

УДК 621.313.32:681.515

МЕТОДИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА РІЗАЛЬНОГО ЦИЛІНДРА АРКУШЕРІЗАЛЬНОЇ МАШИНИ

М. І. Верхола, В. П. Білан

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

mykhailo.i.verkhola@lpnu.ua

У статті розглянуто методи стабілізації швидкості електропривода різального циліндра ротаційної аркушерізальної машини в умовах циклічного ударного навантаження. Актуальність дослідження зумовлена тим, що під час кожного робочого циклу різання до валу привідного двигуна прикладається короткотривалий імпульс навантаження, який спричиняє просідання швидкості та коливальний перехідний процес, що безпосередньо погіршує точність довжини відрізаного аркуша. Проаналізовано основні підходи до компенсації імпульсних збурень: випереджаюче керування (*feedforward*) за профілем моменту різання, ітеративне навчальне керування (*ILC*), спостерігач збурень (*DOB*), а також конструктивні заходи зниження пікового моменту. Побудовано повну математичну модель електромеханічної системи, що включає електромагнітну підсистему двигуна *PMSM* із перетворювачем частоти та контуром струму, двомасову механічну підсистему з урахуванням пружності валу та тертя, а також модель циклічного збурення від процесу різання паперу. Сформовано систему рівнянь стану та розроблено комбіновану структурну схему системи керування з трьома рівнями компенсації ударного навантаження. На основі побудованої моделі розроблено імітаційну модель мовою *Python*, яка послідовно реалізує чотири сценарії з кумулятивним нарощуванням засобів компенсації. Найкращі результати отримано при сумісному застосуванні всіх чотирьох рівнів компенсації (*ПІД* + *FF* + *DOB* + *ILC*): середньоквадратична похибка становить 0,273 рад/с (зменшення на 35%), при цьому ефективність *ILC* зростає з кожною наступною ітерацією навчання.

Ключові слова: електропривод, аркушерізальна машина, ударне навантаження, *feedforward*-компенсація, ітеративне навчальне керування, спостерігач збурень, *PMSM*, *ПІД*-регулятор, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Точність електроприводів, що працюють в умовах циклічних ударних навантажень, є критичним фактором у широкому спектрі промислових застосувань – від ротаційних аркушерізальних машин та штампувального обладнання до роботизованих систем та металообробних

верстатів. Під час кожного робочого циклу до валу привідного двигуна прикладається короткотривалий імпульс навантаження, що спричиняє просідання швидкості, збудження механічних коливань у пружних елементах передачі та, як наслідок, погіршення точності технологічної операції. У випадку ротаційного різання, наприклад, відхилення швидкості безпосередньо перетворюється у похибку довжини аркуша, що є критичним параметром якості продукції.

Класичний підхід із застосуванням ПД-регулятора швидкості не забезпечує достатньої компенсації імпульсних збурень, оскільки регулятор зворотного зв'язку реагує із запізненням – лише після того, як похибка швидкості вже виникла. Крім того, смуга пропускання контуру швидкості обмежена механічним резонансом двомасової системи «двигун – пружний вал – робочий орган», що додатково звужує можливості зворотного зв'язку.

Дослідження методів підвищення точності електропривода при ударному навантаженні повинні охоплювати: компенсацію детермінованої складової збурення на основі випереджаючого керування (feedforward); подавлення повторюваної похибки від циклу до циклу за допомогою ітеративного навчального керування (ILC); оцінку та компенсацію непередбачуваних варіацій навантаження в реальному часі через спостерігачі збурення (DOB); розширення смуги пропускання контуру швидкості за рахунок подавлення механічного резонансу; а також конструктивні заходи зі зниження пікового значення ударного моменту. Окремим важливим аспектом є дослідження взаємодії цих методів при їх одночасному застосуванні та визначення оптимальної архітектури комбінованої системи керування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загалом задача підвищення точності електропривода при періодичних збуреннях вирішується на кількох рівнях: конструктивному (зменшення амплітуди збурення), алгоритмічному (компенсація збурення засобами системи керування) та на рівні ідентифікації параметрів (адаптація до змінних умов роботи). Основні напрямки досліджень розглянуто нижче.

У промислових рішеннях для ротаційних різальних систем feedforward-компенсація є стандартним підходом. Компанія Control Techniques (Nidec) у модулі керування ротаційним ножом реалізує випереджаючу компенсацію моменту (torque feed forward) та компенсацію інерції з підтримкою багатозовних систем [1]. Mitsubishi Electric у серворішенні LD77MS для ротаційних ножів застосовує електронну компенсацію імпульсів у зонах поза різом із синхронізацією через зовнішній енкодер [2]. Обидва рішення підтверджують ефективність feedforward-підходу, проте не розкривають деталей алгоритмічної реалізації та не враховують адаптацію до зміни параметрів навантаження.

Ітеративне навчальне керування (ILC) як метод подавлення періодичних збурень у сервосистемах має обширну наукову базу. У фундаментальній оглядовій роботі

[3] Chen та співавтори систематизували застосування ILC та repetitive control (RC) у промисловості жорстких дисків для компенсації повторюваних ударів, показавши, що RC як гребінчастий фільтр зменшує повторювані удари з 12% до 3% кроку доріжки за 10 ітерацій. У роботі зазначено, що ILC/RC є апробованими методами для подавлення детермінованих повторюваних збурень. При цьому зазначається, що ILC потребує скидання до однакових початкових умов на кожній ітерації, тоді як RC працює безперервно, що робить RC зручнішим для неперервних процесів.

Для двигунів PMSM, що широко застосовуються у прецизійних приводах, ILC активно використовується для подавлення пульсацій моменту, спричинених cogging torque, похибками вимірювання струму та гармоніками магнітного потоку. У роботі [4] показано, що ILC паралельно з класичним ПІ-регулятором (PI-ILC) є усталеним методом подавлення таких пульсацій у PMSM серводвигунах. Дослідження на платформі авіаційної фотоелектричної стабілізації [5] продемонструвало, що ILC досягає похибки швидкості $\pm 0,5\%$ вже після третьої ітерації. Автори запропонували комбінований підхід: спочатку «домінантне збурення» (cogging torque) подавляється офлайн-ILC за різними позиціями, а потім «залишкове збурення» компенсується методом NECOD (negative effect compensation of disturbance), що забезпечило підвищення точності у порівнянні з класичним ADRC.

У роботі [6] для низькошвидкісного прецизійного керування PMSM запропоновано поєднання ковзного режиму (SMC), ILC та розширеного спостерігача стану (ESO). ILC компенсує періодичне збурення cogging torque, а ESO спостерігає сумарне збурення системи в реальному часі та компенсує його у ковзному регуляторі, що зменшує вібрації та підвищує робастність. Спостерігач збурення (DOB) є одним із найпоширеніших методів підвищення робастності сервосистем з PMSM. У роботі [7] запропоновано нелінійний контролер ковзного режиму (NSMC) з DOB, де нелінійний коефіцієнт підсилення залежить від ковзної поверхні, а DOB компенсує зовнішні збурення. Математично доведено, що рівень автоколивань у запропонованого контролера нижчий, ніж у класичного SMC. Li та Chen [8] запропонували композитний контролер з feedforward-компенсацією на основі нейромережевого DOB (RBFN), де нейромережа апроксимує обернену модель об'єкта замість використання фіксованої номінальної моделі, що дозволяє відстежувати варіації параметрів об'єкта.

Особливо перспективним є поєднання ILC та DOB в єдину архітектуру. У роботі [9] запропоновано гібридний метод ILC-DOB для керування швидкістю PMSM, де високочастотний DOB спостерігає аперіодичні збурення, а ітеративна навчальна стратегія оцінює та компенсує періодичні збурення через feedforward. Така декомпозиція збурень на періодичну та аперіодичну складові з використанням різних методів для кожної з них є саме

тим підходом, який доцільно застосувати для компенсації ударного навантаження.

У роботі [10] систематизовано методи оцінки збурень для PMSM серводвигунів, включаючи DOB, high gain observer, generalized proportional integral observer та extended state observer (ESO), із застосуванням до задачі керування з обмеженням струму.

Проблема механічного резонансу в двомасових системах, що безпосередньо обмежує смугу пропускання контуру швидкості, широко досліджена. У роботі [11] запропоновано метод подавлення резонансу на основі ADRC, де всі компоненти моменту, окрім інерційного моменту ротора, розглядаються як сумарне збурення. Для практичного налаштування двомасових систем у роботі [12] розроблено непараметричний метод ідентифікації динаміки з розпізнаванням частот резонансу та антирезонансу, на основі якого налаштовуються два notch-фільтри спільно з ПІ-регуляторами. У роботі [13] представлено адаптивний notch-фільтр з автоматичним пошуком резонансної частоти за похибкою швидкості без механічних датчиків зворотного зв'язку.

Проте, незважаючи на значну кількість досліджень окремих методів компенсації, комплексний аналіз їх сумісного застосування для задачі компенсації саме ударного навантаження залишається недостатньо висвітленим. Більшість робіт зосереджені на подавленні cogging torque або повільно змінних збурень, тоді як ударне навантаження характеризується короткою тривалістю (одиниці відсотків циклу), високою амплітудою та жорсткими вимогами до точності.

Мета статті – систематизація та порівняльний аналіз методів компенсації ударного навантаження в електроприводах з синхронними двигунами з постійними магнітами (PMSM), розроблення комбінованої структури системи керування, що поєднує feedforward-компенсацію, ILC, DOB та ПІД-регулятор з notch-фільтром, а також верифікація запропонованої архітектури шляхом імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час різання ніж ротаційного циліндра входить у контакт з папером і контрножем. У цей короткий інтервал часу момент опору на валу стрибкоподібно зростає, що призводить до короткочасного просідання швидкості привода. Оскільки довжина аркуша визначається інтегралом швидкості полотна за час між двома різаними, будь-яке відхилення швидкості безпосередньо перетворюється у похибку довжини. Після проходження зони різання навантаження різко падає, і привод прискорюється відносно заданої швидкості, що спричиняє коливальний перехідний процес.

Feedforward-компенсація за профілем моменту різання є одним із найефективніших підходів для подавлення ударних збурень, зумовлених процесом різання. Детермінований характер збурення дозволяє визначити

момент його виникнення за кутовим положенням різального циліндра та попередньо оцінити його амплітуду.

Принцип feedforward-компенсації полягає у формуванні випереджаючого сигналу моменту, що подається на двигун до виникнення збурення, компенсуючи ударне навантаження раніше, ніж воно спричинить похибку швидкості. Реалізація цього методу потребує датчика кутового положення різального циліндра або синхронізації з головним валом машини. При наближенні ножа до зони різі контролер формує випереджаючий імпульс моменту, профіль якого має бути інверсним щодо профілю збурюючого моменту різання. Калібрування параметрів компенсаційного профілю здійснюється експериментально для конкретного типу паперу та режиму різання.

Метод ітеративного навчального керування (ILC) ідеально підходить саме для циклічних процесів. Принцип такий: оскільки кожен цикл різання повторюється, похибка теж повторюється. ILC аналізує похибку швидкості (або довжини) з попереднього циклу і коригує сигнал керування для наступного. Через кілька десятків циклів система "вивчає" точну форму компенсаційного сигналу, навіть не знаючи аналітичної моделі збурення. Це працює значно краще за feedforward з фіксованим профілем, бо автоматично адаптується до зносу ножа, зміни властивостей паперу та інших повільних дрейфів.

Збільшення моменту інерції на валу двигуна (зокрема використання маховика) зменшує глибину просідання швидкості при тому самому ударному моменті – кінетична енергія маховика "згладжує" імпульс навантаження. Але збільшена інерція уповільнює реакцію системи при зміні заданої довжини аркуша і збільшує час розгону-гальмування машини, тому маховик підбирають як компроміс між згладжуванням пульсацій і динамічною продуктивністю.

ПІ-регулятор швидкості з типовим налаштуванням не забезпечує достатньо швидкої реакції на імпульсне збурення тривалістю лише 2,5% циклу. Підвищення ефективності регулювання досягається розширенням смуги пропускання контуру швидкості в межах, обумовлених механічним резонансом системи, а також застосуванням регулятора з додатковим диференціальним каналом або спостерігача збурення (disturbance observer, DOB). DOB оцінює зовнішній момент навантаження в реальному часі та формує компенсаційний сигнал, що еквівалентно збільшенню жорсткості системи відносно зовнішніх збурень.

На конструктивному рівні мінімізація ударного моменту досягається застосуванням гелікоїдного (косого) ножа замість прямого. Гелікоїдний ніж забезпечує послідовне входження у папір від одного краю полотна до іншого, що розподіляє процес різання у часі та суттєво знижує пікове значення збурюючого моменту за рахунок збільшення його тривалості. До суттєвих конструктивних факторів також належать гострота ножа, оскільки затуплення

призводить до значного зростання моменту різання, та мінімальний зазор між ножом і контрножем.

Найвищу ефективність забезпечує комбінований підхід. Гелікоїдний ніж знижує пікове навантаження, feedforward-компенсація за положенням ножового циліндра компенсує основну частину збурення, ILC усуває залишкову похибку від циклу до циклу, а контур швидкості з DOB подавляє непередбачувані варіації моменту різання. Така комбінована архітектура системи керування забезпечує точність довжини аркуша на рівні десятих часток міліметра навіть на високих швидкостях машини.

Для забезпечення можливості дослідження перехідних процесів у електромеханічній системі привода різального циліндра аркушерізальної машини необхідно побудувати повну математичну модель такої системи. Повна модель складається з трьох взаємопов'язаних підсистем: електромагнітна (двигун PMSM з перетворювачем частоти), механічна (двомасова система валу з маховиком і ножовим циліндром) та модель збурення (циклічний момент різання). Нижче наведено математичний опис кожної підсистеми.

Синхронний двигун з постійними магнітами (PMSM) описується у обертовій системі координат d - q , прив'язаній до ротора. Ця система координат обертається разом з магнітним полем ротора, що перетворює змінні величини трифазної обмотки статора в постійні (у стаціонарному режимі), суттєво спрощуючи аналіз і керування.

Рівняння напруги статора по осі d :

$$u_d = R_s \cdot i_d + L_d \cdot (di_d/dt) - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q \quad (1)$$

Рівняння напруги статора по осі q :

$$u_q = R_s \cdot i_q + L_q \cdot (di_q/dt) + \omega_e \cdot L_d \cdot i_d + \omega_e \cdot \psi_f \quad (2)$$

де u_d, u_q – напруги статора по осях d та q , i_d, i_q – струми статора по осях d та q , R_s – активний опір обмотки статора, L_d, L_q – індуктивності по осях d та q (для двигуна з постійними магнітами $L_d \approx L_q = L_s$), $\omega_e = p \cdot \omega_m$ – електрична кутова швидкість (p – кількість пар полюсів, ω_m – механічна швидкість), ψ_f – потокозчеплення постійних магнітів.

Електромагнітний момент двигуна:

$$M_{em} = (3/2) \cdot p \cdot [\psi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (3)$$

Для двигуна з постійними магнітами (SPM), де $L_d = L_q$, момент спрощується до:

$$M_{em} = (3/2) \cdot p \cdot \psi_f \cdot i_q = K_t \cdot i_q \quad (4)$$

де $K_t = (3/2) \cdot p \cdot \psi_f$ – коефіцієнт моменту. Момент двигуна прямо пропорційний лише одній змінній – струму по осі q . Це дозволяє будувати контур моменту як простий регулятор струму i_q .

Контур струму забезпечує, щоб фактичний струм i_q точно і швидко відстежував задання i_q^* . Для цього використовується ПІ-регулятор з компенсацією перехресних зв'язків:

$$\begin{aligned} u_q &= PI_q(i_q - i_q) + \omega_e \cdot L_d \cdot i_d + \omega_e \cdot \psi_f \\ u_d &= PI_d(i_d - i_d) - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q \end{aligned} \quad (5)$$

Останні доданки – feedforward-компенсація ЕРС обертання та перехресних зв'язків між осями d і q . Задання по осі d зазвичай $i_d^* = 0$ (керування з максимальним моментом на ампер).

Передатна функція замкненого контуру струму з урахуванням ШІМ-затримки перетворювача:

$$G_i(s) = i_q(s)/i_q(s) \approx 1/(T_i \cdot s + 1) \quad (6)$$

де T_i – еквівалентна стала часу контуру струму. Для сучасних перетворювачів з частотою ШІМ 8–16 кГц $T_i \approx 0.2 \dots 0.5$ мс. Це значно швидше за механічну затримку, тому для аналізу контуру швидкості контур струму можна замінити цією аперіодичною ланкою.

Зв'язок між заданням моменту та фактичним моментом:

$$M_{em}(s)/M_{em}(s) = K_t \cdot G_i(s)/K_t = G_i(s) = 1/(T_i \cdot s + 1) \quad (7)$$

Перетворювач частоти (інвертор) перетворює задані напруги u_d^* , u_q^* у реальні напруги на обмотках двигуна за допомогою ШІМ. Його основні ефекти – затримка на один або півперіоду ШІМ та обмеження напруги (насичення).

Затримка ШІМ моделюється як транспортне запізнення:

$$G_{pwm}(s) = e^{-T_{pwm} \cdot s} \approx 1/(T_{pwm} \cdot s + 1) \quad (8)$$

де $T_{pwm} = 1 / (2 \cdot f_{pwm})$ – половина періоду ШІМ. При $f_{pwm} = 10$ кГц: $T_{pwm} = 50$ мкс. Ця затримка вже врахована в T_i контуру струму.

Обмеження напруги створює ефект насичення: при високих швидкостях зворотна ЕРС двигуна ($\omega_e \cdot \psi_f$) наближається до напруги ланки постійного струму, і перетворювач не може подати необхідну напругу. Це обмежує максимальну швидкість та динаміку на високих швидкостях. Цей ефект моделюється як обмежувач (saturation) на виході регулятора струму.

Механічна частина описується системою рівнянь двомасової системи. Перша маса (сторона двигуна – ротор, маховик, вхідний вал):

$$J_1 \cdot (d\omega_1/dt) = M_{em} - M_{shaft} - B_1 \cdot \omega_1 - M_f1(\omega_1) \quad (9)$$

Друга маса (сторона навантаження – ножовий циліндр, контрніж, вихідний вал):

$$J_2 \cdot (d\omega_2/dt) = M_{shaft} - M_{cut}(\theta_2) - B_2 \cdot \omega_2 - M_f2(\omega_2) \quad (10)$$

Момент у пружному валу:

$$M_{shaft} = K_s \cdot (\theta_1 - \theta_2) + D_s \cdot (\omega_1 - \omega_2) \quad (11)$$

Зв'язок кута та швидкості:

$$d\theta_1/dt = \omega_1, d\theta_2/dt = \omega_2 \quad (12)$$

де M_{f1} , M_{f2} – моменти сухого тертя.

Моменти інерції для аркушерізальної машини: $J_1 = 0.03...0.08$ кг·м² (ротор двигуна з маховиком), $J_2 = 0.02...0.1$ кг·м² (різальний циліндр). Маховик на валу двигуна збільшує J_1 , що знижує чутливість до ударного навантаження, але зменшує динаміку (повільніший розгін та гальмування).

Жорсткість валу K_s залежить від конструкції: прямий привод через муфту – $K_s = 5000...20000$ Нм/рад, через зубчасту або ремінну передачу – $K_s = 1000...5000$ Нм/рад. Коефіцієнт демпфування D_s зазвичай невисокий: $D_s = 0.1...1.0$ Нм·с/рад.

Спрощена модель тертя Стрибека описує залежність моменту тертя від швидкості:

$$M_f(\omega) = [M_c + (M_s - M_c) \cdot e^{-|\omega/\omega_s|^2}] \cdot \text{sign}(\omega) + B_v \cdot \omega \quad (13)$$

де M_c – момент кулонового (сухого) тертя, M_s – момент статичного тертя (тертя зрушення, $M_s > M_c$), ω_s – швидкість Стрибека (характерна швидкість переходу від статичного до динамічного тертя), B_v – коефіцієнт в'язкого тертя.

На низьких швидкостях ($|\omega| < \omega_s$) тертя зменшується зі зростанням швидкості – це негативний нахил кривої тертя, який спричиняє stick-slip коливання і є однією з причин пульсацій швидкості. На високих швидкостях домінує лінійна в'язка складова.

Момент різання спричиняє збурення, який можна представити як функцію кутового положення різального циліндра θ_2 :

$$M_{cut}(\theta_2) = M_{peak} \cdot f_{cut}((\theta_2 \bmod 2\pi - \theta_0)/\Delta\theta) \quad (14)$$

де θ_0 — кутове положення початку різу, $\Delta\theta = 0.025 \cdot 2\pi = 0.157$ рад (9°) — кутова тривалість різу, f_{cut} — нормований профіль:

$$f_{cut}(x) = 0 \text{ при } x < 0 \text{ або } x > 1$$

$$\begin{aligned}
f_{cu}(x) &= x/x_{rise}(z) \text{ при } 0 < x < x_{rise} \\
f_{cut}(x) &= 0 \text{ при } x_{ri} < x < x_{fall} \\
f_{cut}(x) &= (1-x)/x_{fall} \text{ при } 1-x_{fall} \leq x \leq 1
\end{aligned} \tag{15}$$

Значення: $x_{rise} = 0.15$ (15% від тривалості різну), $x_{fall} = 0.15$.

Пікове значення моменту різання залежить від наступних параметрів:

$$M_{peak} = k_{cut} \cdot b \cdot h \cdot \sigma_{cut} \cdot (1 + \alpha \cdot \omega_2) \tag{16}$$

де k_{cut} – коефіцієнт різання (залежить від гостроти ножа, $k_{cut} = 1.0 \dots 2.5$), b – ширина полотна паперу, h – товщина паперу, σ_{cut} – питомий опір різанню паперу (Н/мм), α – швидкісний коефіцієнт (збільшення сили різання з швидкістю через інерційні ефекти).

Для гелікоїдного ножа профіль модифікується: різання відбувається поступово від одного краю полотна до іншого. Ефективна ширина різну в кожен момент:

$$b_{eff}(\theta_2) = b \cdot (\theta_2 - \theta_{start}) / \Delta\theta_{helix} \tag{17}$$

де $\Delta\theta_{helix}$ – кутова тривалість проходження ножа по всій ширині. Це розтягує імпульс у часі та зменшує пікове значення: $M_{peak\ helix} = M_{peak} \cdot \Delta\theta / \Delta\theta_{helix}$, при $\Delta\theta_{helix} > \Delta\theta$.

Зведемо всі рівняння (1) – в систему рівнянь стану, зручну для моделювання. Вектор стану $x = [\theta_1, \omega_1, \theta_2, \omega_2, i_d, i_q]^T$. Вхід – задання напруг $u = [u_d^*, u_q^*]^T$. Збурення – $M_{cut}(\theta_2)$.

$$\begin{aligned}
d\theta_1/dt &= \omega_1 \\
d\omega_1/dt &= (1/J_1) \cdot [K_t \cdot i_q - K_s \cdot (\theta_1 - \theta_2) - \\
&\quad - D_s \cdot (\omega_1 - \omega_2) - B_1 \cdot \omega_1 - M_f 1(\omega_1)] \\
d\theta_2/dt &= \omega_2 \\
d\omega_2/dt &= (1/J_2) \cdot [K_s \cdot (\theta_1 - \theta_2) + D_s \cdot (\omega_1 - \omega_2) - \\
&\quad - M_{cut}(\theta_2) - B_2 \cdot \omega_2 - M_f 2(\omega_2)] \\
di_d/dt &= (1/L_d) \cdot [u_d - R_s \cdot i_d + p \cdot \omega_1 \cdot L_q \cdot i_q] \\
di_q/dt &= (1/L_q) \cdot [u_q - R_s \cdot i_q - p \cdot \omega_1 \cdot L_d \cdot i_d - p \cdot \omega_1 \cdot \psi_f]
\end{aligned} \tag{18}$$

Вихідними параметрами системи є: кутова швидкість ω_1 (вимірюється енкадером на двигуні), кут повороту ножа θ_2 (вимірюється безпосередньо

датчиком положення ножа або обчислюється через передатне число). Довжина аркуша обчислюється як $L = R_{drum} \cdot \int \omega_2 dt$ між двома послідовними різаними, де R_{drum} – радіус барабана подачі.

Побудуємо структурну схему системи керування електроприводом різального циліндра ротаційної аркушерізальної машини з компенсацією ударного навантаження. На рис. 1 показано побудовану схему з трьома рівнями компенсації. Зовнішній контур (повільний) – контур довжини аркуша. Енкодер інтегрує швидкість вала ($\int \omega dt \rightarrow L$). Задання довжини аркуша L^* порівнюється з фактичною довжиною L (нижній зворотний зв'язок через інтеграл швидкості). Похибка довжини надходить у блок ПС, який від циклу до циклу уточнює корекцію задання швидкості ω^* .

Внутрішній контур (швидкий) – контур швидкості з ПІД-регулятором. Це основний контур стабілізації, який реагує на відхилення швидкості вала від заданої. Чим ширша його смуга пропускання, тим швидше він відпрацьовує збурення. Задана швидкість порівнюється з фактичною ω від енкодера (правий зворотний зв'язок). Похибка швидкості обробляється ПІД-регулятором.

Блоки компенсації (обведені пунктиром) працюють паралельно з регулятором швидкості. Feedforward-компенсатор отримує сигнал від датчика кутового положення ножа θ і генерує випереджаючий імпульс моменту до того, як ніж торкнеться паперу. DOB (спостерігач збурення) оцінює зовнішній момент у реальному часі на основі виміряної швидкості і компенсує ту частину збурення, яку feedforward не поклав. Обидва сигнали додаються до виходу регулятора швидкості в суматорі перед перетворювачем.

Сумарний сигнал моменту M^* надходить на перетворювач із двигуном PMSM. На валу механіки до корисного моменту додається ударний момент різання $M_{різ}$ – це момент, який діє на вал як зовнішнє збурення і є саме тим параметром, що вся система покликана компенсувати.

Енкодер вимірює швидкість вала і замикає обидва контури керування – контур швидкості, який реагує швидше на зміну сигналу зворотного зв'язку та контур довжини аркуша, що є повільнішим, оскільки для отримання актуальної довжини необхідно дочекатись завершення поточного циклу різання.

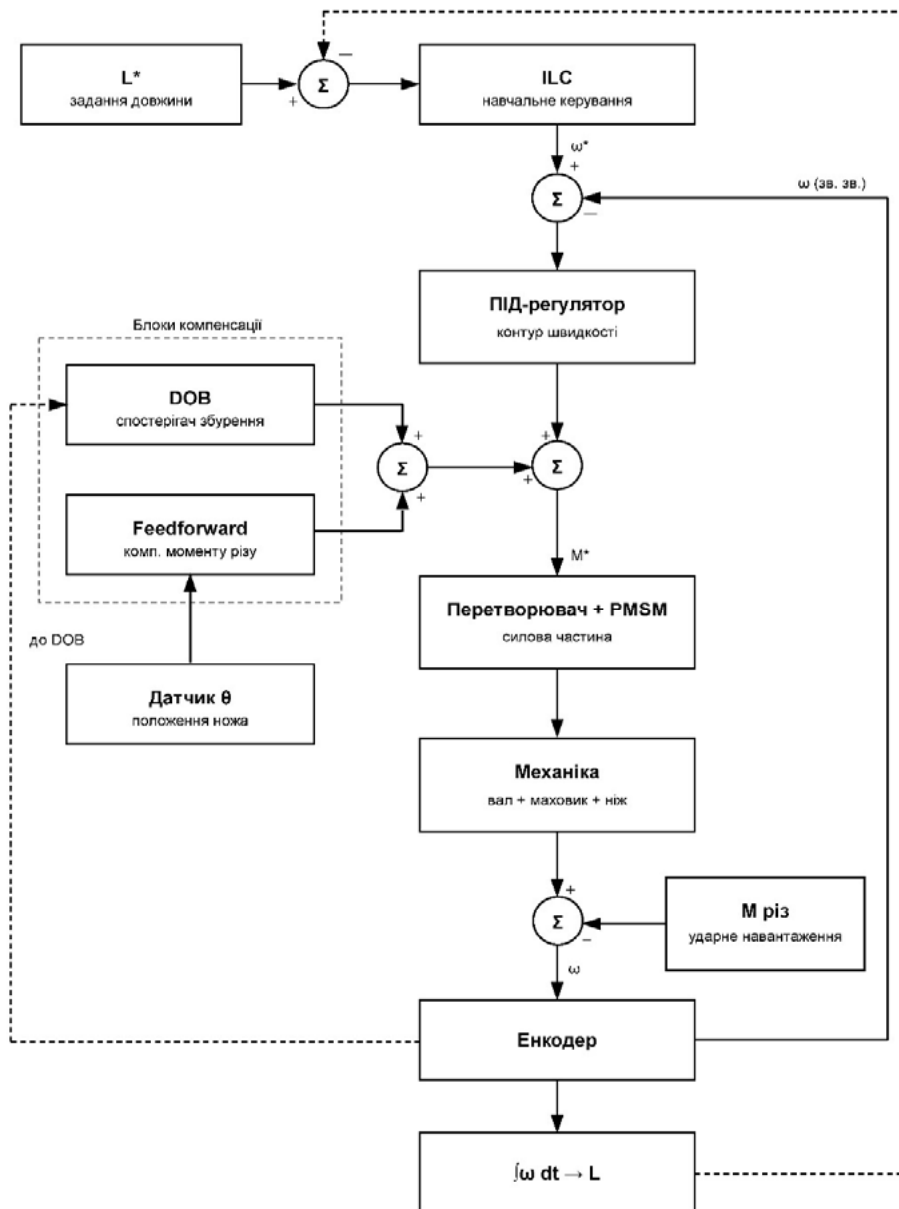


Рис.1 Структурна схема системи керування електроприводом різального циліндра з компенсацією ударного навантаження.

На основі побудованої математичної моделі розроблено імітаційну модель системи керування ротаційною аркушерізальною машиною з компенсацією ударного навантаження мовою програмування Python. Як двигун привода різального циліндра обрано Siemens 1FK2 (SIMOTICS S) із такими параметрами: модель 1FK2208, потужність 3,05 кВт, 2000 об/хв, момент

зупинки 18 Нм, максимальний момент 51 Нм, струм 7 А, інерція ротора 32,6 кг·см², діаметр валу 32 мм.

На кожному кроці інтегрування ($\Delta t = 25$ мкс) виконується: обчислення збурення $M_{cut}(\theta_2)$, формування похибки $e = \omega_{ref} - \omega_1$, розрахунок складових ПД, feedforward, ILC та DOB, обмеження сумарного задання моменту, оновлення контуру струму, інтегрування рівнянь руху двомасової системи методом Ейлера, та детекція завершення циклу для оновлення ILC-таблиці.

Імітаційна модель послідовно виконує чотири сценарії з кумулятивним нарощуванням засобів компенсації: тільки ПД, ПД + Feedforward, ПД + FF + DOB та ПД + FF + DOB + ILC. Для кожного сценарію обчислюються середньоквадратична та пікова похибки швидкості, а також формуються графіки перехідних процесів (з використанням бібліотеки matplotlib), що дозволяють кількісно оцінити ефективність кожного рівня компенсації ударного навантаження.

На рис. 2 зображено графік перехідних процесів швидкості за 800 мс (≈ 8 обертів). Добре видно, як кожен імпульс різання (нижній підграфік) спричиняє просідання швидкості. Для варіанту з тільки ПД керуванням отримано найглибші провали до 58 рад/с. При застосуванні FF+DOB або FF+DOB+ILC пульсації зменшуються приблизно вдвічі.

Деталізація одного імпульсу різання (момент прикладання ударного навантаження) зображено на рис. 3. На графіку помітно, що ПД реагує із запізненням (виникає просідання, а потім перерегулювання), feedforward натомість створює випереджаючий імпульс моменту (безпосередньо перед різом), а DOB додатково згладжує коливальний перехідний процес.

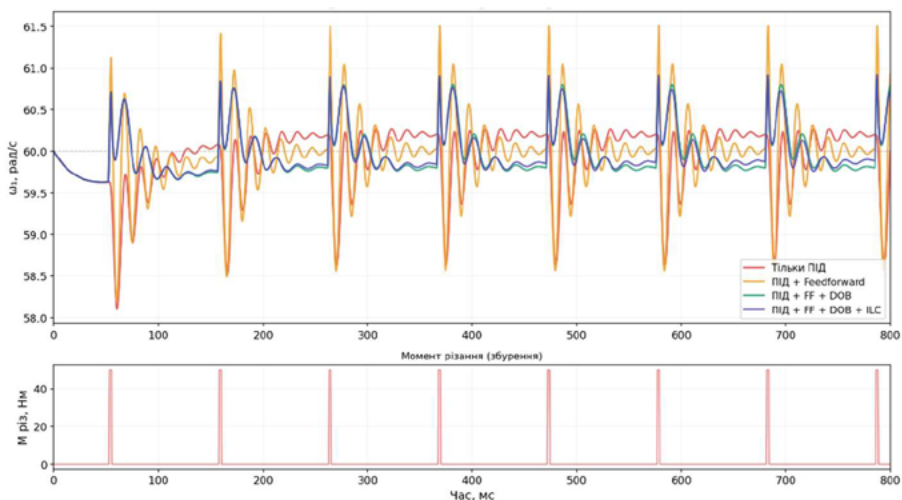


Рис.2 Перехідні процеси швидкості валу двигуна.

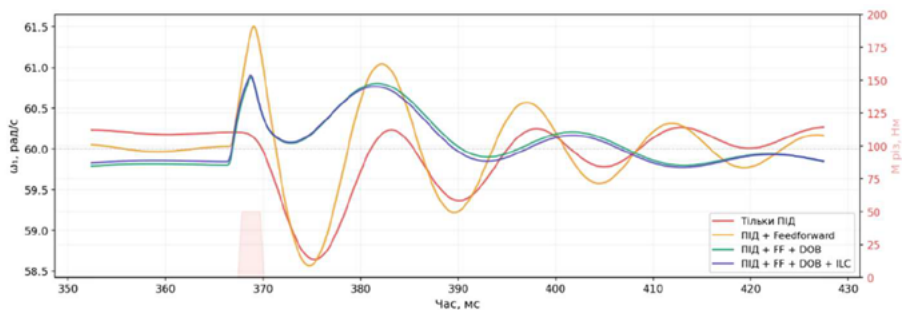


Рис.3 Перехідний процес швидкості на один імпульс різання.

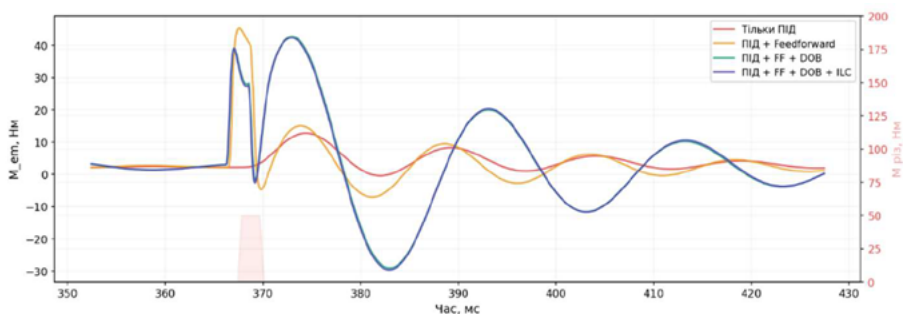


Рис.4 Перехідний процес моменту двигуна на один імпульс різання.

На рис. 4 зображено графік перехідних процесів моменту двигуна $M_{еп}$. Видно, як різні стратегії формують зовсім різні профілі моменту: ПД – слабка реакція після різі, feedforward – різкий компенсаційний імпульс синхронно зі збуренням, DOB+ILC – агресивна компенсація з коливаннями.

Для порівняння похибок швидкості при дії ударного навантаження побудуємо відповідні графіки (рис. 5). Також представимо кількісні показники усереднених та пікових значень похибок, а також ступінь зменшення коливань у порівнянні із застосуванням лише ПД регулятора у вигляді таблиці.

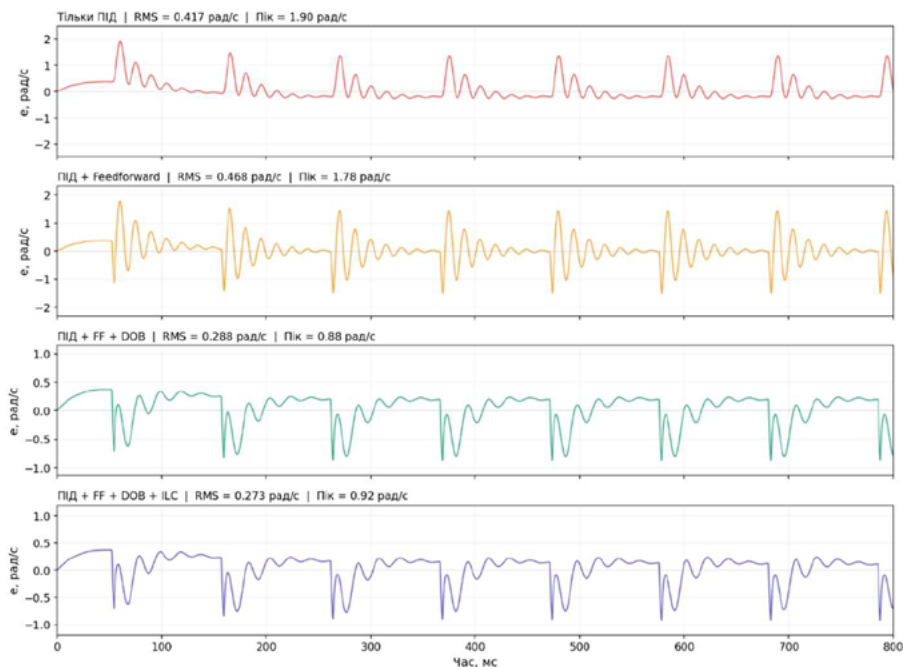


Рис.5 Похибка швидкості для кожної стратегії стабілізації.

Застосування спостерігача збурень (DOB) дає найбільший вклад у зменшення похибки, а додавання ітеративного навчального керування (ILC) покращує перехідний процес ще на $\sim 5\%$, але ефект потенційно може збільшуватись з кожним наступним циклом, оскільки за 0.8 с встигло виконатись лише 4 цикли навчання.

Стратегія	RMS, рад/с	Пік, рад/с	Зменшення
Тільки ПІД	0.417	1.90	—
ПІД + FF	0.468	1.78	$\sim 5\%$ (пік)
ПІД + FF + DOB	0.288	0.88	31% (RMS)
ПІД + FF + DOB + ILC	0.273	0.92	35% (RMS)

Результати моделювання показали, що застосування лише ПІД-регулятора забезпечує середньоквадратичну похибку швидкості 0,417 рад/с та пікову похибку 1,90 рад/с. Додавання feedforward-компенсатора зменшує пікову похибку до 1,78 рад/с, проте суттєвий приріст точності досягається лише після підключення спостерігача збурень: стратегія ПІД + FF + DOB знижує

середньоквадратичну похибку до 0,288 рад/с (зменшення на 31%), а пікову – до 0,88 рад/с.

Висновки. У статті проведено систематизацію та порівняльний аналіз методів компенсації ударного навантаження в електроприводі різального циліндра ротаційної аркушерізальної машини. Побудовано повну математичну модель електромеханічної системи, що включає електромагнітну підсистему двигуна PMSM з перетворювачем частоти, двомасову механічну підсистему з урахуванням пружності валу та тертя, а також модель циклічного збурення від процесу різання паперу. Розроблено комбіновану систему керування, що поєднує ПД-регулятор швидкості, feedforward-компенсатор за профілем моменту різання, спостерігач збурень (DOB) та ітеративне навчальне керування (ILC). Результати імітаційного моделювання підтвердили ефективність запропонованого комбінованого підходу: застосування всіх чотирьох рівнів компенсації забезпечує зменшення середньоквадратичної похибки швидкості на 35% та пікової похибки більш ніж удвічі порівняно із використанням лише ПД-регулятора. Встановлено, що найбільший внесок у зменшення похибки забезпечує спостерігач збурень (DOB), тоді як ILC додатково покращує перехідний процес із потенціалом подальшого вдосконалення при збільшенні кількості ітерацій навчання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну верифікацію розробленої системи керування на фізичному макеті аркушерізальної машини, а також на розроблення адаптивних алгоритмів автоматичного налаштування параметрів компенсаторів при зміні технологічних умов різання.

Список використаних джерел

1. Control Techniques. Rotary Knife: Industrial application for continuously cutting material web. Nidec Industrial Automation. URL: <https://acim.nidec.com/en-US/drives/control-techniques/Products/Application-Solutions/Industrial-Automation/Rotary-Knife>.
2. Mitsubishi Electric. Rotary cutter application solution. Mitsubishi Electric Factory Automation – EMEA. URL: <https://emea.mitsubishielectric.com/fa/solutions/industries/packaging/rotary>.
3. Chen Y. Q., Moore K. L., Yu J., Zhang T. Iterative learning control and repetitive control in hard disk drive industry — A tutorial. Int. J. Adapt. Control Signal Process. 2008. Vol. 22. Pp. 325–343. doi:10.1002/acs.1003
4. Lam B. H., Panda S. K., Xu J. X. Reduction of periodic speed ripples in PM synchronous motors using iterative learning control. Proceedings of the 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2000). 2000. Vol. 3. Pp. 1670–1675. doi:10.1109/IECON.2000.972327.

5. Iterative Learning-Based Negative Effect Compensation Control of Disturbance to Improve the Disturbance Isolation of System. PMC. 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9103240/>.
6. High Precision Low-Speed Control for Permanent Magnet Synchronous Motor. PMC. 2020. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7085568/>.
7. Gil J., You S., Lee Y., Kim W. Nonlinear sliding mode controller using disturbance observer for permanent magnet synchronous motors under disturbance. Expert Systems with Applications. 2023. Vol. 214. Art. 119085. doi:10.1016/j.eswa.2022.119085.
8. Li J., Li S., Chen X. Adaptive speed control of a PMSM servo system using an RBFN disturbance observer. Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2012. Vol. 34, No. 5. doi:10.1177/0142331211410920.
9. Yang T., Deng Y., Li H., Sun Z., Cao H., Wei Z. Fast integral terminal sliding mode control with a novel disturbance observer based on iterative learning for speed control of PMSM. ISA Transactions, Vol. 134, 2023, pp. 460–471. doi: 10.1016/j.isatra.2022.07.029.
10. Li J., Zhang L., Luo L. Extended state observer based current-constrained controller for a PMSM system in presence of disturbances: Design, analysis and experiments. Control Engineering Practice. 2023. Vol. 132. Art. 105412. doi:10.1016/j.conengprac.2022.105412.
11. Mechanical resonance suppression method based on active disturbance rejection control in two-mass servo system. Journal of Power Electronics. 2022. Vol. 22. doi:10.1007/s43236-022-00473-3.
12. Cures for mechanical resonance in industrial servo systems. ResearchGate. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228777438>.
13. Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis. IET Electric Power Applications, Vol. 6, Issue 7, August 2012, pp. 455–461. doi: 10.1049/iet-epa.2011.0322.

References

1. Control Techniques. Rotary Knife: Industrial application for continuously cutting material web. Nidec Industrial Automation. URL: <https://acim.nidec.com/en-US/drives/control-techniques/Products/Application-Solutions/Industrial-Automation/Rotary-Knife>.
2. Mitsubishi Electric. Rotary cutter application solution. Mitsubishi Electric Factory Automation – EMEA. URL: <https://emea.mitsubishielectric.com/fa/solutions/industries/packaging/rotary>.

3. Chen Y. Q., Moore K. L., Yu J., Zhang T. Iterative learning control and repetitive control in hard disk drive industry — A tutorial. *Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 2008. Vol. 22. Pp. 325–343. doi:10.1002/acs.1003
4. Lam B. H., Panda S. K., Xu J. X. Reduction of periodic speed ripples in PM synchronous motors using iterative learning control. *Proceedings of the 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2000)*. 2000. Vol. 3. Pp. 1670–1675. doi:10.1109/IECON.2000.972327.
5. Iterative Learning-Based Negative Effect Compensation Control of Disturbance to Improve the Disturbance Isolation of System. *PMC*. 2022. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9103240/>.
6. High Precision Low-Speed Control for Permanent Magnet Synchronous Motor. *PMC*. 2020. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7085568/>.
7. Gil J., You S., Lee Y., Kim W. Nonlinear sliding mode controller using disturbance observer for permanent magnet synchronous motors under disturbance. *Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 214. Art. 119085. doi:10.1016/j.eswa.2022.119085.
8. Li J., Li S., Chen X. Adaptive speed control of a PMSM servo system using an RBFN disturbance observer. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2012. Vol. 34, No. 5. doi:10.1177/0142331211410920.
9. Yang T., Deng Y., Li H., Sun Z., Cao H., Wei Z. Fast integral terminal sliding mode control with a novel disturbance observer based on iterative learning for speed control of PMSM. *ISA Transactions*, Vol. 134, 2023, pp. 460–471. doi:10.1016/j.isatra.2022.07.029.
10. Li J., Zhang L., Luo L. Extended state observer based current-constrained controller for a PMSM system in presence of disturbances: Design, analysis and experiments. *Control Engineering Practice*. 2023. Vol. 132. Art. 105412. doi:10.1016/j.conengprac.2022.105412.
11. Mechanical resonance suppression method based on active disturbance rejection control in two-mass servo system. *Journal of Power Electronics*. 2022. Vol. 22. doi:10.1007/s43236-022-00473-3.
12. Cures for mechanical resonance in industrial servo systems. *ResearchGate*. 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228777438>.
13. Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis. *IET Electric Power Applications*, Vol. 6, Issue 7, August 2012, pp. 455–461. doi:10.1049/iet-epa.2011.0322.

DOI 10.32403/2411-9210-2026-1-55-9-26

METHODS OF SPEED STABILIZATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF THE CUTTING CYLINDER OF A ROTARY SHEETER

M. I. Verkhola, V. P. Bilan

Lviv Polytechnic National University

mykhailo.i.verkhola@lpnu.ua

The article addresses the methods of speed stabilization of the electric drive of the cutting cylinder in a rotary sheeter under cyclic impact loading conditions. The relevance of the study is due to the fact that during each cutting cycle, a short-duration load impulse is applied to the drive motor shaft, causing speed sag and an oscillatory transient process that directly degrades the accuracy of the cut sheet length. The main approaches to compensating impulse disturbances are analyzed: feedforward control based on the cutting torque profile, iterative learning control (ILC), disturbance observer (DOB), and design measures to reduce peak torque. A complete mathematical model of the electromechanical system is developed, including the electromagnetic subsystem of a PMSM motor with a frequency converter and current loop, a two-mass mechanical subsystem accounting for shaft elasticity and friction, and a cyclic disturbance model of the paper cutting process. A state-space equation system is formulated and a combined control system structure with three levels of impact load compensation is proposed. Based on the developed model, a simulation model was implemented in Python, which sequentially executes four scenarios with cumulative addition of compensation methods. The best results are obtained with the combined application of all four compensation levels (PID + FF + DOB + ILC): the RMS error is 0.273 rad/s (a 35% reduction), with ILC effectiveness increasing with each subsequent learning iteration.

Keywords: electric drive, rotary sheeter, impact loading, feedforward compensation, iterative learning control, disturbance observer, PMSM, PID controller, simulation.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2026

Received 25.03.2026