

Хребтова О. А.
Кіцель Н. В.
Шаповал О. О.
Балкунов М. В.
Клименко І. С.
Шапка А. О.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІННЯ СТАЛЕВОГО ДРОТУ ПІД ЧАС ЗАСТОСУВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНУ

У роботі проведено аналіз методів і електромеханічного обладнання під час виготовлення метизу з використанням волочильних станів. Для виготовлення дроту середнього діаметра (1,8...3,0 мм) найбільш перспективними є волочильні машини з однократним технологічним процесом, які мають можливість значного підвищення ефективності процесу волочіння за рахунок оптимізації енергосилових параметрів і підвищення швидкості процесу волочіння.

Підвищити ефективність процесу волочіння можливо завдяки модернізації існуючих систем електроприводів, що призведе до суттєвого підвищення коефіцієнта корисної дії процесу волочіння загалом. Щодо підвищення швидкості волочіння – це можливо завдяки використанню більш сучасної системи керування електроприводом. Доведено, що електропривод за системою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» є економічно вигідним для використання як головного електропривода волочильної машини. Аналіз режимів роботи електропривода волочильної машини на математичній моделі підтвердив, що розроблений принцип управління електроприводом забезпечує регулювання швидкості волочіння з похибкою, що не перевищує заданого показника. Таким чином, забезпечуються вимоги технологічного процесу в усіх режимах.

Ключові слова: волочильний стан, показники якості, технологічний процес, частотно-регульований електропривод.

Виробництво метизів є самостійною галуззю металообробки. Метізом умовно прийнято називати групу широко застосовуваних у народному господарстві металевих виробів промислового призначення, для виготовлення яких використовують катанку, дрібносортовний прокат, калібрований метал, дріт і смуги металу. До цієї групи виробів відносяться: дріт, канатні вироби, металокорд, кручена арматура, металеві сітки, кріпильні вироби тощо.

Волочіння дроту є процесом, під час якого металеву заготовку зі сталі, міді або алюмінію протягують через отвір-фільтр для зменшення діаметра дроту. Об'єкт, в якому виконано отвір для проходження проволочки, називається волокою. Його встановлюють на обладнанні, що виконує технологічну операцію – волочіння дроту. Конструктивні параметри фільтри формують параметри готового виробу, а саме діаметр, перетин і форму.

Процес волочіння дроту відноситься до числа основних технологічних операцій виготовлення дроту. На рис. 1 наведено схему, де видно, що в результаті протягання дроту під впливом сили волочіння F поперечний переріз дроту зменшується, довжина зростає, а обсяг металу після волочіння (протягання) залишається постійним.

Позначивши через d_0 , l_0 , s_0 , відповідно діаметр, довжину і площу поперечного перерізу до волочіння, а через d_1 , l_1 , s_1 , – діаметр, довжину і площу перерізу після волочіння, визначимо основні параметри процесу, що розглядається. До цих параметрів відносяться: обтиснення, подовження і коефіцієнт витягіння.

Операція волочіння у порівнянні з операцією прокатки дозволяє отримувати вироби з якісною чистотою поверхні та досить високою точністю технологічних параметрів. Такими виробами можуть бути не тільки різні типи дроту (електротехнічний, використовуваний для зварювання, вязальний та ін.), але й різні профілі, труби та прутки різного діаметру. Вироби, отримані за такою технологією, відрізняються кращими механічними характеристиками, оскільки в процесі волочіння з поверхні катанки знімається окалина [1–3].

Під час виробництва дроту методом волочіння можна отримати якісну продукцію, зокрема дріт, діаметр якого знаходиться в інтервалі від 1–2 мікрон до 10 і навіть більше міліметрів.

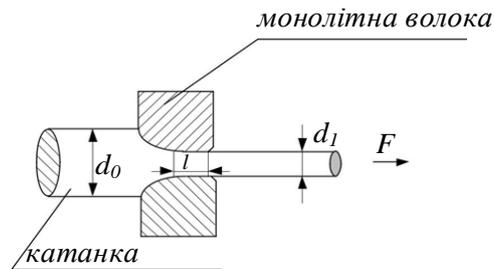


Рис. 1. Схема процесу волочіння

На сьогодні технологія волочіння достатньо добре відпрацьована, для її реалізації застосовуються сучасні моделі волочильних станів. Сучасне обладнання працює без збоїв і дозволяє виконувати технологічний процес на достатньо високих швидкостях, що досягають 60 м/хв випуску готового виробу [–5]. Використання сучасних станів для волочіння дозволяє забезпечити значну величину обтиску катанки. Послідовність виконання технологічної операції під час волочіння дроту наведено на рис. 2.



Рис. 2. Послідовність технологічних операцій волочіння дроту зі сталі

Сама технологія волочіння та волочильне обладнання також удосконалювались протягом багатьох років. В результаті, волочильник дроту сьогодні має можливість виконувати технологічні операції на сучасних станах, що дозволяють з мінімальними витратами гарантовано отримувати вироби високої якості. Якість і точність обробки, що виконувалась на таких волочильних спеціалізованих верстатах, забезпечується не тільки їх оснащенням сучасним робочим інструментом, а й використанням при їх роботі комбінованої системи охолодження, для якої застосовуються повітря і вода. Готовий виріб, що виходить з такого верстата для волочіння, має не тільки необхідну якість і точність геометричних параметрів, а й оптимальну мікроструктуру [3, 5].

Під час волочіння дроту існує можливість наявності такого недоліку, як недостатня висока можливість деформації готового виробу. Це пояснюється тим, що дріт, який виходить з фільери, а саме із зони обробки волочильного стану, деформується тільки до рівня, обмеженого міцністю кінця катанки, до якого і прикладається відповідне зусилля в процесі обробки.

За наявності великих швидкостей волочіння природно виникає питання організації безперервного технологічного процесу – завдання волочіння-прийом дроту, що дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт використання волочильного обладнання, а відповідно й продуктивність [4]. Особливої актуальності набуває вирішення проблеми безперервного високошвидкісного прийому дроту в робочих процесах, таких як волочіння-відпал, волочіння-покриття, волочіння-відпал відкриття тощо, де переривання під час виконання технологічного процесу практично неприпустиме [5]. Якщо питання безперервної подачі дроту до волочильного стану певною мірою вирішено, то безперервний прийом дроту досі не отримав широкого практичного застосування [5, 6]. За наявними відомостями, у вітчизняному машинобудуванні створення високошвидкісних намотувальних апаратів не вийшло за межі досліджень і промислових випробувань дослідних конструкцій. Промислові випробування показали недостатню їх працездатність [7–8].

Безперервний прийом дроту має ряд специфічних особливостей, прояв яких на швидкостях у межах 7-12 м/сек не порушує технологічного процесу намотування, але різко впливає на стабільність процесу зі збільшенням швидкості вище 15 м/сек.

Також під час виконання технологічного процесу необхідно враховувати особливості конструкції волочильних станів і необхідність забезпечення постійного зусилля волочіння, яке залежить від моменту опору, що формується як в самому волочильному стані, так і на барабані намотки готової продукції. Це, в свою чергу, формує стабільність натягу дроту в системі, тобто відсутність змін натягу в окремі періоди (ривки та ослаблення випадкового характеру), і поступові зміни натягу протягом усього періоду намотування.

Проблема керованого виконання технологічного процесу за рахунок застосування як частотно-регульованого електропривода, так і сучасних методів налаштування системи автоматизованого керування з використанням спеціальних алгоритмів роботи під час контролю як електромеханічних параметрів електротехнічного обладнання, так і параметрів кінематичного ланцюга, на сьогодні дуже актуальна і розглядається в багатьох роботах різного напрямку [9–11].

До останнього часу системи електропривода волочильних машин реалізовувалися дебільш на базі двигунів постійного струму.

Але система ТП-Д має такі недоліки:

- обмежена інтенсивності зростання струму якоря і підвищений момент інерції електропривода значно сповільнює перехідний процес, таким чином знижуючи швидкість систем автоматичного регулювання;

- високі масогабаритні показники;

- трудомісткість в обслуговуванні.

Недоліки, зазначені вище, обумовлені наявністю колектора і, як наслідок, наявністю процесів комутації. Їх можна уникнути при побудові системи електропривода на основі асинхронного короткозамкненого двигуна. Однак на сьогодні є можливість апаратно забезпечити керування параметрами напруги живлення для асинхронних двигунів, використовуючи перетворювач частоти зі статором з ланкою постійного струму (автономний інвертор з широтно-імпульсною модуляцією – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором (ПЧ-АД)) [12–14].

На сьогодні існують достатньо багато систем волочильних станів, де застосовуються системи ПЧ-АД у діапазоні потужності 35 ... 100 кВт.

Перетворювачі частоти для асинхронних двигунів слід використовувати лише з урахуванням їх технічних характеристик. Під час вибору моделі ПЧ необхідно приділити увагу деяким нюансам, які вплинуть на правильність вибору:

- Метод управління – скалярний або векторний. Більшість моделей мають векторний метод управління, однак при деяких режимах роботи їх можна перемикає на скалярний метод управління. Нові ПЧ без векторного методу управління не виробляються.

- Потужність споживаної електроенергії – це важливий показник, який необхідно враховувати при виборі моделі частотного перетворювача.

- Вхідна напруга – це показник, який вказує на те, при якій напрузі перетворювач частоти здатний працювати без збоїв. Слід розуміти, що вхідна напруга має бути стабільною. В іншому випадку, при її падінні, ПЧ зупиниться, а при підвищенні – вийде з ладу вся система обладнання.

- Діапазон регулювання – важливий для двигунів, що працюють при високих значеннях номінальної частоти.

- Наявність пульта управління, який дозволяє вводити необхідні значення.

Тому актуальне завдання – це визначення відповідних режимів роботи системи електропривода механізму намотки дроту на бухту для волочильних станів з забезпеченням незмінного зусилля натягіння для катанки. У зв'язку з цим питання створення працездатного намотувального апарату для безперервного високошвидкісного намотування можна вважати вирішеним тільки в тому випадку, якщо система керування електроприводом забезпечуватиме надійний контроль і регулювання натягу дроту від волочильного стану до намотувального апарату.

Мета роботи – розробити та обґрунтувати систему частотно-векторного керування ПЧ-АД приводу намотки для процесу волочіння дроту, що забезпечує стабільний натяг

і постійну лінійну швидкість за змінного радіуса барабана. Передбачити математичне моделювання, вибір і налаштування ПІ-регуляторів, бездатчиковий контроль, оцінку якості, енергоефективності, надійності та продуктивності.

Для виконання процесу волочіння дроту різноманітної номенклатури за марками і діапазоном розмірів застосовуються барабанні волочильні стани різних типів.

Стани одноразового волочіння (рис. 3) використовуються головним чином при отриманні особливо товстого дроту (6 мм і більше), з протягуванням його тільки через одну волоку і одночасним намотуванням на барабан, з якого дріт потім знімається у вигляді готового мотка, переданого на наступну протяжку.

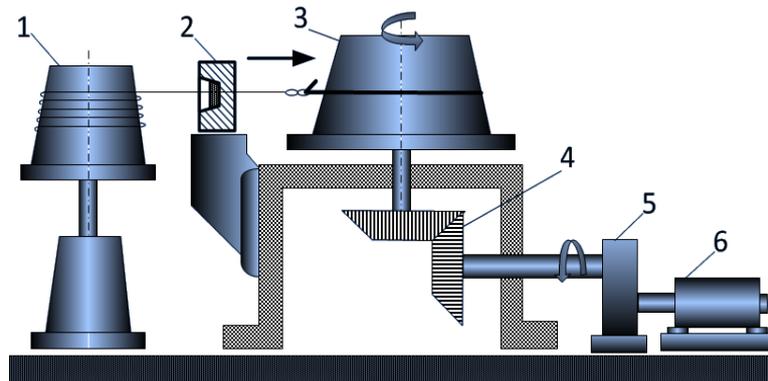


Рис. 3. Одноразовий волочильний стан складається з вертушки для установки бухту дроту – 1; волоки – 2; обертового барабану – 3; левареджа – 4; редуктор – 5; двигун – 6

Стани багаторазового волочіння дають можливість вести процес волочіння одночасно через кілька волок з послідовним зменшенням розмірів їх отворів. Це дозволяє значно підвищити швидкості волочіння, особливо на останніх барабанах за ходом руху дроту, і досягти великих сумарних обтиснень. На цих станах проводиться волочіння дроту майже всіх розмірів, починаючи від товстого (8–11 мм), закінчуючи мікродротом.

Волочильні стани простягають дріт через волоку за рахунок сил тертя під час намотування на барабан. При одноразовому волочінні дріт намотується на барабан, а потім знімається з барабана у вигляді мотка або перемотується на котушку. Дріт намотується на нижню частину барабана – жолобник, і в міру надходження нових витків попередні піднімаються по барабану, що забезпечує безперервність процесу. У практиці волочильного виробництва висоту галтелі чистового барабана приймають рівною від 10 до 40 діаметрів дроту, а тангенс кута нахилу дорівнює від 1/15 до 1/30. Між галтеллю барабана і «спідницею» барабана роблять закруглення, радіус якого складає 1,5–2,0 середнього діаметра дроту, який простягається на цьому барабані.

Після сходу дроту з галтелі він у вигляді вільних витків лежить на барабані, і сили тертя між витками бувають достатніми для здійснення безперервного процесу волочіння.

Одноразовий стан DMBVL має перевернутий барабан. Витки простягнутого дроту на цій машині на спеціальному приймальному пристрої можуть накопичувати до 2 тон дроту. Для виконання вимог, що висуваються до електропривода волочильної машини під час виконання технологічного процесу, на сьогодні можуть забезпечити регульовані асинхронні електроприводи.

Для забезпечення якості готової продукції необхідно, щоб катанка, що виходить із фільтри, мала постійну лінійну швидкість. Як видно з опису волочильного стану, готова продукція може намотуватися на роликові касети, які представляють собою намотувальні барабани з кутовою швидкістю.

Кутова і лінійна швидкості пов'язані між собою співвідношенням:

$$v = \omega R, \quad (1)$$

де R – радіус кола барабана.

З кожним наступним колом (n) намотування готового дроту на барабан його радіус (R) буде збільшуватися на діаметр готового дроту (d_1), що в подальшому впливатиме на лінійну швидкість катанки або на зусилля під час проходження катанки через фільтру і, як наслідок, матиме негативний вплив на якість готової продукції.

Звідси кутова швидкість визначається :

$$\omega = \frac{v}{R + d_1 n}, \quad v = \text{const}.$$

Тому система електропривода повинна забезпечити постійну лінійну швидкість катанки, а саме постійне зусилля, яке необхідне для проходження дроту через фільтри. Це зусилля формується моментом асинхронного двигуна.

Структурна схема представлена на рис. 4.

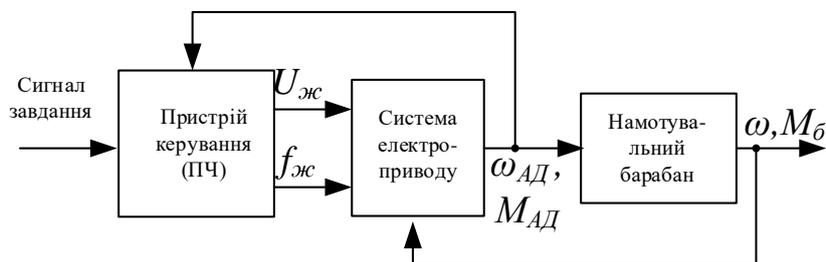


Рис. 4. Структурна схема системи електропривода технологічного механізму

На схемі зазначено елемент керування на базі перетворювача частоти. Перетворювач частоти відповідно до сигналу завдання формує значення напруги ($U_{жс}$) і частоти ($f_{жс}$) джерела живлення. Система електропривода, за заданими параметрами, формує режим роботи з відповідними значеннями швидкості (ω_{AM}) і моменту (M_{AM}) електропривода. Намотувальний барабан є робочим органом зі швидкістю намотки (ω), яка описується математичною залежністю (2). Він, у свою чергу, формує момент опору (M_o), який впливає на зміну параметрів системи електропривода. З урахуванням того, що в системі використовується векторне керування і відсутній зовнішній елемент контролю (датчик швидкості та датчик зусилля), керуючий пристрій формує зміну керуючих параметрів у динамічному режимі за рахунок внутрішніх зворотних зв'язків.

Для визначення пріоритетних режимів роботи електропривода механізму намотки волоочильного стану було виконано математичне моделювання режимів роботи електропривода з перетворювачем частоти. До математичного моделювання було враховано зміну моменту опору робочого органу на зміну кутової швидкості барабана намотки [15].

Дослідження проводилося для асинхронного електродвигуна RA315S4. Паспортні дані двигуна RA315S4; номінальна потужність двигуна $P_{ном}$, кВт – 110; номінальна частота обертання $n_{ном}$, об/хв – 1466; синхронна частота обертання – n_0 , об/хв = 1500; ККД в режимі номінальної потужності = 0,925; коефіцієнт потужності – $\cos\varphi = 0,9$; номінальне ковзання – $S_n = 0,023$; кратність пускового струму – $I_n/I_n = 6,0$; кратність пускового моменту – $M_n/M_n = 1,2$; кратність мінімального моменту – $M_{мін}/M_n = 1$; кратність максимального моменту – $M_{макс}/M_n = 2$; динамічний момент інерції ротора – J_δ , кг/м² = 2,3; число пар полюсів – $2p = 2$.

Для розробки математичної моделі асинхронного двигуна скористаємося наступними правилами:

- числові значення обмоток всіх фаз рівнозначні, тобто розглядається симетричний режим роботи;
- магнітне поле електричної машини має синусоїдалне рівномірне розподілення по усьому повітряному зазору;

- параметри напруги живлення на виході ПЧ приймаємо синусоїдальної форми, не зважаючи увагу на впливу між АД і ПЧ по силовому каналу;
- не враховуються втрати в сталі, що формуються за рахунок існування вихрових струмів в магнітному ланцюзі двигуна і його перемагнічення;
- насичення магнітного кола АД не враховується завдяки накладенню обмежень на статорні струми;
- числове значення струмів за рахунок ефекту витіснення в провідниках ротора дуже малий, тому що частота струмів ротора при живленні від ПЧ обмежена робочим ділянкою механічної характеристики.

Отримана система математичних рівнянь є математичним представленням асинхронного двигуна у обертовій системі координат. З урахуванням умови $\omega = 0$, на основі даної системи математичних рівнянь складемо структурну модель для представлення динамічних процесів в програмному середовищі Matlab

$$\begin{cases} \frac{dI_s}{dt} = \frac{1}{L_e} (U_s - R_e I_s + K_r A_r \Psi_r - K_r \omega_r z_p j \Psi_r) - \omega_k j I_s; \\ \frac{d\Psi_r}{dt} = K_r R_r I_s - A_r \Psi_r - \omega_k j \Psi_r + \omega_r z_p j \Psi_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_{rx} I_{sy} - \Psi_{ry} I_{sx}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{cases}, \quad (2)$$

де I_s – приведений струм статора; L_e – приведений струм електромагнітного кола; U_s – приведена напруга статора; R_e – приведений активний опір електромагнітного кола; R_r – приведений активний опір електромагнітного кола; K_r – коефіцієнт приведення роторний; A_r – коефіцієнт приведення; Ψ_r – приведені потокозчеплення ротора; ω_r – кутова швидкості ротора; M , M_o – момент двигуна і опору відповідно; J – момент інерції системи електропривода.

В частотно-регульованих асинхронних електроприводах векторне управління пов'язане не лише зі зміною частоти, але й з поточними значеннями змінних (напруги, струму статора, потокозчеплення), а також з взаємною орієнтацією їх векторів у декартовій системі координат. Завдяки формуванню числових значень змінних і кутів між фазами цих векторів досягається найбільш ефективно регулювання кутової швидкості, моменту і струму асинхронного двигуна. Під час забезпечення якості технологічного процесу крок регулювання кутової швидкості асинхронного двигуна не повинен перевищувати $D \leq 1:50$, тому застосовуються бездатчикові системи керування асинхронним електроприводом з векторним управлінням. У таких системах інформація про поточні числові значення та інформація про просторове розташування векторів потокозчеплення і числові значення кутової швидкості асинхронного двигуна розраховуються непрямим методом, тобто за миттєвими значеннями струмів і напруг фаз двигуна за математичними виразами математичної моделі асинхронного двигуна [16], [17].

Результати математичного моделювання системи частотно-регульованого електропривода під час пуску і виконання технологічної операції наведені на рис. 5, 6. Для наочності результати представлені у відносних одиницях.

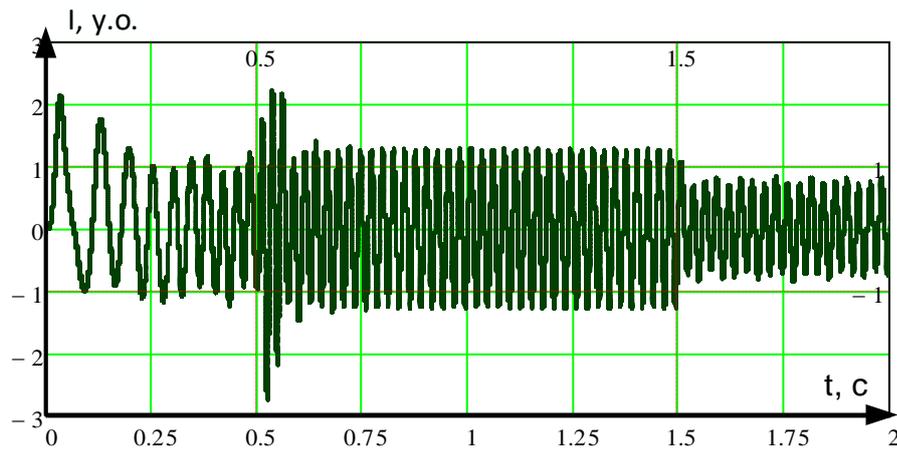


Рис. 5. Графік струму статора під час пуску та збільшені навантаження з 0,5 с до 1,5 с.

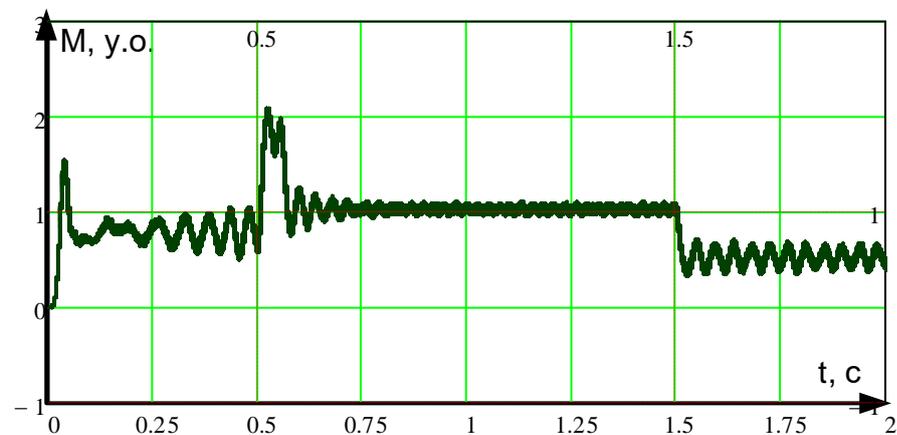


Рис. 6. Графік моменту електропривода під час пуску та збільшені навантаження з 0,5 с до 1,5 с.

Практична реалізація асинхронного електропривода з векторним керуванням пов'язана з певними технічними труднощами, що обумовлені необхідністю вимірювання потокозчеплення ψ_2 , а також потребою в застосуванні прецизійних координатних перетворювачів. Ці труднощі можуть бути вирішені шляхом використання спеціальних алгоритмів для визначення значення ψ_2 та розвитку бездатчикових технологій, що дозволяють зменшити залежність від точності вимірювань і підвищити ефективність системи управління.

Тому система регулювання каналу потокозчеплення повинна будуватися як двоконтурна система підпорядкованого регулювання, кожен з контурів якої налаштовується на модульний оптимум з застосуванням ПІ регуляторів, що компенсують відповідні аперіодичні ланки. Канал регулювання струму і моменту містить одну аперіодичну ланку і налаштовується на модульний оптимум.

Для побудови якісної системи регулювання швидкості дія перехресних зв'язків в структурній схемі двигуна повинна бути компенсована введенням відповідних компенсуючих сигналів. У результаті утворюються два незалежні канали регулювання, в яких параметри регуляторів розраховуються відомими методами.

Перетворювач частоти в такій системі повинен являти собою транзисторний інвертор напруги з синусоїдальною ШІМ-модуляцією на високій частоті. Результати математичного моделювання під час векторного керування наведено на рис. 8-9. Для наочності результати представлені у відносних одиницях.

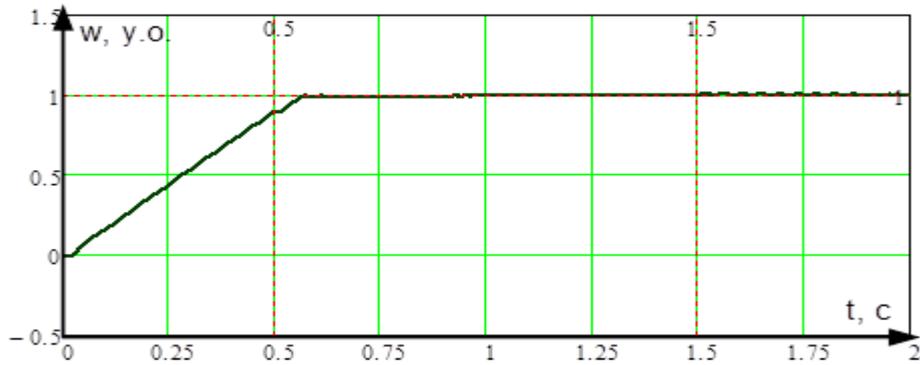


Рис. 7. Графік швидкості електропривода під час пуску та збільшені навантаження з 0,5 с до 1,5 с.

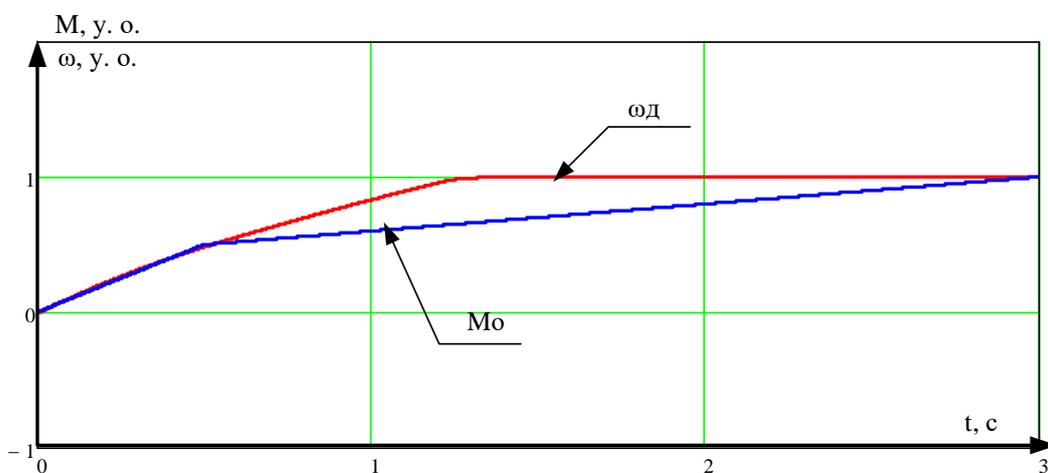


Рис. 8. Графік кутової швидкості (ω_d) і моменту опору (M_o) з урахуванням намотки дроту на барабан

На графіках видно, як змінюється момент опору під час пуску та виходу на робочий режим роботи. Під час векторного керування, за рахунок внутрішніх зворотних зв'язків, перетворювач частоти швидко реагує на зміну моменту опору і відповідно формує необхідний момент двигуна, забезпечуючи стабільність швидкості намотки на барабані.

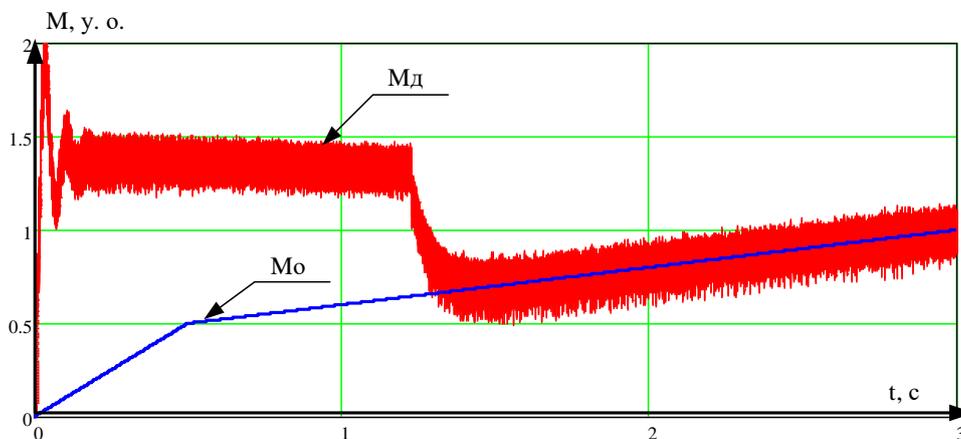


Рис. 9. Графік моменту двигуна (M_d) і моменту опору (M_o) з урахуванням намотки дроту на барабан

ВИСНОВКИ

Аналіз математичних моделей для представлення асинхронного двигуна під час частотного керування дозволив обрати оптимальний варіант представлення фізичних процесів, що проходять під час векторного керування. Встановлено, що залежність електричних і електро-механічних характеристик асинхронного двигуна під час частотного керування дозволяє забезпечити плавність пуску, зупинки стану та забезпечити необхідні показники якості технологічного процесу. Під час роботи волоочильного стану момент опору залежить від кількості витків намотаного дроту на бухту, тому необхідно застосовувати векторний закон частотного керування.

Під час векторного керування система електропривода спрощується за рахунок вилучення елементів контролю швидкості і зусилля, а саме, відсутня необхідність встановлення додаткових пристроїв – датчиків швидкості і датчика натягу дроту. В деяких випадках використовують перетворювач частоти зі скалярними режимами частотного керування. Якщо використовується саме такий ПЧ, то необхідно доповнювати систему електропривода зазначеними датчиками. Використання програмованого елемента керування, таких як програмований логічний контролер або програмоване логічне реле, не є обов'язковим. Сучасні ПЧ зі скалярними законами частотного керування мають як цифрові, так і аналогові входи для організації зворотних зв'язків по контрольним сигналам.

На розробленій математичній моделі виконано математичне моделювання при різних режимах роботи електропривода волоочильного стану і під час зміни моменту опору, що імітує зміну діаметра дроту катанки. Аналіз режимів роботи електропривода волоочильної машини на математичній моделі підтвердив, що розроблений принцип управління електроприводом, а також запропоновані налаштування контурів регулювання забезпечують регулювання швидкості волочіння з похибкою, що не перевищує п'яти відсотків. Таким чином, забезпечуються вимоги технологічного процесу у всіх режимах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вініченко В. С., Єршов А. В., Ольшанецький В. Ю., Волков В. П., Іванченко Е. Ю. Дослідження можливості підвищення пластичності вольфрамового дроту при звичайних температурах шляхом оптимізації технології волочіння. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2023. № 4. С. 32–39.
2. Ключев Д. Ю. Теоретичне обґрунтування та впровадження вдосконаленого процесу волочіння дроту у волоці, що обертається : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05. Дніпро : Нац. металург. акад. України, 2004.
3. Драгобецький В. В., Шаповал О. О., Щепетов В. В. та ін. Керовані ефекти пластичного деформування заготовок виробів для металургії та транспорту. Харків : Друкарня «Мадрид», 2017.
4. Таратута К. В., Проценко В. М., Востоцький С. М. Комп'ютерне моделювання процесу волочіння сплавів на основі титану. *IV Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні моделюючі технології, системи та комплекси» (ІМТСК-2023, 25–26 травня 2023 р., Черкаси)*. Черкаси, 2023. С. 40–42.
5. Соловійова І. А., Николаєнко Ю. М. Вдосконалення методики і розробка програмного забезпечення розрахунку маршрутів виробництва труб безоправочним волочінням з урахуванням точності. *Системні технології*. 2021. № 134. С. 99–106.
6. Піпа Б. Ф., Защепкіна К. О., Загора О. В. Пристрій для намотування ниткоподібного матеріалу на хрестоматальній машині : деклараційний патент на винахід № 70225А, МПК 7 В65Н54/138. Опубл. 2004. Бюл. № 9.
7. Зубков М. П., Якубицька І. А., Прохорова І. А. Пристрій для намотування ниткоподібного матеріалу: пат. 15331А Україна : 65 Н 54/28. Опубл. 1997. Бюл. № 3.
8. Бейгул О. О., Колесник І. А. Динаміка та міцність металургійних машин. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2006.
9. Павленко І. В. Метод скінченних елементів в задачах коливань механічних систем : навч. посібник. Суми : Вид-во СумДУ, 2007.
10. Завертанний Б. С., Манойленко О. П., Акимов О. О. Дослідження впливу зміщення пакування вздовж осі бобінотримача на критичні швидкості. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія Технічні науки. 2020. № 2 (144). С. 13–23.
11. Пристрій для намотування нитки у бобіни : пат. 137209 Україна : МПК (2006) В65Н 54/00, № u201903356 ; заявл. 03.04.2019 ; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19.
12. Хребтова О. А., Зачепа Н. В. Аналіз систем електропривода для виконання рушання та пуску під навантаженням. *Електротехніка та електроенергетика*. 2021. № 4. С. 18–25.

13. Возняк О. М., Штуць А. А., Колісник М. А. Сучасні системи електроприводів. *Теорія та практика*. Частина 1. Вінниця : ТВОРИ, 2021.
14. Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сисюк Г. Ю., Садовой О. В. Моделювання електромеханічних систем : підручник. Кременчук, 2001.
15. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Київ, 2016.
16. Потапенко Є. Є. Векторне керування асинхронними двигунами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03. Харків : Харк. нац. ун-т радіоелектроніки, 2005.

REFERENCES

1. Vinichenko, V. S., Yershov, A. V., Olshanetskyi, V. Yu., Volkov, V. P., & Ivanchenko, E. Yu. (2023). Investigation of the possibility of increasing the plasticity of tungsten wire at ordinary temperatures by optimizing the drawing technology. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, (4), 32–39.
2. Klyuev, D. Yu. (2004). *Theoretical substantiation and implementation of an improved wire-drawing process in a rotating die* (PhD thesis abstract). Dnipro: National Metallurgical Academy of Ukraine.
3. Dragobetskyi, V. V., Shapoval, O. O., Shchepetov, V. V., et al. (2017). *Controlled effects of plastic deformation of blanks for metallurgy and transport*. Kharkiv: Madrid Printing House.
4. Taratuta, K. V., Protsenko, V. M., & Vostotskyi, S. M. (2023). Computer modeling of the drawing process of titanium-based alloys. In *IV International Scientific and Practical Conference "Information Modeling Technologies, Systems and Complexes (IMTSC-2023), May 25–26, 2023, Cherkasy*, pp. 40–42.
5. Soloviova, I. A., & Nikolaienko, Yu. M. (2021). Improvement of methodology and development of software for route calculation of tube production by mandrel-free drawing considering accuracy. *System Technologies*, (134), 99–106.
6. Pipa, B. F., Zashchepkina, K. O., & Zakora, O. V. (2004). Device for winding thread-like material on a cross-winding machine (Declaration Patent No. 70225A, Int. Cl. B65H 54/138). Bulletin No. 9.
7. Zubkov, M. P., Yakubytka, I. A., & Prokhorova, I. A. (1997). Device for winding thread-like material (Patent No. 15331A, Ukraine, Int. Cl. B65H 54/28). Bulletin No. 3.
8. Beihul, O. O., & Kolesnyk, I. A. (2006). *Dynamics and strength of metallurgical machines*. Dniprodzerzhynsk: DDTU.
9. Pavlenko, I. V. (2007). *Finite Element Method in Problems of Vibrations of Mechanical Systems: Textbook*. Sumy: SumDU Publishing House.
10. Zavertannyi, B. S., Manoilenko, O. P., & Akimov, O. O. (2020). Study of the influence of packing displacement along the axis of the bobbin holder on critical speeds. *Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design. Series Technical Sciences*, 2 (144), 13–23.
11. *Device for winding thread into bobbins* (Patent No. 137209, Ukraine, Int. Cl. B65H 54/00, No. u201903356). Filed April 3, 2019; Published October 10, 2019, Bulletin No. 19.
12. Khrebtova, O. A., & Zachepa, N. V. (2021). Analysis of electric drive systems for performing start-up and run-up under load. *Electrical Engineering and Power Engineering*, (4), 18–25.
13. Vozniak, O. M., Shtuts, A. A., & Kolisnyk, M. A. (2021). *Modern Electric Drive Systems: Theory and Practice. Part I*. Vinnytsia: TVORY.
14. Chorny, O. P., Luhovyi, A. V., Rodkin, D. Y., Sysiuk, H. Yu., & Sadovyi, O. V. (2001). *Modeling of Electromechanical Systems: Textbook*. Kremenchuk.
15. Tolochko, O. I. (2016). *Modeling of Electromechanical Systems*. Kyiv.
16. Potapenko, Ye. Ye. (2005). *Vector control of induction motors: systems and control processes* (PhD thesis abstract). Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics.

Khrebtova O., Kitsel N., Shapoval O., Balkunov M., Klymenko I., Shapka A. Using the frequency-regulated electric drive of the drawing stand.

The study aims to analyze methods and electromechanical equipment used in the production of hardware products utilizing wire drawing mills. The research focuses on improving the efficiency of the wire drawing process by optimizing technological parameters and modernizing the electric drive system. The study investigates the most effective wire drawing machines for medium-diameter wire (1.8–3.0 mm). The research highlights that single-pass drawing machines are the most promising due to their ability to enhance the efficiency of the drawing process. This is achieved by optimizing energy-force parameters and increasing the drawing speed. Additionally, mathematical modeling of the wire drawing machine's electric drive system was performed to evaluate its performance under various operational modes. It has been established that improving the efficiency of the wire drawing process can be achieved through the modernization of existing electric drive systems. This modernization leads to a significant increase in the overall efficiency of the drawing process. The study also proves that an increase in drawing speed is possible by implementing a more advanced electric drive control system. The optimization of the energy-force parameters contributes to a reduction in energy consumption while maintaining high productivity. Originality: The research demonstrates that an electric drive system based on a frequency converter and an asynchronous motor is economically advantageous as the main drive for a wire drawing machine. The proposed approach ensures improved energy efficiency, reliability, and precision in speed control during the wire drawing process. The study also confirms that the developed control principle allows for a stable drawing speed with minimal deviation, ensuring high process accuracy. The analysis of the operating modes of the wire drawing machine's electric drive using a mathematical model confirmed that the developed control method

ensures precise speed regulation with an error that does not exceed the predefined limit. The implementation of the proposed control system leads to improved overall process stability and compliance with technological requirements. Additionally, the findings of this study can be applied to industrial-scale wire production, contributing to increased automation and energy efficiency. Thus, the proposed modernization of the electric drive system and optimization of energy-force parameters lead to improved efficiency, reliability, and precision of the wire drawing process. The use of a frequency converter–asynchronous motor system ensures economic benefits and enhances the overall performance of wire drawing machines. The developed approach meets all technological process requirements across different operating modes, making it highly suitable for industrial applications.

Keywords: drawing mill, quality indicators, technological process, frequency-controlled electric drive

Оксана Хребтова – канд. техн. наук, доцент КрНУ
Oksana Khrebtova – PhD Candidate of Technical Sciences, Associate Professor KrNU
E-mail: okkhrebtova@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4369-0262>

Наталія Кіцель – науковий співробітник КЛК ХНУВС
Nataliia Kitsel – researcher the Scientific KFC KNUIA
E-mail: kitselnata@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4414-7226>

Олександр Шаповал – д-р техн. наук, проф., КрНУ
Oleksandr Shapoval – Doctor of Technical Sciences, Professor KrNU
E-mail: alexshap.as@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4303-7124>

Микита Балкунов – аспірант КрНУ
Mykyta Balkunov – Graduate student KrNU
E-mail: balkunovn@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0759-3449>

Ігор Клименко – аспірант КрНУ
Igor Klymenko – Graduate student KrNU
E-mail: uprtal@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3455-5972>

Артем Шапка – аспірант КрНУ
Artem Shapka – Graduate student KrNU
E-mail: artemshapka40@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1901-1542>

КрНУ – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук.
KrNU – Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchuk.

КЛК ХНУВС – Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук
KFC KNUIA – Kremenchuk flight college Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk

Стаття надійшла до редакції 12.09.25 р.