логічному рівні. Зв'язок між такою логічною моделлю і фізичним об'єктом руху виконує обладнання, спроектоване за сучасними технологіями управління, які виключають потребу в необхідності глибокого налаштування проміжних елементів системи (система комунікації, електропривід тощо).

Лідерами в провадженні таких рішень є компанії SIEMENS (Німеччина), Omron (Японія), Rockwell Automation (США). Концептуально в усіх компаній однаковий підхід до вирішення задач управління рухом, який полягає у створенні лінійки обладнання, яке вертикально інтегрується між собою та дозволяє створити програмно-технічний комплекс, на вершині якого – інструмент для створення/конфігурації і керування технологічним об'єктом, а в основі – механізм з системою керування, який фізично виконує необхідні рухи. Прикладами таких систем віртуалізації є наприклад як професійна система Siemens NX, так і система для навчання Factory I/O компанії RealGames (ця система є в навчальному класі ITM School Поліського національного університету). Використання таких систем віртуалізації дозволяє дослідити специфіку роботи механізмів, відслідкувати аварійні ситуації та значно скоротити час реального пусконаладження та скоротити матеріальні та нематеріальні затрати.

Такі системи складаються з чотирьох основних компонентів:

1. Процесор, в якому виконується математична модель технологічних об'єктів.
2. Система зв'язку з виконавчим електроприводом (наразі використовуються основні механізми – аналогове/дискретне керування, частотне керування, цифрова мережа)

3. Привідний модуль який створює фізичні контролюючі сигнали для виконавчого механізму.
4. Виконавчий механізм (двигун змінного, постійного струму, пневматичний привід тощо).

Розглянемо детальніше основні види технологічних елементів на основі бібліотеки.

В більшості сучасних технологічних машин, в змаганні за максимальну продуктивність, в критерії побудови динамічних моделей необхідно вводити параметри міцності та довговічності: як деталей та вузлів технологічних машин, так і параметрів міцності оброблюваної сировини [12]. Зокрема, ця задача особливо актуальна для моделей динаміки розмотувально-намотувальних технологічних машин.

**Постановка задачі.** Розглянемо схематично структуру класичної перемотуючої системи.

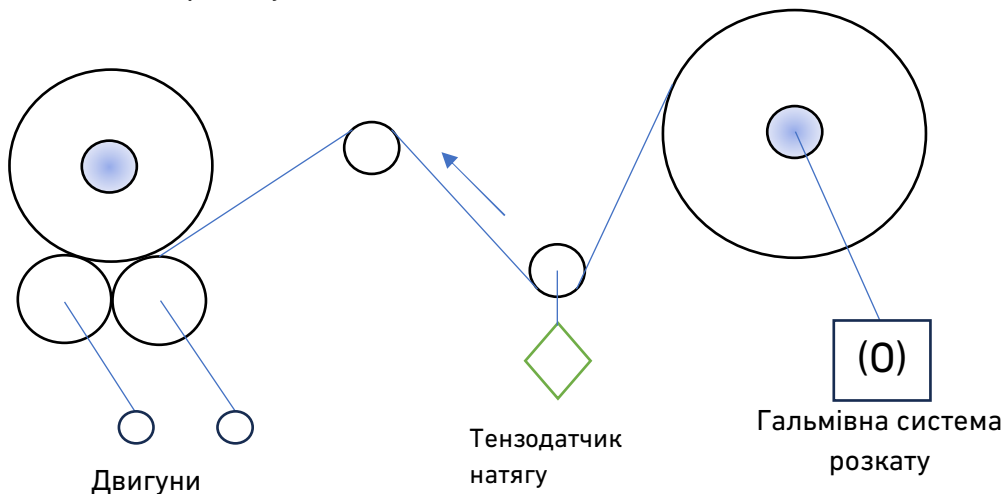


Рис. 1. Структурна схема перемотуючої системи зі стабілізацією натягу за допомогою гальмівної системи розкату

Рулон матеріалу для перемотки встановлюється на тамбур розкату, який механічно під'єднується до пневматичної гальмівної муфти. Матеріал проводиться через ролики на вузол намотки (накату), який забезпечує постійну лінійну швидкість на поверхні матеріалу і виконує намотку за допомогою накатних валів. Один з роликів під'єднаний до датчика натягу. Наступна за роликом ділянка є ділянкою стабільного натягу матеріалу (відмічена стрілкою).

**Результати дослідження.** Система стабілізації натягу дозволяє використати закони ПІД регулювання для підтримки натягу. Функціональна схема стабілізації натягу вказана на рис. 2.

Тензодатчик натягу вимірює фактичну силу натягу полотна матеріалу. Різниця між заданим і фактичним натягом ідентифікується, як помилка, і передається ПІД регулятору, який згідно з налаштуваннями формує сигнал керування клапаном гальмівної муфти, який або затримує, або послаблює вал з тамбуром розмотки, чим безпосередньо впливає на фактичний натяг полотна. Задача ПІД регулятора полягає в відпрацюванні такого керуючого сигналу, щоб звести значення помилки до нуля.

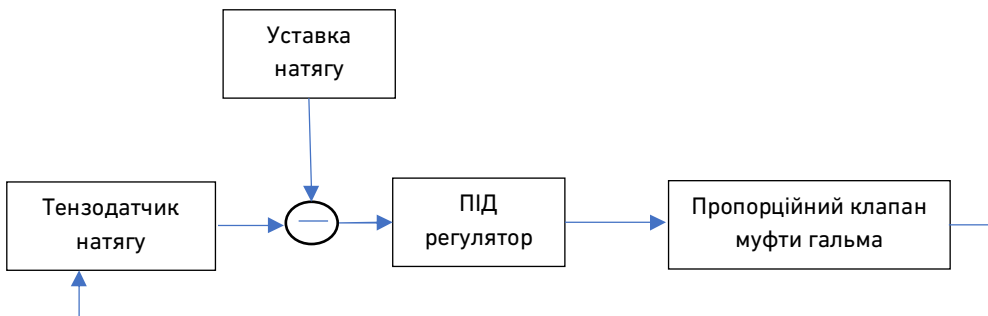


Рис. 2. Функціональна схема стабілізації натягу на основі ПІД регулятора

Така система є простою, надійною, має безліч практичних застосувань, але має головний недолік – постійний нагрів гальмівної муфти і зношування фрикційних накладок. Цей недолік вимагає постійного штатного обслуговування вузла гальмування і заміни витратних матеріалів.

Розвиток сучасних систем керування електродвигунами дозволяє уникнути вузла механічного гальмування та потреби фактично вимірювати натяг за допомогою ведучого ролика, що також конструктивно ускладнює систему.

Сучасні системи електроприводу зі зворотним зв'язком, коли мікропроцесорна система має як розрахункові параметри обертання електрично рушійного поля двигуна, так і фактичне положення ротора від енкодера, встановленого на валу, можуть фактично вираховувати механічний момент на валу двигуна, а також у випадку необхідності виконувати його регулювання.

З використанням такої мікропроцесорної системи структурна схема перемотуючого пристрою буде мати вигляд на рис. 3.

Сила натягу  $F$  залежить від радіуса рулону  $r$  та обертового моменту на валу  $M$

$$F=f(r, M). \quad (1)$$

Якщо нам потрібно стабілізувати  $F=\text{const}$ , ми можемо перетворити цю функцію до вигляду

$$M=f(r, F). \quad (2)$$

Таким чином, керуючи обертовим моментом на валу двигуна розкату згідно з діаметром тамбура, ми отримуємо фактично стабілізований натяг матеріалу під час розмотки.

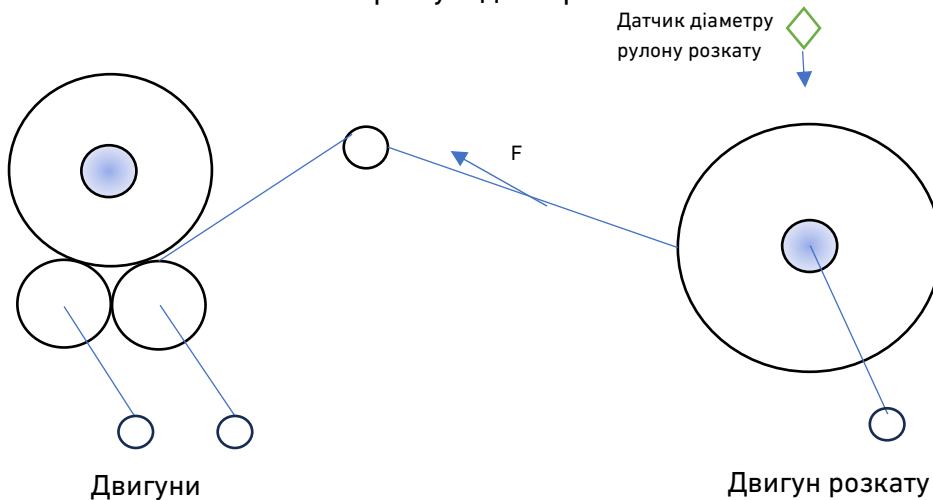


Рис. 3. Структурна схема перемотуючої системи зі стабілізацією натягу за допомогою двигуна

У випадку використання мотор-редукторів в таких системах в функціях обчислень необхідно використовувати передаточні дані редукторів.

Дослідження принципу керування натягом на основі двигуна розкату було виконано на продольно-різальному стані ПРС5-201 виробництва заводу «Іжважмаш». Даний стан був розроблений на основі двигунів постійного струму, тому, виходячи з економічних можливостей модернізації, на ньому були встановлені сучасні мікропроцесорні електроприводи SIEMENS SINAMICS DCM, а існуючі двигуни постійного струму були дооснащені датчиками швидкості (енкодерами).

Серія SINAMICS DCM охоплює широкий діапазон двигунів постійного струму різних значень струму та напруги. Серія блоків призначена для підключення до трифазної мережі. Крім того, блоки також можуть бути підключені до однофазної мережі живлення з номінальним постійним струмом включно до 125 А. Серія електроприводу має гнучку можливість розширення функціональності та продуктивності. Широкий асортимент продукції та безліч варіантів дозволяють оптимально адаптувати перетворювач постійного струму до вимог замовника – як технічно, так і економічно. Тип і кількість інтерфейсів, а також обчислювальної



продуктивності та швидкості, виконується шляхом вибору між Standard CUD, та Advanced CUD або їх комбінацією. Надійність установки та системи зростають завдяки можливості швидкої і простої заміни компонент. Змінні компоненти розроблені таким чином, щоб вони швидко замінювались та не вимагали повної реконфігурації.

Структурна схема електропривода розкату на базі SINAMICS DCM наведена на рис. 4. Цю структурну схему розроблено на основі програмного забезпечення для конфігурування електропривода SIEMENS STARTER.

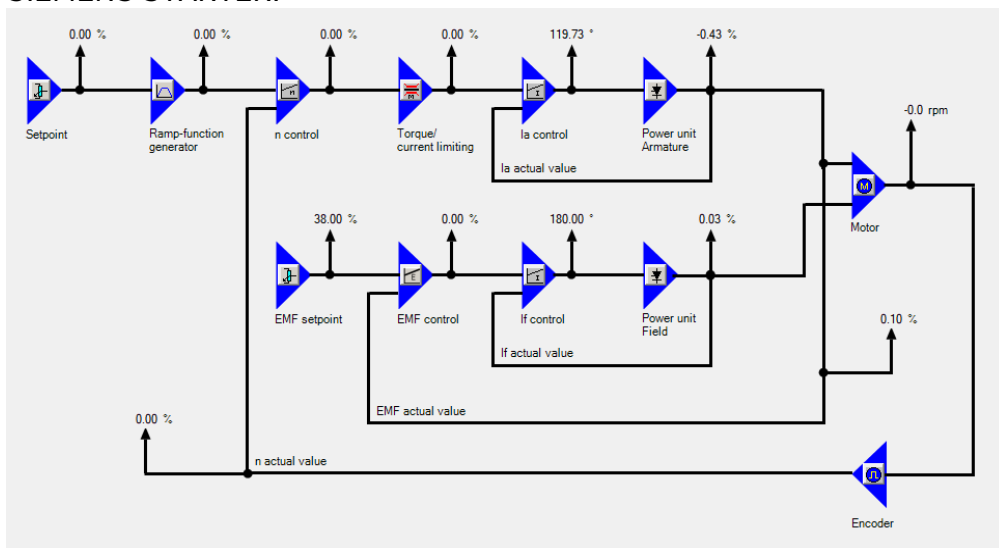


Рис. 4. Структурна схема електропривода розкату на базі SINAMICS DCM

На цій схемі зображено систему управління двигуном із замкнутим контуром, де на блок управління швидкістю «n\_control» приходять сигнали заданої швидкості «Setpoint» та зворотний зв'язок «Encoder».

Необхідний контроль моменту на валу виконується в блоці «Torque/current limiting».

Нижче наведена розгорнута структурна схема «Torque/current limiting» в частині регулятора моменту на валу двигуна в перетворювачі SIEMENS SINAMICS DCM.

Для підтримки необхідного моменту мікропроцесорній системі потрібно задати потрібний момент для підтримки. Цей параметр задається в полі (1) по протоколу Profidrive. За потреби цей параметр може бути змаштабований згідно з лінійною функцією.

Режим керування вмикається дискретним параметром в полі (1) по протоколу Profidrive. Цей параметр переводить керування

двигуном з режиму підтримування швидкості в режим підтримування заданого моменту.

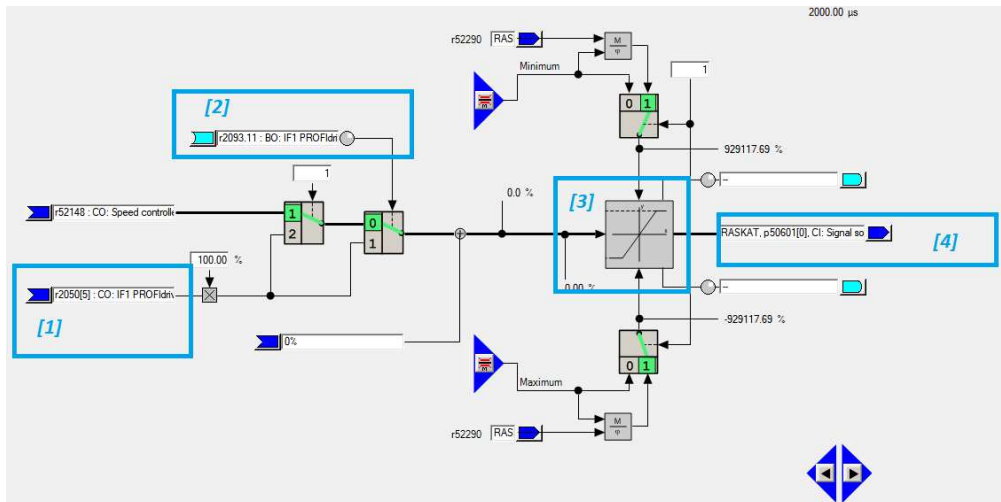


Рис. 5. Структурна схема регулятора моменту на валу

Далі блок (3) виконує розрахунок обмеження швидкості обертання двигуна відносно максимальної швидкості, щоб отримати необхідний момент на валу – і надає цю інформацію як параметр (4) для силової електроніки керування двигуном.

Логіка параметра роботи в режимі обмеження моменту (2) має враховувати його деактивацію випадку обриву полотна, оскільки втрата натягу призведе до самовільного розкручення двигуна до максимальної швидкості, що є аварійною ситуацією. Тому в цій ситуації максимальна швидкість двигуна також є величиною змінною і розраховується для забезпечення заданої лінійної швидкості перемотки залежно від поточного значення діаметра рулону тамбура.

Загальне керування у вигляді послідовності запуску/зупинки, розрахунків уставок приводів та переключення режимів в системі виконує програмований логічний контролер (ПЛК) верхнього рівня SIEMENS SIMATIC S7-151-8 (S7-300), який виконує комунікацію по інтерфейсу ProfibusDP з використанням протоколу Profidrive SIEMENS Telegram 220 (PZD-10/10), яка дозволяє передавати значення для контролювання обертового моменту на валу, а також 4 вільних слова для циклічного обміну необхідних користувачу даних.

Розглянемо алгоритм запуску системи для забезпечення постійного натягу матеріалу:

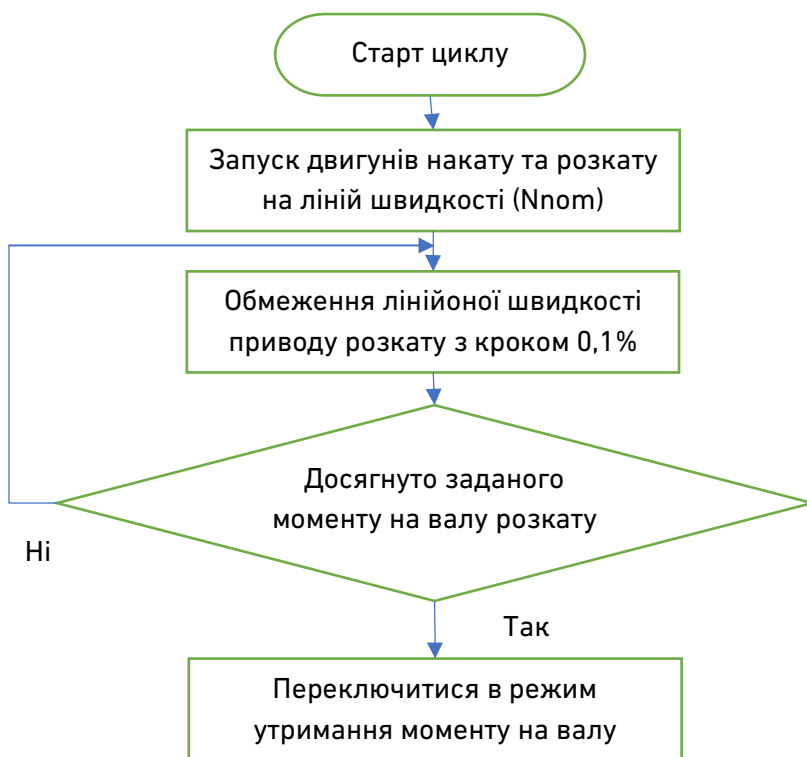


Рис. 6. Алгоритм запуску системи стабілізації натягу матеріалу

На першому етапі двигуни намоту і розкату запускаються з заданою однаковою швидкістю перемотки в режимі стабілізації швидкості. Цей запуск забезпечує компенсацію пікового моменту навантаження в момент запуску, але ми не маємо натягу полотна. Далі ми починаємо поетапно зменшувати швидкість обертання двигуна розкату чим створюємо момент натягу. Контролюємо його до заданого значення натягу, після чого електропривод розкату переключаємо в режим підтримання моменту з обмеженням максимальної швидкості обертання до поточно заданої лінійної швидкості розмотки відповідно до діаметру тамбура. Такий режим забезпечує плавне переключення без розриву полотна в процесі переходу до режиму стабілізації натягу. В подальшому дана система забезпечить стабільний натяг полотна при зміні лінійної швидкості системи.

Розглянемо кінцеві графіки відповідності моменту на валу отримані з робочої установки за допомогою програмного забезпечення SIEMENS STARTER для машини рис. 7–8. Графіки моменту на валу та його кутової швидкості наведено на рис. 9.

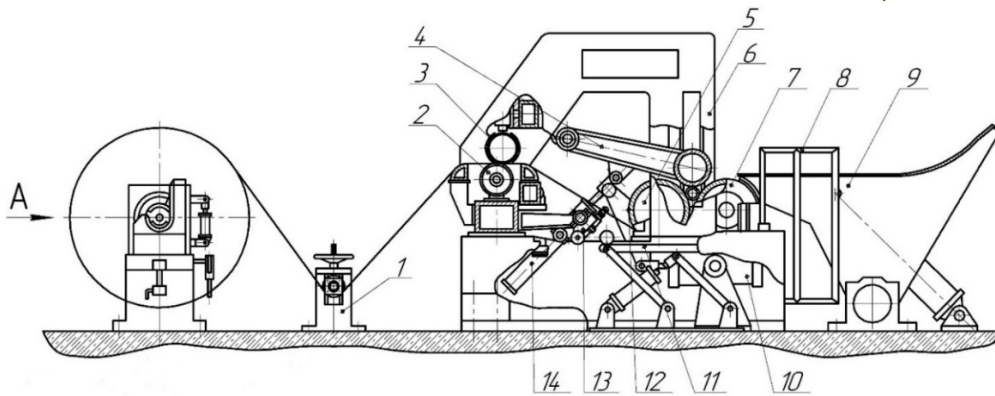


Рис. 7. Схема продольно-різального стану:

1 – вал заводки паперу, 2 – вал порізки, 3 – ножі, 4 – ричаг прижиму ножів,  
5, 7 – вали накату, 6 – рама, 8 – захисні огороження, 9 – механізм  
зміняння порізаних рулонів, 10, 11, 12, 13, 14 – пневмоциліндри прижиму  
валів після заправки





Рис. 8. Фотографії продольно-різального стану. Привід «розкату»,  
привід «накату», вузол ножів





Рис. 9. Графіки параметрів швидкості та моменту на валу приводу розкату системи автоматичного підтримання натягу полотна на повздовжно-різальному стані

Під час вимірів було проведено 5 етапів роботи установки, які зображені на графіках.

1. Запуск системи на малій швидкості (20 м/хв). При стабільній швидкості обертання видно, що з часом момент починає спадати (рулон розкручується).
2. Зміна натягу оператором (оператор задала натяг на заданий тип матеріалу, що перемотується). Бачимо, що при стабільній швидкості момент збільшився до заданого оператором.
3. Розмотка на малій швидкості (результати такі самі як в п. 1).
4. Збільшення швидкості до робочої 150 м/хв. Система витримує момент на валу.
5. Перемотка на робочій швидкості – спостерігаємо поступове зменшення моменту з часом під час розмотки.

**Висновки.** Такий механізм стабілізації натягу паперу зарекомендував себе як дієвий, і з погляду практики може виконуватися на базі різних двигунів, як-от синхронних, асинхронних чи серво. Головна умова – можливість контролю моменту на валу двигуна за допомогою мікропроцесорного блоку керування електроприводом.

1. Yangmin Li, Qingsong Xu. Dynamic modeling and robust control of a 3-PRC translational parallel kinematic machine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. June 2009. Vol. 25, Issue 3. P. 630–640. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2008.05.006> (дата звернення: 10.05.2024).
2. Tarcisio Antonio Hess-Coelho a, Renato Maia Matarazzo Orsino b, Fernando Malvezzi b. Modular modelling methodology applied to the dynamic analysis of parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*. July 2021. Vol. 161. P. 104332. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104332> (дата звернення: 10.05.2024).
3. Xinming Huo, Binbin Lian, Panfeng Wang, Yimin Song, Tao Sun. Dynamic identification of a tracking parallel mechanism. *Mechanism and Machine Theory*. January 2021. Vol. 155. P. 104091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104091> (дата звернення: 10.05.2024).
4. Shuofei Yang a, Yangmin Li b. Different Kinds of 3T2R Serial Kinematic Chains and Their Applications in Synthesis of Parallel Mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*. February 2020. Vol. 144. P. 103637. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103637> (дата звернення: 10.05.2024).
5. Troels Bo Jørgensen a, Adam Wolniakowski b, Henrik Gordon Petersen a, Kristian Debrabant c, Norbert Krüger a. Robust optimization with applications to design of context specific robot solutions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016.
6. R. Neugebauer, W. G. Drossel, C. Harzbecker, S. Ihlenfeldt, S. Hensel. Method for the Optimization of Kinematic and Dynamic Properties of Parallel Kinematic Machines. *CIRP Annals*. 2006. Vol. 55, Issue 1. P. 403–406. URL: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60445-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60445-4) (дата звернення: 10.05.2024).
7. R. Yáñez-Valdez, J. A. Téllez-Galván, M. López-Parra, L. Urbiola-Soto. Dynamic stability of a parallel kinematic machine. *Journal of Applied Research Technology*. 2022. Vol. 20, no. 1. URL: <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.1.1278> (дата звернення: 10.05.2024).
8. Stefan Jenzowsky. Digital Disruption. *Digitalization becomes reality Top Customer Event*, October 16–17, 2018 in Vienna.
9. Leonhard Muigg. Driving the Digital Enterprise for discrete industries. *Digitalization becomes reality Top Customer Event*, October 16–17, 2018 in Vienna. S7-1500/S7-1500T Motion Control overview V5.0 in TIA Portal V16 (12/2019, English).
10. Жуковський О. Є., Грабар І. Г. Сучасні технології управління рухом в концепції «Industry 4.0» для задач управління технологічними машинами. *Theoretical and Experimental Research in Materials Science and Mechanical Engineering : IX International scientific and practical conference*. Луцьк, 2023. URL: <https://termm.intu.edu.ua/index> (дата звернення: 10.05.2024).
11. Grabar Ivan, Zhukovskyi Olexandr, Senn Philipp. Modeling Of The Dynamics Of Rotors Of Variable Mass Of Technological Machines. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2023. Vol. 4(323). *Вісник Хмельницького Національного університету. Сер. Технічні науки*. 2023. № 4(323). С. 73–82. DOI 10.31891/2307-5732-2023-323-4-73-81.
12. Грабар І. Г. Термоактиваційний аналіз і синергетика руйнування : наукова монографія. Житомир : ЖІТІ, 2002. 312 с.

## REFERENCES:

1. Yangmin Li, Qingsong Xu. Dynamic modeling and robust control of a 3-PRC translational parallel kinematic machine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. June 2009. Vol. 25, Issue 3. P. 630–640. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2008.05.006> (data zvernennia: 10.05.2024).
2. Tarcisio Antonio Hess-Coelho a, Renato Maia Matarazzo Orsino b, Fernando Malvezzi b Modular modelling methodology applied to the dynamic analysis of parallel mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*. July 2021. Vol. 161. P. 104332. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2021.104332> (data zvernennia: 10.05.2024).
3. Xinming Huo, Binbin Lian, Panfeng Wang, Yimin Song, Tao Sun. Dynamic identification of a tracking parallel mechanism. *Mechanism and Machine Theory*. January 2021. Vol. 155. P. 104091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104091> (data zvernennia: 10.05.2024).
4. Shuofei Yang a, Yangmin Li b. Different Kinds of 3T2R Serial Kinematic Chains and Their Applications in Synthesis of Parallel Mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*. February 2020. Vol. 144. P. 103637. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103637> (data zvernennia: 10.05.2024).
5. Troels Bo Jørgensen a, Adam Wolniakowski b, Henrik Gordon Petersen a, Kristian Debrabant c, Norbert Krüger a. Robust optimization with applications to design of context specific robot solutions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2016.
6. R. Neugebauer, W. G. Drossel, C. Harzbecker, S. Ihlenfeldt, S. Hensel. Method for the Optimization of Kinematic and Dynamic Properties of Parallel Kinematic Machines. *CIRP Annals*. 2006. Vol. 55, Issue 1. P. 403–406. URL: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60445-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60445-4) (data zvernennia: 10.05.2024).
7. R. Yáñez-Valdez, J. A. Téllez-Galván, M. López-Parra, L. Urbiola-Soto. Dynamic stability of a parallel kinematic machine. *Journal of Applied Research Technology*. 2022. Vol. 20, no. 1. URL: <https://doi.org/10.22201/icat.24486736e.2022.20.1.1278> (data zvernennia: 10.05.2024).
8. Stefan Jenzowsky. Digital Disruption. *Digitalization becomes reality Top Customer Event*, October 16–17, 2018 in Vienna.
9. Leonhard Muigg. Driving the Digital Enterprise for discrete industries. *Digitalization becomes reality Top Customer Event*, October 16–17, 2018 in Vienna. S7-1500/S7-1500T Motion Control overview V5.0 in TIA Portal V16 (12/2019, English).
10. Zhukovskiy O. Ye., Hrabar I. H. Suchasni tekhnolohii upravlinnia rukhom v kontseptsii «Industry 4.0» dlia zadach upravlinnia tekhnolohichnymy mashynamy. *Theoretical and Experimental Research in Materials Science and Mechanical Engineering* : IKh International scientific and practical conference. Lutsk, 2023. URL: <https://termm.lntu.edu.ua/index> (data zvernennia: 10.05.2024).
11. Grabar Ivan, Zhukovskiy Olexandr, Senn Philipp. Modeling Of The Dynamics Of Rotors Of Variable Mass Of Technological Machines. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2023. Vol. 4(323). *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho universytetu. Ser. Tekhnichni nauky*. 2023. № 4(323). S. 73–82.



DOI 10.31891/2307-5732-2023-323-4-73-81. 12. Hrabar I. H. Termoaktyvatsiyni analiz i synerhetyka ruinuvannia : naukova monohrafiia. Zhytomyr : ZhiTI, 2002. 312 s.

---

**Hrabar I. H., Doctor of Engineering, Professor, Zhukovskyi O. Ye., Post-graduate Student, Talko A. M., Assistant** (Polissia National University)

### **MODEL OF ADJUSTMENT OF KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL MACHINES**

**On the basis of the study of the dynamics of the parameters of variable mass rotors of winding-unwinding machines in a non-linear setting, a model for regulating the parameters of kinematics and dynamics was proposed and implemented. This work made it possible to create a software-hardware complex for dynamic control and support of specified parameters of unwinding-winding technological machines in online mode. Classical methods of rewind control were considered and, based on the shortcomings, optimization of the control system was carried out to ensure tension regulation without the use of an additional tension measuring roll, but by mathematical processing of the electric drive parameters and the generation of control parameters. An algorithm of the system was developed, which ensured a smooth set of the necessary tension, which does not allow the rewinding material to break in the start-stop cycles. The development of the control system was carried out on the equipment of the SIEMENS company, the implementation of the mathematical model on the SIEMENS SIMATIC programmable logic controller, and the DC motor control part on the SIEMENS SINAMICS DCM converter. Computer testing of the model was carried out and a system of automatic control of the parameters of a specific technological machine - longitudinal cutting machine PPC5-201 was developed. It is shown that the results agree well with the experimental data, an assessment of the change in dynamic parameters at different operating speeds, as well as in transient modes with different changes in dynamics, was performed. The development has been implemented at several enterprises of the paper industry in Ukraine and Europe and may be interesting for the modernization of other rewinding machines in which material tension control is critical.**

***Keywords:* technological machine; parameter adjustment; nonlinear dynamics; dynamic parameters.**