

А. О. БОЙКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0000-0003-0048-9259

В. П. ПЛІС

доктор філософії, доцент,
доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0000-0002-0675-4407

О. С. ПАХОМОВ

аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0007-7885-0098

В. В. ЧЕБАН

аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0003-6432-1364

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАМОТУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

У статті розглянуто процес математичного моделювання асинхронного електропривода намотувального пристрою, що є ключовою складовою технологічної лінії з виробництва кабельної продукції. Основну увагу приділено особливостям роботи електропривода в умовах змінної динаміки системи, пов'язаної зі зміною моменту інерції, радіуса намотки та навантаження протягом робочого циклу. Окреслено необхідність підтримання стабільного натягу кабелю та синхронізації швидкості намотування з іншими етапами виробничої лінії, що визначає якість та надійність готової продукції. Запропоновано узагальнену математичну модель електромеханічної системи, побудовану на основі рівнянь у координатах α - β з урахуванням принципів векторного керування та сучасних підходів до регулювання частоти й моменту. Модель дозволяє врахувати взаємодію електричних і механічних параметрів системи, що забезпечує достовірне відтворення реальних режимів роботи та створює основу для подальшої оптимізації системи керування. У ході дослідження отримано перехідні процеси пуску електропривода, зміни режимів у момент переходу між шарами намотки, а також поведінку системи протягом усього циклу роботи. Проведено аналіз впливу змінних навантажень та параметрів барабана на швидкість, момент і струми статора. Побудовані графіки зміни основних параметрів системи у часі дали змогу оцінити динамічні властивості привода. Показано, що застосування адаптивного регулятора швидкості дозволяє підтримувати стабільні робочі характеристики, мінімізувати перевантаження та забезпечити енергоефективність функціонування системи. Результати моделювання підтверджують доцільність використання розробленої моделі для практичних рішень у високоточних технологічних процесах, де необхідний сталий контроль натягу кабелю. Водночас підкреслюється можливість інтеграції моделі у сучасні цифрові системи керування, що відкриває перспективи для модернізації існуючих виробничих ліній та створення нових енергоефективних рішень.

Ключові слова: намотувальний пристрій, асинхронний електропривод, система керування, математичне моделювання, частотне керування, перехідні процеси.

А. О. БОЙКО

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of the Power Supply and Energy Management
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-0048-9259



V. P. PLIS

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Power Supply and Energy Management
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-0675-4407

O. S. PAKHOMOV

Postgraduate Student at the Department of Power Supply and Energy Management
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0007-7885-0098

V. V. CHEBAN

Postgraduate Student at the Department of Power Supply and Energy Management
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0003-6432-1364

MATHEMATICAL MODELING OF AN INDUCTION MOTOR DRIVE FOR A WINDING MACHINE

The article considers the process of mathematical modeling of an asynchronous electric drive of a winding device, which is a key component of a technological line for the production of cable products. The main attention is paid to the peculiarities of the operation of the electric drive in conditions of variable system dynamics associated with changes in the moment of inertia, winding radius and load during the operating cycle. The need to maintain stable cable tension and synchronize winding speed with other stages of the production line is outlined, which determines the quality and reliability of the finished product. A generalized mathematical model of an electromechanical system is proposed, built on the basis of equations in α - β coordinates, taking into account the principles of vector control and modern approaches to frequency and torque control. The model allows taking into account the interaction of electrical and mechanical parameters of the system, which ensures reliable reproduction of real operating modes and creates a basis for further optimization of the control system. During the study, transient processes of starting the electric drive, changes in modes at the moment of transition between winding layers, as well as the behavior of the system throughout the entire operating cycle were obtained. An analysis of the influence of variable loads and drum parameters on speed, torque, and stator currents was conducted. The constructed graphs of changes in the main parameters of the system over time made it possible to evaluate the dynamic properties of the drive. It is shown that the use of an adaptive speed controller allows maintaining stable operating characteristics, minimizing overloads and ensuring energy efficiency of the system operation. The simulation results confirm the feasibility of using the developed model for practical solutions in high-precision technological processes, where constant control of cable tension is required. At the same time, the possibility of integrating the model into modern digital control systems is emphasized, which opens up prospects for the modernization of existing production lines and the creation of new energy-efficient solutions.

Key words: winding machine, induction motor drive, control system, mathematical modeling, frequency control, transient processes.

Постановка проблеми

Кабельна продукція займає важливе місце в сучасній промисловості, енергетиці та телекомунікаціях. Виготовлення кабелю є багатоступеневим технологічним процесом. Кожному етапу передують ретельне налаштування та координація роботи спеціального обладнання. Сучасна технологічна лінія з виробництва кабелю – це автоматизований комплекс, де особливе значення має правильна організація завершального етапу укладання готового кабелю. Для цього до складу технологічної лінії включається спеціалізований намотувальний пристрій, що забезпечує акуратне, рівномірне та безпечне намотування кабелю після всіх стадій обробки. Намотувальний пристрій відіграє ключову роль у забезпеченні якості та безпеки продукції при транспортуванні та подальшому використанні. Він повинен не лише утримувати постійний натяг кабелю, а й синхронізуватися зі швидкістю всієї виробничої лінії, забезпечуючи рівномірне укладання. Для стабільної та точної роботи цього технологічного вузла використовується електропривод (ЕП), від характеристик якого залежать точність укладання, рівномірність натягу та синхронність з іншими ділянками лінії. Електропривод намотувального пристрою повинен забезпечувати плавний пуск та гальмування, регулювання швидкості обертання. Сучасні вимоги до якості продукції висувають високі вимоги до стабільності натягу та динаміки, особливо при роботі з тонкими або чутливими кабельними виробами.

Застосування асинхронних ЕП у намотувальних пристроях забезпечує підвищення надійності, зниження експлуатаційних витрат та підвищення енергоефективності без втрати точності керування. При цьому сучасний розвиток систем керування усуває традиційні недоліки асинхронних приводів, роблячи їх кращим вибором для модернізації та нового проектування. Широке використання асинхронних ЕП у намотувальному устаткуванні формує проблему їх методів розрахунку, моделювання та дослідження режимів роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В даний час у літературі сформовано основні технічні та економічні переваги використання ЕП змінного струму в намотувальних машинах, порівняно з традиційними ЕП постійного струму [1, 2]. Застосування асинхронних ЕП забезпечує зниження витрат на їхнє обслуговування, підвищує надійність всієї технологічної лінії [3]. Сумісність із сучасними цифровими системами керування робить асинхронні частотні ЕП оптимальним рішенням для подальшої модернізації [4]. Результати дослідження демонструють значне покращення енергоефективності намотування при використанні асинхронних ЕП, що важливо в сучасних умовах енергозбереження та підвищення екологічності виробництва [5]. Пропонуються нові методи векторного керування асинхронними ЕП, адаптовані до завдань точного позиціонування в намотувальних пристроях [6]. Детальний розбір алгоритмів регулювання швидкості та крутного моменту, що забезпечують високу динаміку та стабільність процесу намотування, формує технічні рішення щодо інтеграції нових систем керування, настроювання контролерів та адаптації механічної частини промислових намотувальних пристроїв [7]. Порівняльний аналіз динамічних характеристик ЕП постійного струму та асинхронних двигунів ілюструє перехідні процеси, точність позиціонування та стійкість регулювання під навантаженням. Висновки підтверджують можливість заміни традиційних приводів постійного струму асинхронними із збереженням вимог до продуктивності [8].

Формування мети дослідження

Метою роботи є синтез та аналіз асинхронного частотного електроприводу намотувального пристрою та дослідження його режимів роботи. Завдання роботи:

- синтез математичної моделі асинхронного ЕП намотувального пристрою та розрахунок її параметрів;
- визначення характеристик зміни основних параметрів ЕП при зміні швидкості намотувального пристрою при переході від одного шару намотування до наступного;
- визначення векторних складових струму статора при пуску двигуна та протягом усього циклу намотування;
- моніторинг часу перехідних процесів, значення перерегулювання, точності підтримки необхідної швидкості обертання електродвигуна.

Викладення основного матеріалу дослідження

Укладання кабелю по ширині котушки здійснюється механічно за допомогою механізму «гладкий вал підшипник», який передає рух на напрямні. Напрямні виконують зворотно-поступальні рухи вздовж осі обертання котушки (рис. 1). Такий механізм дозволяє змінювати крок розкладки залежно від швидкості обертання котушки та діаметра кабелю.

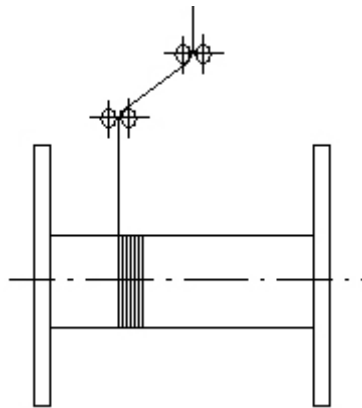


Рис 1. Ілюстрація способу розкладання кабелю

Намотувальний пристрій є останньою технологічною ланкою в цьому процесі та забезпечує намотування на котушку стандартних розмірів [3]. Кабель повинен розташовуватися рівномірно, виток до витка по всій ширині котушки без сплюснювань та провалів витків поточного шару між витками попереднього. Це необхідно для того, щоб уникнути заплутування та перекручування кабелю при розмотуванні з котушки. Враховуючи це, формуються вимоги до ЕП: плавне підхоплення кабелю на початку намотування та підтримання постійної лінійної швидкості в точці намотування, незважаючи на постійну зміну статичного моменту навантаження. Режим роботи електроприводу намотувального пристрою – режим із постійною потужністю [5].

Електропривод обертання котушки містить асинхронний двигун (АД) із короткозамкненим ротором. Швидкість двигуна регулюється перетворювачем за рахунок зміни частоти напруги. Як було зазначено вище, головною метою системи є підтримання постійної лінійної швидкості в точці намотки. Контроль швидкості та її підтримання постійною у точці намотування забезпечується за допомогою компенсатора, який механічно пов'язаний з потенціометром. Потенціометр видає на виході сигнал пропорційний переміщенню компенсатора. У міру «наростання» шарів на котушці змінюється її момент інерції, статичний момент опору системи, а також

приведений до валу двигуна радіус намотування, а, отже, змінюються і параметри регуляторів системи керування. Параметри регуляторів обчислюються та змінюються залежно від даних компенсатора та датчика обер-тання котушки. При моделюванні робиться ряд припущень:

- зміна котушок виконується автоматично, тому технологічні паузи практично відсутні;
- навантажувальні діаграми формуються з припущенням, що швидкість, момент і потужність двигуна не змінюються протягом намотування одного шару;
- кабель під час намотування не розтягується.

Основні параметри виробничої лінії та вихідні дані намотування наведені в табл. 1. Вказана технологічна лінія з виготовлення електричного кабелю аналогічна до однієї з виробничих ліній ПАТ «Одескабель». Результати розрахунку навантажувальної діаграми намотувального пристрою представлені у табл. 2.

Таблиця 1

Вихідні параметри виробничої лінії

Параметр	Значення
Лінійна швидкість лінії V_l , м/с	3,3
Питомий натяг кабелю F_{np} , Н/мм ²	90
Діаметр кабелю $D_{кз}$, м	0,0040
Внутрішній діаметр котушки $D_{в}$, м	0,630
Максимальний діаметр намотування $D_{н}$, м	1,20
Ширина котушки A , м	0,25
Температура довкілля $t_{дов}$, °С	30

Таблиця 2

Значення навантажувальної діаграми намотувального пристрою

$n_{ш}$	0	1	7	14	21	28	35	42	49	56	63	71
t, с	0	37	271	566	884	1226	1590	1977	2388	2821	3278	3828
M, Н·м	24,7	25	26,9	29,1	31,3	33,5	35,7	38	40	42	44	47
ω , с ⁻¹	157,1	155,2	144	133	124	116	109	102	97	92	87	83

Потужність на осі котушки залишається незмінною в процесі її намотування і визначається

$$P_K = F_{\partial} \cdot V_{\partial}, \tag{1}$$

де F_{∂} , V_{∂} – сила натягу та швидкість переміщення кабелю:

$$P_K = 1130 \cdot 3,3 = 3729 \text{ Вт.}$$

У табл. 3 наведено отримані значення сімейства механічних характеристик застосовуваного АД АМУ132М4: значення природної механічної характеристики двигуна; початкової механічної характеристики, на якій двигун працює при намотуванні на котушку першого шару кабелю, відповідні $U_{1поч}$, $f_{1поч}$; Кінцевої механічної характеристики при намотуванні останнього шару, відповідні $U_{1кінц}$, $f_{1кінц}$.

Таблиця 3

Параметри механічних характеристик АД намотувального пристрою

Природна									
S, в.о.	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,0
M, Н·м	–	79,97	126,6	154,3	147,2	132,5	118,1	86,1	72,13
M*, в.о.	–	1	1,58	1,93	1,84	1,66	1,48	1,08	0,9
ω , с ⁻¹	157,0	149,15	141,3	125,6	109,9	94,2	78,5	31,4	0
ω^* , в.о.	1	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,2	0
Початкова									
S, в.о.	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5		
M, Н·м	–	29,065	45,8	55,2	52,2	46,8	41,5		
M*, в.о.	–	0,59	0,93	1,12	1,06	0,95	0,84		
ω , с ⁻¹	161,7	153,6	145,53	129,36	113,19	97,02	80,85		
ω^* , в.о.	1	0,95	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5		
Кінцева									
S, в.о.	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5		
M, Н·м	–	24,6	41,1	56,8	59,9	58,1	54,6		
M*, в.о.	–	1	1,7	2,3	2,43	2,36	2,22		
ω , с ⁻¹	104,9	99,6	94,4	83,9	73,43	62,9	52,45		
ω^* , в.о.	0,67	0,63	0,6	0,53	0,47	0,4	0,33		

Керування електроприводами змінного струму ускладнюється низкою факторів, найважливішими з яких є:

1) момент АД визначається перемноженням двох результуючих векторів електромагнітних параметрів статора та ротора і є функцією чотирьох змінних;

2) яскраво виражена взаємодія сил, що намагнічують, статора і ротора АД, взаємне положення яких безперервно змінюється при обертанні ротора;

3) з метою кращого використання у різних режимах роботи двигуна виникає необхідність регулювання його магнітного потоку.

Асинхронний двигун разом з керованими перетворювачами є складними багатозв'язними нелінійними об'єктами керування [9]. Їхній математичний опис пропонується виконати з використанням методу синтезу, заснованого на принципах підпорядкованого керування. Використання цього методу дозволяє спростити математичний опис електроприводу, в тому числі, за рахунок нехтування взаємозв'язком деяких координат і внутрішніх параметрів.

При математичному описі застосовується низка загальноприйнятих припущень [10]:

– намагнічувальні сили обмоток двигуна розподілені синусоїдально протягом контуру повітряного зазору;

– втрати в сталі статора та ротора відсутні;

– обмотки статора та ротора симетричні зі зсувом осей обмоток на 120 ел. град;

– насичення магнітного контуру відсутнє.

Моделювання проводиться на підставі теорії узагальненої електричної машини, у α, β -осях [11]. Обмотки статора і ротора магнітно пов'язані, тому потокозчеплення обмоток статора визначається як струмами, які протікають в обмотці статора, так і струмами, які протікають в обмотці ротора. Потокозчеплення в повітряному зазорі також визначається струмами статора та ротора.

Результати досліджень

Система рівнянь для потокозчеплення в електричній машині [12]:

$$\begin{cases} \overline{\Psi}_s = L_s \cdot \overline{I}_s + L_m \cdot \overline{I}_r \\ \overline{\Psi}_r = L_m \cdot \overline{I}_s + L_r \cdot \overline{I}_r \\ \overline{\Psi}_0 = L_m \cdot (\overline{I}_s + \overline{I}_r) = L_m \cdot \overline{I}_0 \end{cases} \quad (2)$$

де $\overline{\Psi}_s, \overline{\Psi}_r, \overline{\Psi}_0$ – вектори потокозчеплень статора, ротора та в повітряному зазорі; L_s, L_r, L_m – індуктивність статора, ротора та їх взаємна індуктивність; $\overline{I}_s, \overline{I}_r, \overline{I}_0$ – вектори струмів статора, ротора та струму намагнічування.

Із системи (2) визначається вектор струму ротора

$$\overline{I}_r = \frac{\overline{\Psi}_r - L_m \cdot \overline{I}_s}{L_r} \quad (3)$$

або

$$\overline{I}_r = \frac{1}{L_r} \cdot \overline{\Psi}_r - \frac{L_m}{L_r} \cdot \overline{I}_s \quad (4)$$

Величина $\frac{L_m}{L_r}$ є постійною, тому можна записати:

$$\frac{L_m}{L_r} = k_r \quad (5)$$

Тоді

$$\overline{I}_r = \frac{1}{L_r} \cdot \overline{\Psi}_r - k_r \cdot \overline{I}_s \quad (6)$$

Підставляючи цей вислів у перше рівняння системи (2)

$$\overline{\Psi}_s = L_s \cdot \overline{I}_s + \frac{L_m}{L_r} \cdot \overline{\Psi}_r - L_m \cdot k_r \cdot \overline{I}_s \quad (7)$$

або

$$\bar{\Psi}_s = k_r \cdot \bar{\Psi}_r + \bar{I}_s \cdot (L_s - L_m \cdot k_r). \quad (8)$$

Далі

$$\bar{\Psi}_s = k_r \cdot \bar{\Psi}_r + \bar{I}_s \cdot L_s \left(1 - \frac{L_m}{L_s} \cdot k_r \right). \quad (9)$$

Величина $\frac{L_m}{L_s}$ є постійною, тому

$$\frac{L_m}{L_s} = k_s, \quad (10)$$

$$\bar{\Psi}_s = k_r \cdot \bar{\Psi}_r + \bar{I}_s \cdot L_s (1 - k_s \cdot k_r). \quad (11)$$

Можна записати, що

$$L_s \cdot (1 - k_s \cdot k_r) = L'_s, \quad (12)$$

$$\bar{\Psi}_s = k_r \cdot \bar{\Psi}_r + \bar{I}_s \cdot L'_s. \quad (13)$$

Застосувавши вираз для узагальненої машини

$$\bar{U}_{r(1,2)} = R_r \cdot \bar{I}_{r(1,2)} + \frac{d\bar{\Psi}_{r(1,2)}}{dt} + j \cdot (\omega_k - p_n \cdot \omega) \cdot \bar{\Psi}_{r(1,2)} \quad (14)$$

для АД з короткозамкненим ротором можна записати

$$0 = R_r \cdot \bar{I}_{r(1,2)} + \frac{d\bar{\Psi}_{r(1,2)}}{dt} + j \cdot (\omega_k - p_n \cdot \omega) \cdot \bar{\Psi}_{r(1,2)}. \quad (15)$$

Тут

$$\omega_k = \omega_{\Psi_r} \cdot L'_s. \quad (16)$$

Продиференціювавши вираз (15), формується

$$\frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} = k_r \cdot \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + L'_s \cdot \frac{dI_s}{dt}. \quad (17)$$

Можна записати [13]

$$\bar{U}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_{\Psi_r} \cdot \bar{\Psi}_s \quad (18)$$

Вирази (15) та (18) складають систему:

$$\begin{cases} 0 = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j \cdot (\omega_k - p_n \cdot \omega) \cdot \bar{\Psi}_r \\ \bar{U}_s = R_s \cdot \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_{\Psi_r} \cdot \bar{\Psi}_s \end{cases} \quad (19)$$

При підстановці виразу (17) у систему (19)

$$\begin{cases} \overline{U}_s = R_s \cdot \overline{I}_s + k_r \cdot \frac{d\overline{\Psi}_r}{dt} + L'_s \cdot \frac{dI}{dt} + j\omega_{\Psi r} \cdot k_r \cdot \overline{\Psi}_r + j\omega_{\Psi r} \cdot L'_{s2} \cdot \overline{I}_s \\ 0 = \frac{R_r}{L_r} \cdot \overline{\Psi}_r - k_r \cdot R_r \cdot \overline{I}_s + \frac{d\overline{\Psi}_r}{dt} + j \cdot (\omega_{\Psi r} - p_n \cdot \omega) \cdot \overline{\Psi}_r \end{cases} \quad (20)$$

Вектори $\overline{U}_s, \overline{I}_s$ розкладаються на дійсну та уявну частини

$$\begin{cases} \overline{U}_s = U_{s1} + jU_{s2} \\ \overline{I}_s = I_{s1} + jI_{s2} \end{cases} \quad (21)$$

Тоді система (20) набуде вигляду

$$\begin{cases} U_{s1} = I_{s1} \cdot R_s + k_r \cdot \frac{d|\overline{\Psi}_r|}{dt} + L'_s \frac{dI_{s1}}{dt} - \omega_{\Psi r} \cdot L'_{s2} \cdot I_{s2} \\ U_{s2} = I_{s2} \cdot R_s + L'_s \frac{dI_{s2}}{dt} + \omega_{\Psi r} \cdot k_r \cdot |\overline{\Psi}_r| + \omega_{\Psi r} \cdot L'_{s2} \cdot I_{s1} \\ 0 = \frac{R_r}{L_r} |\overline{\Psi}_r| - k_r \cdot R_r \cdot I_{s1} + \frac{d|\overline{\Psi}_r|}{dt} \\ 0 = -k_r \cdot R_r \cdot I_{s2} + (\omega_{\Psi r} - p_n \cdot \omega) \cdot |\overline{\Psi}_r| \end{cases} \quad (22)$$

Переписавши цю систему у формі рівнянь Коші [14], і виразивши швидкість, формується система рівнянь, що представляє математичний опис асинхронного ЕП з векторною системою керування двигуном

$$\begin{cases} \frac{d|\overline{\Psi}_r|}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} |\overline{\Psi}_r| + k_r \cdot R_r \cdot I_{s1} \\ L'_s \cdot \frac{dI_{s1}}{dt} = -I_{s1} \cdot \left(\frac{R_s}{L'_s} + \frac{k_r^2 \cdot R_r}{L'_s} \right) + \frac{k_r \cdot R_r}{L'_s \cdot L_r} |\overline{\Psi}_r| + \omega_{\Psi r} \cdot I_{s2} + \frac{U_{s1}}{L'_s} \\ \frac{dI_{s2}}{dt} = -\frac{R_s}{L'_s} I_{s2} - \omega_{\Psi r} \frac{k_r}{L'_s} |\overline{\Psi}_r| - \omega_{\Psi r} \cdot I_{s1} + \frac{1}{L'_s} U_{s2} \\ \omega_{\Psi r} = \frac{k_r \cdot R_r \cdot I_{s2}}{|\overline{\Psi}_r|} + p_n \cdot \omega \end{cases} \quad (23)$$

На основі системи рівнянь (23) може бути отримана структурна схема моделі електромеханічної системи намотувального пристрою у програмі Simulink Matlab, яка показана на рис. 2. Так як при намотуванні змінюється ряд параметрів: сумарний момент інерції, статичний момент, радіус приведення – виникає необхідність адаптивності системи керування і зміни параметрів регуляторів в процесі намотування [13, 15, 16].

Математичний опис зміни параметрів намотувального пристрою відображено у виразах (24).

Аналіз роботи асинхронного ЕП намотувального пристрою виконувався шляхом математичного моделювання у системі Simulink Matlab. Отримано графіки зміни швидкості та двох проєкцій струму статора при: пуску електроприводу (рис. 3), переході з попереднього шару на наступний, повному циклі намотування (рис. 4) та (рис. 5).

Аналіз отриманих результатів показує, що:

– діапазон змінних параметрів намотувального пристрою в межах намотування однієї котушки: $J_\Sigma = (3,9 \dots 14,5)$ кг·м²; $R_{np} = (0,0063 \dots 0,039)$ м. Коефіцієнт посилення та постійна часу адаптивного регулятора швидкості системи керування, при цьому змінюється в діапазоні $k_{pc} = (707,7 \dots 278,5)$; $T_{pc} = (0,23 \dots 5,71) \cdot 10^{-3}$ с;

– пуск асинхронного ЕП виконується плавно без істотних кидків пускових струмів та перерегулювання. При підхопленні кабелю перерегулювання за швидкістю не перевищує $\sigma_\omega = 0,75\%$. Амплітуди складових векторів струму статора при пуску $I_{s1} = I_{s2} = 80$ А не перевищують допустимі значення. Час пуску $t_{пуск} = 1,76$ с, визначає хорошу швидкодію намотувального пристрою, і, водночас дозволяє йому якісно виконати підхоплення кабелю;

– електропривод намотувального пристрою коректно відпрацьовує цикл намотування. Швидкість АД за рахунок частотного керування змінюється від номінального значення $\omega_{поч} = 157$ рад/с на початку намотування до швидкості $\omega_{кінець} = 83$ рад/с в кінці намотування останнього шару;

– при переході з попереднього шару намотування на наступний перерегулювання ЕП за швидкістю не перевищує $\sigma_\omega = 0,25\%$, а час перехідного процесу складає $t_{mn} = 0,68$ с.

$$\left. \begin{aligned}
 n_{сл} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot D_{np} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot n}{V_{np}} \cdot \left[\frac{\pi \cdot n}{V_{np}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot n}{V_{np}} \cdot D_{\epsilon}^2 + 4 \cdot D_{np} \cdot t_i \right) \right]} - \frac{\pi \cdot n \cdot D_{\epsilon}}{V_{np}}}{V_{np}} \\
 R'_{npi} &= \frac{D_{\epsilon}}{2 \cdot i_p} + \frac{D_{np}}{i_p} \cdot n_{сл} \\
 J_{\Sigma i} &= J_{\delta \epsilon} + J_{мех} + J_{\delta i} \\
 J_{\delta i} &= \frac{m_{\delta} \cdot R_{\delta i}^2}{2} \\
 m_{\delta i} &= m_{ком} + m_{npi} \\
 m_{npi} &= m_{уд} \cdot l_{npi} \\
 l_{npi} &= V_{np} \cdot t_i \\
 R_{\delta i} &= \frac{D_{\epsilon}}{2} + D_{np} \cdot n_{сл i}
 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

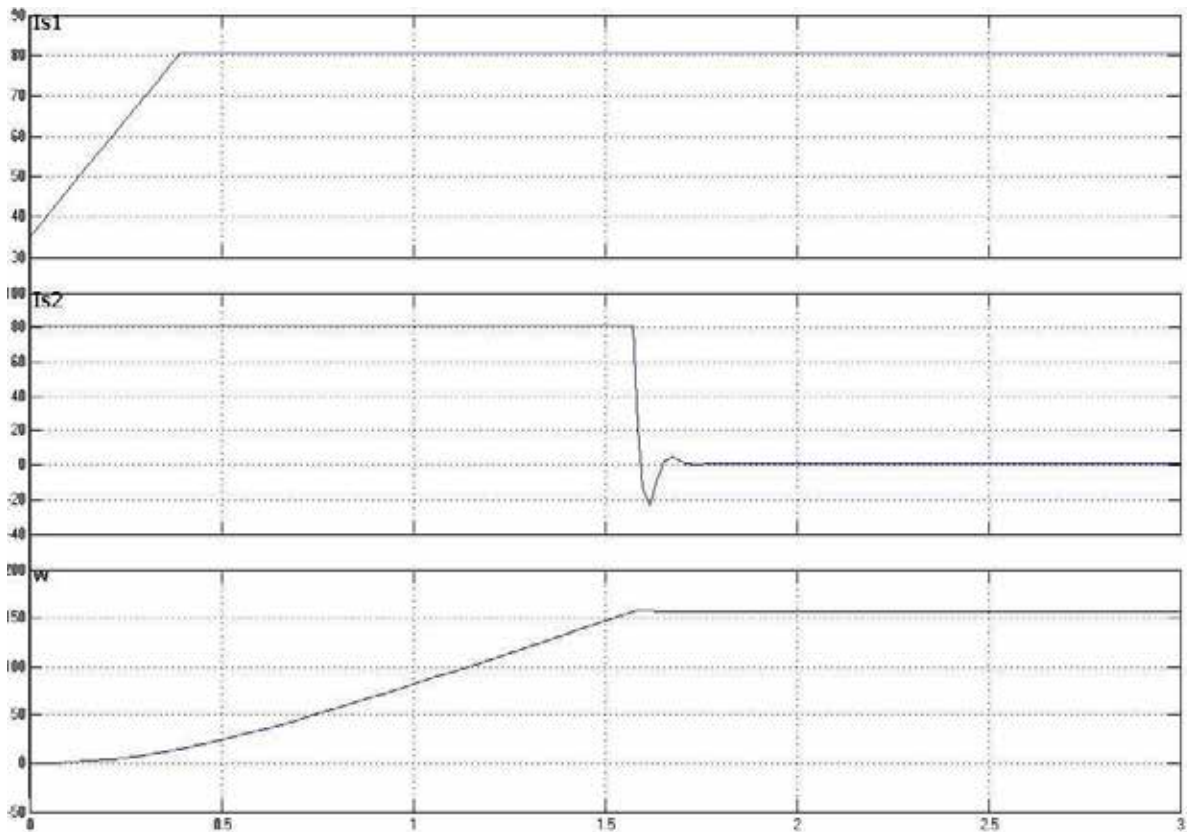


Рис. 3. Перехідні процеси при пуску ЕП намотувального пристрою

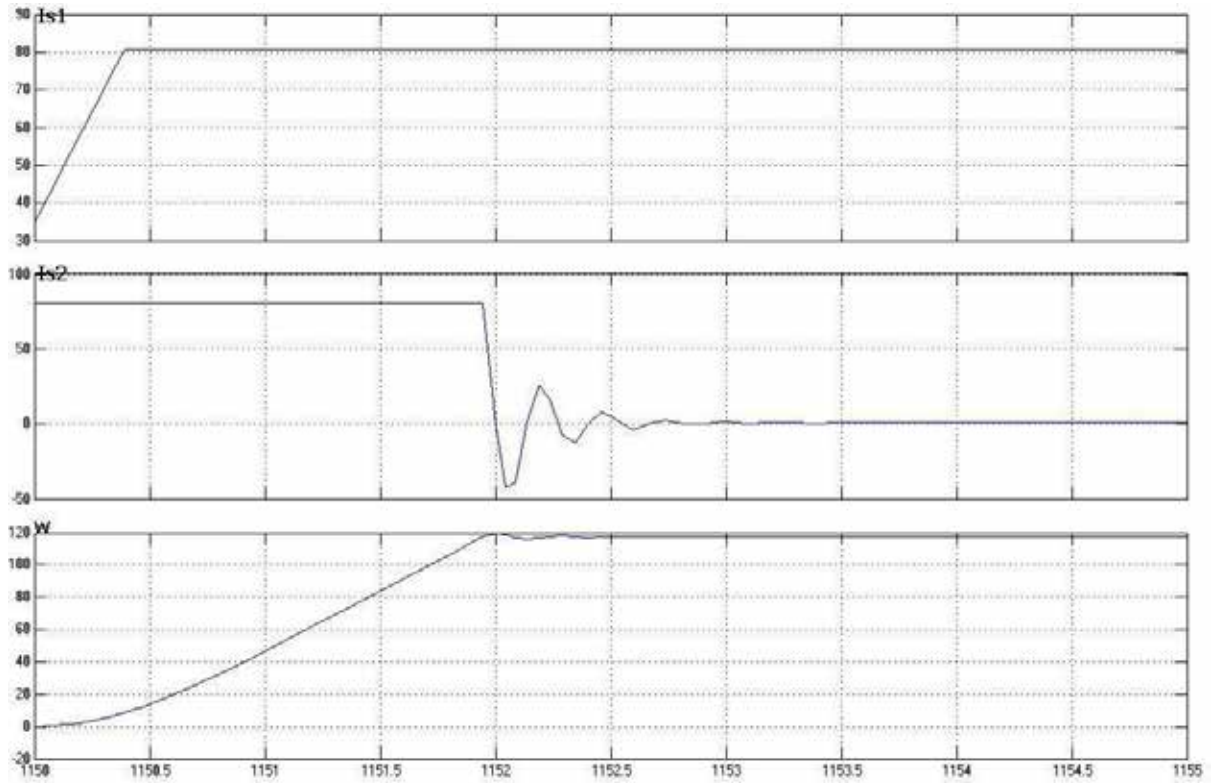


Рис. 4. Перехідні процеси в ЕП під час переходу на наступний шар намотування

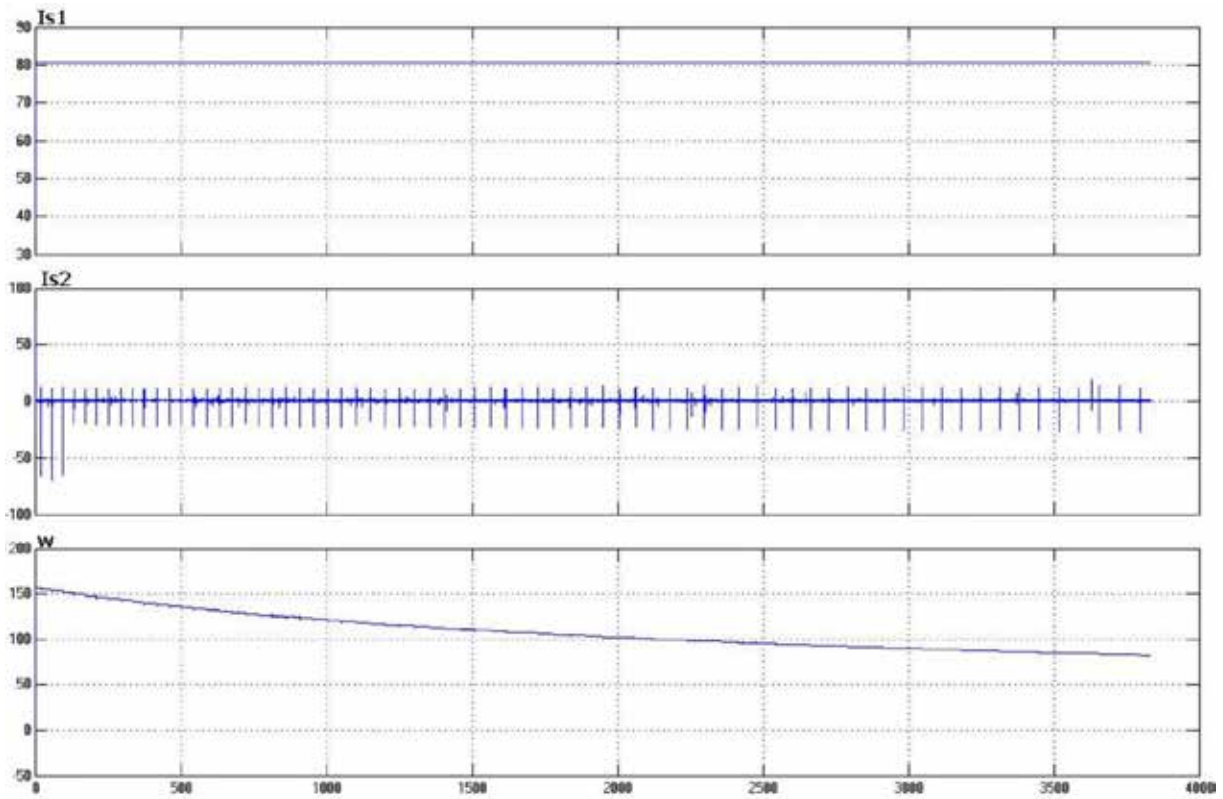


Рис. 5. Перехідні процеси в ЕП при намотуванні однієї котушки

Висновки

Сформовано основні вимоги до електроприводу намотувального пристрою – плавне підхоплення кабелю на початку намотування та підтримання постійної лінійної швидкості в точці намотування з урахуванням постійної зміни статичного моменту навантаження. Режим роботи електроприводу – режим із постійною потужністю.

Двигун змінного струму разом з керованими перетворювачами є складними багатозв'язними нелінійними об'єктами керування. Їхній математичний опис виконується з використанням методу синтезу, заснованого на принципах систем підпорядкованого керування.

Синтезовано математичну модель електромеханічної системи намотувального пристрою. Отримано її функціональну схему в програмі Simulink Matlab. У зв'язку зі зміною параметрів намотувального пристрою в системі керування застосовуються адаптивні регулятори швидкості, параметри яких так само змінюються в процесі намотування.

Пуск асинхронного ЕП виконується плавно без істотних кидків пускових струмів та перерегулювання. При підхопленні кабелю перерегулювання за швидкістю не перевищує допустимих значень. Час пуску ЕП визначає достатню швидкість намотувального пристрою, і в той же час дозволяє йому якісно виконати підхоплення кабелю.

Система керування ЕП коректно відпрацьовує цикл намотування. Швидкість АД, за рахунок частотного керування плавно змінюється від номінального значення, на початку намотування, до мінімального, в кінці намотування останнього шару.

Список використаної літератури

1. Fang H., Tang W. Research and design of AC winder control system. *2010 2nd IEEE international conference on information management and engineering*. Chengdu, China. 2010. P. 50–52. URL: <https://doi.org/10.1109/icime.2010.5477541>.
2. Jones M., Dujic D., Levi E. A five-phase two-motor centre-driven winder with series-connected motors. *IECON 2007 – 33rd annual conference of the IEEE industrial electronics society*. Taipei, Taiwan. 2007. P. 1324–1329. URL: <https://doi.org/10.1109/iecon.2007.4459982>.
3. Seshadri A., Pagilla P. R. Modeling and control of a rotating turret winder used in roll-to-roll manufacturing. *Control engineering practice*. 2015. Vol. 41. P. 164–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.04.009>.
4. Kytaev A., Yakymchuk H. Selection of an asynchronous motor for a variable frequency winder. *Electrical and computer systems*. Kyiv: Tekhnika. 2019. No. 27. P. 52–56. URL: <https://eltechs.op.edu.ua/journal/article/1114>.
5. Polilov E. Synthesis of relay tension bar of the indirect action of the electric drive winder, taking into account the elasticity of the kinematic links in the space of the original coordinates. *Electrical and computer systems*. Kyiv: Tekhnika. 2023. No. 61. P. 11–16. URL: <https://eltechs.op.edu.ua/journal/article/2191>.
6. Larin V. Y. Methods of monitoring motion parameters of winders. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2014. Vol. 4, no. 9(70). P. 10–14. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26272>.
7. Cazac V., Nuca I. The control system modeling of winder with hybrid Fuzzy-PID controller. *2016 international conference and exposition on electrical and power engineering (EPE)*. Iasi, Romania. 2016. P. 492–497. URL: <https://doi.org/10.1109/icepe.2016.7781389>.
8. Wang B., Zheng X., Bao J., Li J. A neural network-based energy consumption prediction model for feature selection and parameter optimization of winders. *2020 IEEE international conference on networking, sensing and control (ICNSC)*. Nanjing, China. 2020. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.1109/icnsc48988.2020.9238073>.
9. Приймак Б. І. Деякі особливості задачі максимізації моменту векторно-керованих асинхронних двигунів у режимі ослаблення поля. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. № 46, 2025. С. 30–42. URL: <https://prc.ied.org.ua/proceedings/article/view/256>.
10. Malyar V. S., Namola O. Y., Maday V. S. Modelling of dynamic modes of an induction electric drive at periodic load. *Electrical engineering & electromechanics*. 2020. No. 3. P. 9–14. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.02>.
11. Андрющенко О. А., Бойко А. О., Бересан О. О. Математичне моделювання системи електроприводу ТПН–АД у пакеті Matlab Simulink. *Математичне моделювання*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010. С. 39–42. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf>.
12. Boiko A., Besarab O., Plis V. Peculiarities of mathematical modeling of an induction motor taking into account its nonlinearities. *Odes'kyi politechnichnyi universytet pratsi*. 2022. Vol. 2, no. 66. P. 32–43. URL: <https://doi.org/10.15276/oru.2.66.2022.04>.
13. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Київ, НТУУ «КПІ». 2016. 150 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15658/1/Modelyuvannia_asunxron_system.pdf.
14. Семенюк М., Куцик А., Мисюренко В. Математичне моделювання частотно-керованого електроприводу з двообмотковою асинхронною машиною з врахуванням просторових гармонік. *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2023. Т. 5, № 1. С. 47–59. URL: <https://doi.org/10.23939/sepes2023.01.047>.

15. Ansari A., Deshpande D. Mathematical Model of Asynchronous Machine in MATLAB Simulink. *International journal of engineering science and technology*. 2010. Vol. 2(5). P. 1260–1267. URL: <https://www.researchgate.net/publication/50273958>.
16. Sharma G., Parashar D., Chandel A. Analysis of dynamic model of three phase induction motor with MATLAB/SIMULINK. *2020 international conference on advances in computing, communication & materials (ICACCM)*, Dehradun, India. 2020. P. 51–58. URL: <https://doi.org/10.1109/icaccm50413.2020.9212965>.

References

1. Fang, H., & Tang, W. (2010). Research and design of AC winder control system. *2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*, 50–52. <https://doi.org/10.1109/icime.2010.5477541>.
2. Jones, M., Dujić, D., & Levi, E. (2007). A five-phase two-motor centre-driven winder with series-connected motors. *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1324–1329. <https://doi.org/10.1109/iecon.2007.4459982>.
3. Seshadri, A., & Pagilla, P. R. (2015). Modeling and control of a rotating turret winder used in roll-to-roll manufacturing. *Control Engineering Practice*, 41, 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2015.04.009>.
4. Kytayev A., & Yakymchuk H. (2019). Selection of an asynchronous motor for a variable frequency drive winder. *Electrical and Computer Systems*, 27, 52–56. <https://eltechs.op.edu.ua/journal/article/1114>.
5. Polilov E. (2023). Synthesis of relay tension bar of the indirect action of the electric drive winder, taking into account the elasticity of the kinematic links in the space of the original coordinates. *Electrical and Computer Systems*, 61, 11–16. <https://eltechs.op.edu.ua/journal/article/2191>.
6. Larin, V. Y. (2014). Methods of monitoring motion parameters of winders. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(9(70)), 10–14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.26272>.
7. Cazac, V., & Nuca, I. (2016). The control system modeling of winder with hybrid Fuzzy-PID controller. *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 492–497. <https://doi.org/10.1109/icepe.2016.7781389>.
8. Wang, B., Zheng, X., Bao, J., & Li, J. (2020). A neural network-based energy consumption prediction model for feature selection and parameter optimization of winders. *2020 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/icnsc48988.2020.9238073>.
9. Pryimak, B. I. (2025). Deiaki osoblyvosti zadachi maksymizatsii momentu vektorno-kerovanykh asynkhronnykh dvyhuniv u rezhymi oslablennia polia. [Some features of torque maximization of vector-controlled induction motors in field weakening mode]. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (46), 30–42. <https://prc.ied.org.ua/proceedings/article/view/256>.
10. Malyar, V. S., Hamola, O. Y., & Maday, V. S. (2020). Modelling of dynamic modes of an induction electric drive at periodic load. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (3), 9–14. <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.02>.
11. Andriushchenko, O. A., Boiko, A. O., & Beresan, O. O. (2013). Matematychni modeliuvannia systemy elektropryvodu TPN–AD u paketi Matlab Simulink. [Mathematical modeling of the TPN–IM electric drive system in the Matlab Simulink package]. *Mathematical Modeling*. Dniprodzerzhynsk: Dniprodzerzhynsk State Technical University, 21(2), 57–60. <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/74/66/15st-11.pdf>.
12. Boiko, A., Besarab, O., & Plis, V. (2022). Peculiarities of mathematical modeling of an induction motor taking into account its nonlinearities. *Odes'kyi politechnichniy universytet pratsi*, 2(66), 32–43. <https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.04>.
13. Tolochko, O. I. (2016). *Modeliuvannia elektromekhanichnykh system. Matematychni modeliuvannia systemasynkhronnoho elektropryvodu* [Modeling of electromechanical systems. Mathematical modeling of asynchronous electric drive systems]. NTUU "KPI". https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/15658/1/Modelyuvannia_asunxron_system.pdf.
14. Semenyuk, M., Kutsyk, A., & Misiurenko, V. (2023). Matematychni modeliuvannia chastotno-kerovanoho elektropryvodu z dvoobmotkovoiu asynkhronnoiu mashynoiu z vrakhuvanniam prostorovykh harmonik [Mathematical modeling of a frequency-controlled electric drive with a double-winding asynchronous machine taking into account spatial harmonics]. *Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*, 5(1), 47–59. <https://doi.org/10.23939/sepes2023.01.047>.
15. Ansari, A., & Deshpande, D. (2010). Mathematical model of asynchronous machine in MATLAB Simulink. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(5), 1260–1267. <https://www.researchgate.net/publication/50273958>.
16. Sharma, G., Parashar, D., & Chandel, A. (2020). Analysis of dynamic model of three phase induction motor with MATLAB/SIMULINK. *2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM)*, 51–58. <https://doi.org/10.1109/icaccm50413.2020.9212965>.

Дата першого надходження статті до видання: 16.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026