

М.М. Заблодський, В.Є. Плюгін, С.І. Ковальчук, В.О. Тетерев

Непряме полеорієнтоване керування двошнековим електромеханічним гідролізером

У статті детально розглянуто конструктивні і електромагнітні особливості нестандартного електромеханічного перетворювача енергії – двошнекового електромеханічного гідролізера. Це технічний пристрій з поліфункціональними властивостями, здатний одночасно нагрівати, диспергувати, транспортувати, перемішувати та надавати вплив магнітним полем в одному пристрої робочу сировину. Розроблено коло-польові та математичні моделі електромагнітних перехідних процесів цього пристрою. Основні параметри електромеханічної системи визначено шляхом кінцево-елементного моделювання та практичною дослідження феромагнітного ротора. В роботі представлено керування обертовим моментом та кутовою швидкістю феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера шляхом непрямого полеорієнтованого керування. Шляхом реалізації MATLAB / Simulink моделі отримано графічні залежності основних параметрів феромагнітного ротора за умов ступінчастої зміни обертового моменту та циклічної зміни кутової швидкості. За результатами моделювання помітно доцільність застосування методу непрямого керування з орієнтацією на поле для ефективного керування технологічним процесом двошнекового електромеханічного гідролізера. В порівнянні з розглянутими методами керування, непряме керування з орієнтацією на поле більш просте в проектуванні та реалізації, дозволяє досягнути бажаних характеристик та відкриває подальші можливості для дослідження двошнекового електромеханічного гідролізера. Бібл. 19, табл. 4, рис. 21.

Ключові слова: рівняння Максвелла, непряме керування з орієнтацією на поле, поліфункціональний електромеханічний перетворювач, гідролізер, дисипативна енергія.

Вступ. Ефективне використання енергетичних ресурсів – важливе завдання сучасності. Розробка енергозберігаючих технологій безпосередньо пов'язана з підвищенням ККД окремих елементів системи, інтегруванням функціональних особливостей системи в одному пристрої та використанні дисипативної енергії. Оскільки підвищення ККД, за умови досягнення певного рівня оптимізації системи, досягається шляхом розробки нових активних та ізоляційних матеріалів, то методи його підвищення обмежені. Для технологічних систем, що об'єднують в собі процеси переміщення, нагріву та перемішування матеріалів найбільш ефективним слід вважати метод використання дисипативної енергії [1]. За умов згаданого раніше інтегрування функціональних особливостей системи в одному пристрої та використання дисипативної енергії, стає можливим заощадження ресурсів, що за традиційних схем перетворення і використання енергії витрачалися, розсіювалися у вигляді тепла в навколишнє середовище. В межах методу використання дисипативної енергії розроблено двошнековий електромеханічний гідролізер для переробки побічних продуктів птахівництва під впливом магнітного поля. Двошнековий електромеханічний гідролізер – це технічний пристрій з поліфункціональними властивостями, здатний одночасно нагрівати, диспергувати, транспортувати, перемішувати та надавати вплив магнітним полем в одному пристрої. Основним робочим елементом двошнекового електромеханічного гідролізера є феромагнітний ротор (рис. 1). Феромагнітний ротор одночасно працює як ротор індукційного двигуна, нагрівач, робочий елемент та захисна оболонка [2].

Електромагнітна система двошнекового електромеханічного гідролізера складається зі статорів, що жорстко закріплені на нерухомому валу. Під час проходження струму по обмоткам статорів вони створюють електромагнітні моменти, що приводять в рух феромагнітний ротор.

Оскільки двошнековий електромеханічний гідролізер відноситься до пристроїв, що об'єднують декілька технологічних процесів, для його роботи необхідно

забезпечити ефективне керування електромагнітним моментом та швидкістю обертання феромагнітного ротора. Одержання необхідних параметрів швидкості та моменту обертання можливе за умов керування спільною роботою двох статорів, один з яких працює в руховому режимі, інший – у генераторному режимі, однак з ростом жорсткості результуючої характеристики помітно знижується перевантажувальна здатність агрегату, тому існує необхідність в розробці іншого більш ефективного методу керування.

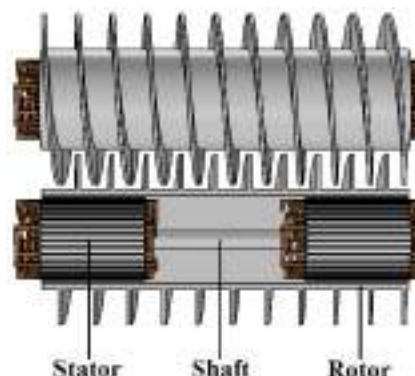


Рис. 1. Феромагнітний ротор двошнекового електромеханічного гідролізера

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи керування електричними машинами змінного струму – складне завдання. У сфері високоєфективних методів контролю швидкості і моменту найбільшого поширення набули два методи – полеорієнтоване керування та пряме керування моментом [3-5]. В більшості випадків цих методів достатньо для задоволення більшості промислових потреб, однак внаслідок стрімкого розвитку цифрових технологій все більше досліджень проводиться в області нелінійного керування [6]. Серед останніх публікацій відомо багато робіт присвячених різним методам керування електричними машинами. Керування асинхронним двигуном за методом непрямого полеорієнтованого керування з врахуванням впливу збурень опору ротора

© М.М. Заблодський, В.Є. Плюгін, С.І. Ковальчук, В.О. Тетерев

виконано в роботах [3, 7]. В роботах наведено загальні рекомендації для проектування системи керування, вказано критерії стабільності та мінімально необхідні фазові умови для регулювання обертового моменту, представлено результати експериментального дослідження типового асинхронного двигуна. В роботі [8] представлено метод прогнозованого керування струмом з орієнтацією за полем, що розроблений для трирівневого інвертора з фіксованою нейтральною точкою, для керування трифазним асинхронним двигуном. В методі була застосовано алгоритм розрахунку оптимального вектору перемикавання, визначено контур керування напругою статора, струмом статора і швидкістю ротора двигуна. Результати моделювання мають незначну похибку під час розрахунків потоку ротора та струму статора. Безсенсорне пряме керування моментом асинхронного двигуна, що живиться від семирівневого інвертора з використанням нейронних мереж і контролера нечіткої логіки представлено в роботі [9], нечіткий ПІ-регулятор використовується для керування швидкістю ротора, а штучна нейронна мережа використовується для перемикавання напруги статора. Метод, запропонований в роботі, дозволяє керувати обертовим моментом, зменшити гармонічні викривлення струму статора, покращити динамічні характеристики та надійність системи. Метод керування робочим циклом, що обраний для зменшення пульсації обертового моменту і магнітного потоку при прямому керуванні обертовим моментом, представлено в роботі [10]. Розроблено новий алгоритм точного вибору активної напруги, визначено оптимальну тривалість вмикання при одночасному керуванні магнітного потоку статора та електричного обертового моменту. За результатами дослідження встановлено, що представлений метод забезпечує менші пульсації обертового моменту і магнітного потоку в порівнянні з традиційним методом прямого керування моментом та моделлю, яка забезпечує складання кращої моделі прогнозованого керування за струмом. В роботі [11] розроблено модель прогнозованого обертового моменту і магнітного потоку на основі збурень; методика пригнічення збурень вдосконалена для забезпечення сумісності з теорією скінченних множин; збурення передбачено для всіх можливих станів перемикавання. За результатами досліджень, даний метод покращує стійкість відгуку обертового моменту і струму, значно підвищує стійкість системи до зміни значень опорів статора та ротора в порівнянні з традиційними методами керування.

Представлені в [7-11] методи, що побудовані на основі складних алгоритмів нейронних мереж та нечіткої логіки дозволяють ефективно керувати параметрами електричних машин, однак, в той же час, вони мають певні недоліки: висока складність алгоритмів, значна кількість контрольованих параметрів, високе розрахункове навантаження та необхідність в наявності повноцінної моделі системи [12, 13].

Двошнековий електромеханічний гідролізер – нова електрична машина і більшість його параметрів та характеристик все ще потребують детального дослідження. З існуючих на тепер досліджень, відома повна картина магнітного поля феромагнітного рото-

ра двошнекового електромеханічного гідролізера [2, 14]. Це дозволяє зробити висновок, що для його керування доцільно використовувати метод полеорієнтованого керування.

Метою роботи є дослідження електромагнітних процесів в феромагнітному роторі двошнекового електромеханічного гідролізера та оцінка доцільності використання методу непрямого полеорієнтованого керування гідролізером.

Виклад основного матеріалу. Завдяки простоті непрямого керування з орієнтацією на поле – один з найбільш ефективних способів керування машиною змінного струму. Для ефективного керування обертовим моментом та швидкістю, в моделі складові струму статора повинні бути відділені від векторного магнітного потоку ротора [15]. Оскільки для розробки моделі непрямого керування з орієнтацією на поле необхідно знати параметри електричної машини, існує необхідність в розробці математичної моделі феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера, де не треба знати ці параметри.

Кінцево-елементна модель в часовій області дослідження. В зв'язку з необхідністю отримання високої точності, а також у зв'язку з особливістю конструкції і з необхідністю зниження часу для проектування, в роботі використано програмне середовище Comsol Multiphysics. Аналіз електромагнітного поля проводиться на основі системи рівнянь Максвелла.

Намагніченість феромагнітного ротора задана як $B-H$ крива і визначається з рівняння:

$$B = f(H) \frac{H}{|H|}. \quad (1)$$

В якості джерела струму в моделі використовуються багатовиткові обмотки статора (рис. 2).

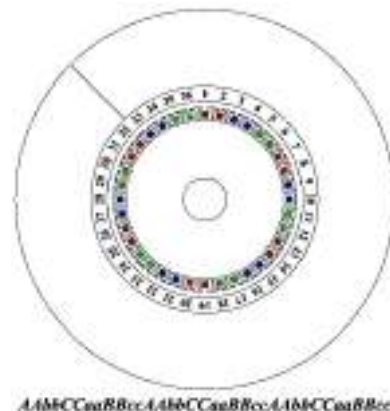


Рис. 2. Схема обмотки статора

На схемі (рис. 2) великими літерами (A, B, C) позначено початок відповідних фаз (провідники виходять із пазу), а малими (a, b, c) – кінець (провідники входять у паз).

Густина струму в обмотці, A/m^2 :

$$J_e = \frac{N \cdot I_{coil}}{A} \cdot e_{coil}, \quad (2)$$

де N – кількість витків в обмотці; A – загальний переріз обмотки, m^2 ; I_{coil} – струм обмотки статора, A ; e_{coil} – векторна змінна (для візуалізації напрямку витків обмотки).

Моделювання здійснено для феромагнітного ротора, кінцево-елементну сітку моделі (рис. 3) було створено в програмному середовищі Comsol Multiphysics. Особливу увагу було приділено повітряному проміжку на межі розподілу між статором і ротором електромеханічного пристрою. Статистика даних щодо параметрів сітки наведена в табл. 1.

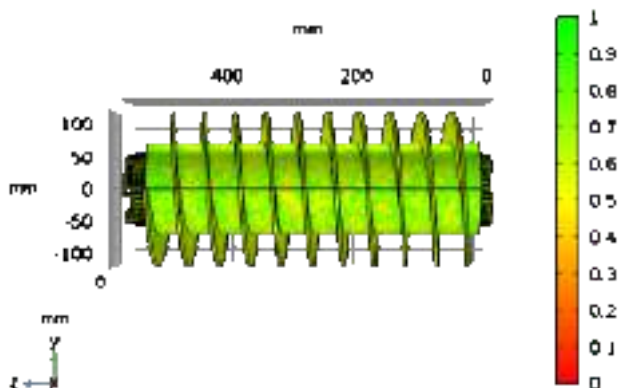


Рис. 3. Кінцево-елементна сітка для моделі феромагнітного ротора двошнекового електромагнітного гідролізера

Таблиця 1
Параметри кінцево-елементної сітки моделі

Параметри сітки	Значення
Кількість вершин сітки	241325
Кількість тетраєдрів	1444151
Кількість трикутників	277074
Кількість ребер	49887
Вертексні елементи	2759
Кількість елементів	1444151
Мінімальна похибка	0,0307
Середня похибка	0,613
Об'ємне співвідношення елементів	2,027E-6
Об'єм сітки	1,251E8 mm ³

MATLAB / Simulink модель непрямого керування з орієнтацією на поле. У випадку орієнтації з низькою швидкістю і для керування положенням з використанням датчика потоку, що оснований на інтеграції, якій властива тенденція дрейфу, модель непрямого керування з орієнтацією на поле може бути не прийнятною для складних електромеханічних систем. Альтернативою може бути непряме керування з орієнтацією на поле без вимірювання потоку в повітряному проміжку [16]. За таких умов обертовий момент може регулюватись q -компонентою струму статора i_{qs}^e і різницею в кутових частотах обертання магнітного поля статора і ротора $\omega_e - \omega_r$. Потік ротора можна регулювати d -компонентою струму статора i_{ds}^e . Задаючи деяке бажане значення магнітного потоку ротора λ_{dr}^* , бажане значення d -компоненти струму статора i_{ds}^{e*} може бути отримане з рівняння:

$$\lambda_{dr}^* = \frac{r_r' L_m}{r_r' + L_r p} i_{ds}^{e*}, \quad (3)$$

де λ_{dr}^* – бажане значення d -компоненти магнітного потоку ротора, Вб; r_r' – наведений активний опір

обмотки ротора, Ом; L_m – взаєміндукція обмоток статора, Гл; p – кількість пар полюсів.

Для бажаного значення обертового моменту T_{em}^* при певному значенні потоку ротора, бажане значення q -компоненти струму статора i_{qs}^e описується рівнянням:

$$T_{em}^* = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^{e*} i_{qs}^{e*}, \quad (4)$$

де P – потужність, Вт; L_r' – перехідна індуктивність ротора, Гн.

Оскільки за певної орієнтації поля i_{dr}^e дорівнює нулю, а $\lambda_{dr}^e = L_m i_{ds}^e$, тоді бажана кутова швидкість ротора ω_2^* (рад/с) описується рівнянням:

$$\omega_2^* = \omega_e - \omega_r = \frac{r_r' i_{qs}^{e*}}{L_r i_{ds}^{e*}}, \quad (5)$$

де ω_e – кутова швидкість обертання магнітного поля, рад/с; ω_r – кутова швидкість обертання ротора, рад/с.

Вимірний потік у повітряному зазорі є результируючим або взаємним потоком. Це не те саме, що потік, що зв'язує обмотку ротора, чий кут ρ є бажаним кутом для орієнтації поля. Але, як показує наведений нижче вираз, в поєднанні з вимірним струмом статора можна визначити значення ρ і величину потоку ротора. Вимірні струми статора abc спочатку перетворюються в стаціонарний струм qd за допомогою рівнянь:

$$i_{qs}^s = \frac{2}{3} i_{as} - \frac{1}{3} i_{bs} - \frac{1}{3} i_{cs}, \quad (6)$$

$$i_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{cs} - i_{bs}). \quad (7)$$

Потокозчеплення ротора по осі q в нерухомій системі координат може бути виражене як:

$$\lambda_{qr}^s = (L_m + L_{lr}' - L_{lr}') i_{qs}^s + (L_m + L_{lr}') i_{qr}^s. \quad (8)$$

Оскільки λ_{mq}^s дорівнює $L_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s)$, ми можемо визначити λ_{qr}^s за вимірними величинами, тобто

$$\lambda_{qr}^s = \frac{L_r'}{L_m} \lambda_{mq}^s - L_{lr}' i_{qs}^s. \quad (9)$$

Аналогічно, λ_{dr}^s можна визначити з

$$\lambda_{dr}^s = \frac{L_r'}{L_m} \lambda_{md}^s - L_{lr}' i_{ds}^s. \quad (10)$$

Використовуючи обчислені λ_{qr}^s і λ_{dr}^s , можна визначити косинус і синус ρ за геометричними співвідношеннями:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \cos \rho = \frac{\lambda_{dr}^s}{|\lambda_r^s|}, \quad (11)$$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \sin \rho = \frac{\lambda_{qr}^s}{|\lambda_r^s|}, \quad (12)$$

де

$$|\lambda_r^e| = |\lambda_r^s| = \sqrt{\lambda_{dr}^{s2} + \lambda_{qr}^{s2}}. \quad (13)$$

Наведені вище обчислення (6) – (13) виконуються всередині блоку орієнтації поля. Розрахункове значення $|\lambda_r^e|$ повертається на вхід регулятора потоку, що регулює потік повітряного зазору. Всередині блоку обчислення крутного моменту обчислені значення λ_r^e і i_{qs}^e використовуються для оцінки значення крутного моменту, виробленого машиною, тоді розрахований крутний момент повертається на вхід регулятора крутного моменту.

Відповідні вихідні дані регуляторів крутного моменту та потоку є значеннями команд, i_{qs}^{e*} та i_{ds}^{e*} , у системі відліку ротора, орієнтованого на поле. Всередині блоку перетворення qd в abc відбуваються перетворення з qde в qds і qds в збалансований abc :

$$\begin{cases} i_{qs}^{s*} = i_{qs}^{e*} \cos \rho + i_{ds}^{e*} \sin \rho; \\ i_{ds}^{s*} = -i_{qs}^{e*} \sin \rho + i_{ds}^{e*} \cos \rho; \\ i_{as}^* = i_{qs}^{s*}; \\ i_{bs}^* = -\frac{1}{2} i_{qs}^{s*} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^{s*}; \\ i_{cs}^* = -\frac{1}{2} i_{qs}^{s*} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^{s*}. \end{cases} \quad (14)$$

Орієнтація поля струмів статора також може бути досягнута шляхом застосування належних напруг статора. Оскільки стратегія в польово-орієнтованій схемі полягає в тому, щоб якомога сильніше уникати порушення зв'язку потоку ротора, реагуючи на зміну крутного моменту навантаження, ми можемо використовувати перехідну модель у поєднанні з правильно орієнтованими струмами статора qd для визначення напруги статора, орієнтовані на поле струми статора qd визначаються шляхом перетворення вимірних струмів abc в стаціонарні qd і значення ρ у наведеному нижче перетворенні

$$i_{qs}^e = i_{qs}^s \cos \rho - i_{ds}^s \sin \rho; \quad (15)$$

$$i_{ds}^e = i_{qs}^s \sin \rho + i_{ds}^s \cos \rho. \quad (16)$$

У моделі перехідних процесів для ситуації, коли можна вважати, що потокозчеплення ротора залишається постійним, машина може бути представлена постійною напругою за перехідною індуктивністю статора. Потокозчеплення статора може бути виражено лише через струми статора та потокозчеплення ротора, тобто

$$\lambda_{qs}^e = L_s' i_{qs}^e + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{qr}^e; \quad (17)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s' i_{ds}^e + \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e; \quad (18)$$

$$L_s' \frac{di_{qs}^e}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{qr}^e}{dt} = v_{qs}^e - r_s i_{qs}^e - E_{qs}' - \omega_e L_s' i_{ds}^e; \quad (19)$$

$$L_s' \frac{di_{ds}^e}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\lambda_{dr}^e}{dt} = v_{ds}^e - r_s i_{ds}^e - E_{ds}' + \omega_e L_s' i_{qs}^e. \quad (20)$$

Встановлюючи похідні за часом потокозчеплення ротора на нуль і переставляючи так, щоб ліва сторона містила суму напруги за перехідним опором і падіння напруги на перехідному опорі статора, тоді отримуємо

$$r_s i_{qs}^e + L_s' \frac{di_{qs}^e}{dt} + E_{qs}' = v_{qs}^e - \omega_e L_s' i_{ds}^e; \quad (21)$$

$$r_s i_{ds}^e + L_s' \frac{di_{ds}^e}{dt} + E_{ds}' = v_{ds}^e + \omega_e L_s' i_{qs}^e. \quad (22)$$

Налаштувавши виходи регуляторів крутного моменту та потоку для струму перехресного зв'язку, ми отримуємо потрібні значення команд для v_{qs}^e і v_{ds}^e . Значення команд для напруг статора abc можна розрахувати наступним чином

$$\begin{cases} v_{qs}^{s*} = v_{qs}^e \cos \rho + v_{ds}^e \sin \rho; \\ v_{ds}^{s*} = -v_{qs}^e \sin \rho + v_{ds}^e \cos \rho; \\ v_{as}^* = v_{qs}^{s*}; \\ v_{bs}^* = -\frac{1}{2} v_{qs}^{s*} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{ds}^{s*}; \\ v_{cs}^* = -\frac{1}{2} v_{qs}^{s*} + \frac{\sqrt{3}}{2} v_{ds}^{s*}. \end{cases} \quad (23)$$

Бажана швидкість обертання ротора, менша ніж номінальна з визначеною номінальною напругою живлення описується рівняннями:

$$(v_{qs}^e - jv_{ds}^e) = (r_s + j\omega_e L_s') \cdot (i_{qs}^e - ji_{ds}^e) + (E_{qs}' - jE_{ds}'); \quad (24)$$

$$T_0 = \frac{x_{lr} + x_m}{\omega_e r_r}, \quad (25)$$

де v_{qs}^e , v_{ds}^e – q та d компонента напруги, В; r_s – активний опір обмотки статора, Ом; L_s' – перехідна індуктивність статора, Гн; E_{qs}' , E_{ds}' – q та d компонента напруги намагнічування, В; x_{lr} – індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, Ом; x_m – індуктивний опір намагнічування осердя статора, Ом.

Результати моделювання. Кінцево-елементне моделювання було здійснено для моделі з параметрами наведеними в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри статора двошнєкового електромеханічного гідролізера

Обрані параметри	
Струм обмотки статора	10,5 А
Час моделювання	Діапазон(0, 0.1, 1) с

Матеріалами моделі були обрані:

- Soft Iron (without losses) – в якості матеріалу осердь статорів;
- Iron – в якості матеріалу валу;
- Copper – в якості матеріалу обмотки статорів.

Матеріали були обрані з бібліотеки матеріалів програмного середовища. В якості матеріалу для феромагнітного ротора було обрано сталь Ст3, крива намагнічування якої представлена на рис. 4.

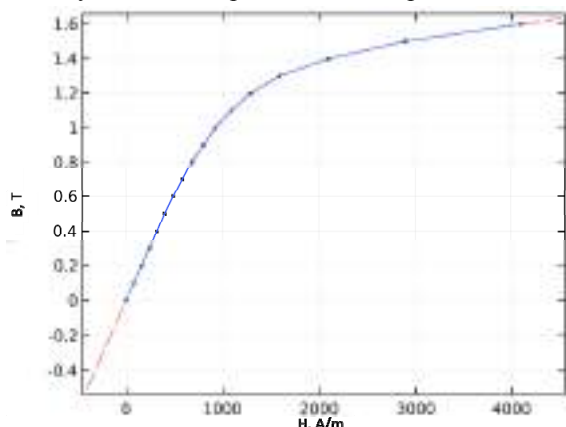


Рис. 4. В-Н крива намагнічування сталі Ст3

Картина розподілу магнітної індукції для номінального режиму роботи феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера представлено на рис. 5.

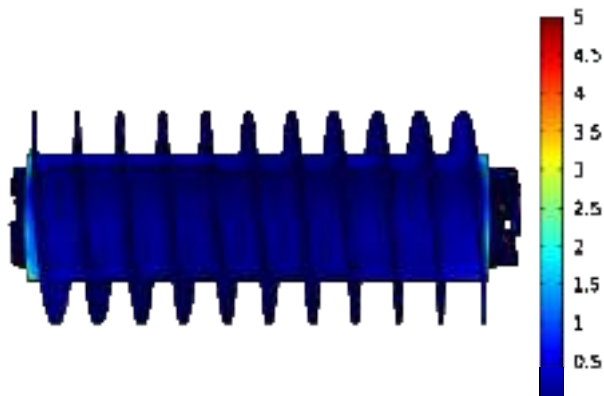


Рис. 5. Картина розподілу магнітної індукції для моделі феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера, Тл

Графічне представлення розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера, на початку та в кінці моделювання представлено на рис. 6.

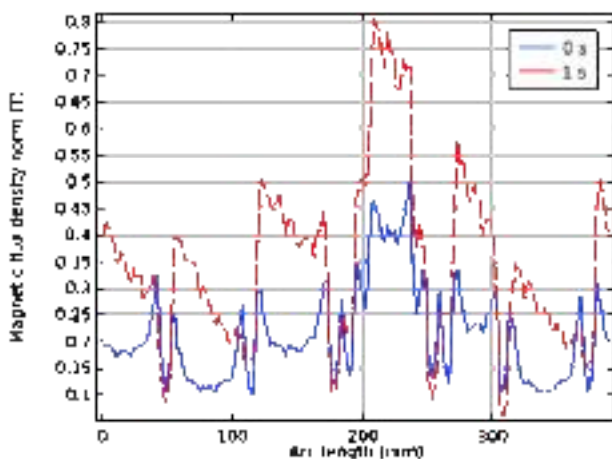


Рис. 6. Графічне представлення розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку двошнекового електромеханічного гідролізера

Для кількісної оцінки в табл. 3 наведені середні та максимальні значення магнітної індукції в повітряному проміжку двошнекового електромеханічного гідролізера

Таблиця 3
Середні та максимальні значення магнітної індукції в повітряному проміжку двошнекового електромеханічного гідролізера

Час, с	Середнє значення, Тл	Максимальне значення, Тл
0	0,216174	0,46575
0,1	0,347887	0,794864
0,2	0,348252	0,796307
0,3	0,348275	0,796473
0,4	0,348284	0,796515
0,5	0,348277	0,796508
0,6	0,348277	0,796515
0,7	0,348278	0,79652
0,8	0,348277	0,79652
0,9	0,348285	0,796534
1	0,348285	0,796536

За результатами моделювання помітно, що дискретне розташування статорів по осевій лінії феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера утворює стабільні зони з циклічним рівнем інтенсивності магнітного поля. По колу повітряного проміжку двошнекового електромеханічного гідролізера 6 вузьких та широких зон, що чергуються одна з одною [14].

Основні результати модулювання були порівняні з даними, що були отримані з експериментального дослідження шнеку електромеханічного гідролізера (рис. 7).



Рис. 7. Експериментальний зразок шнеку електромеханічного гідролізера

Під час досліджень магнітна індукція вимірювалась з допомогою приладів MagneticFeldMeterTM-191 та PCE-MFM 4000 (рис. 8). Середні значення відхилень між результатами математичного та експериментального досліджень становлять 0,13 Тл, що складає 2–3 % в діапазоні вимірювань 0,4–0,8 Тл, тому математичну модель можна вважати коректною і використовувати у подальших дослідженнях.



Рис. 8. Вимірювальні прилади MagneticFeldMeterTM-191 та PCE-MFM 4000

MATLAB / Simulink модель непрямого керування з орієнтацією на поле виконано для одного статора двошнекового електромеханічного гідролізера з параметрами, що вказані в табл. 4. З досліджень електромеханічних характеристик двошнекового електромеханічного гідролізера [14] відомо, що номінальна швидкість робочого органу (феромагнітного ротора) становить 200 об/хв. Оскільки відомо, що статор містить 6 полюсів можна розрахувати ковзання:

$$s = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = \frac{(1000 - 200)}{1000} = 0.8$$

де n_1 – синхронна частота обертання, об/хв; n_2 – фактична частота обертання, об/хв.

Таблиця 4

Параметри схеми заміщення одного статора феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера

Параметр	Значення
Потужність	1400 Вт
Номінальна напруга	118 В
Номінальний струм	10,5 А
Коефіцієнт потужності	0,65
Кількість полюсів	6
Номінальна частота	50 Гц
Номінальне ковзання	0,8
Номінальна швидкість	1000 об/хв
Опір обмотки статора	200 об/хв
Реактивний опір розсіювання обмотки статора	0,1323 Ом
Реактивний опір розсіювання обмотки ротора	0,2033 Ом
Реактивний опір намагнічування обмотки статора	0,2372 Ом
Опір обмотки ротора	5,0475 Ом
Момент інерції ротора	0,174 Ом

Схема заміщення двошнекового електромеханічного гідролізера представлена на рис. 9-11.

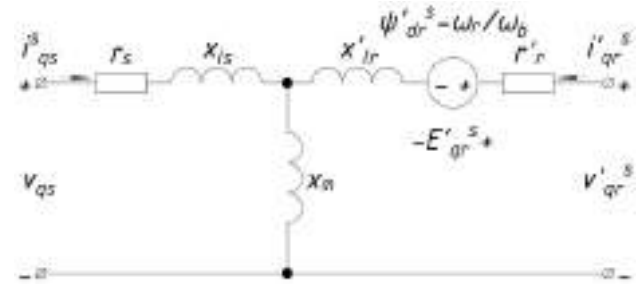


Рис. 9. Схема заміщення статора феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера в системі відліку q-axis

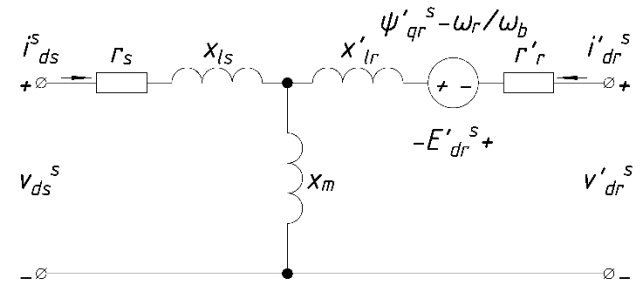


Рис. 10. Схема заміщення статора феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера в системі відліку d-axis

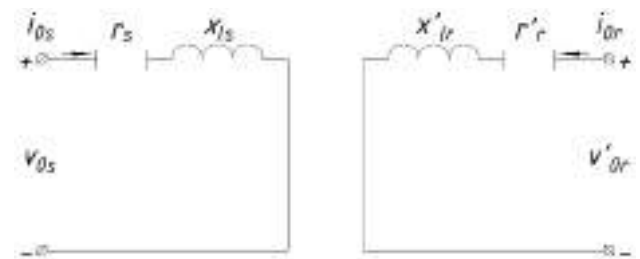


Рис. 11. Схема заміщення статора феромагнітного ротора двошнекового електромеханічного гідролізера в системі відліку zero-sequence

На рис. 12 зображено загальну Simulink модель непрямого керування з орієнтацією на поле. Для зменшення тривалості розрахунку моделі в роботі не враховуються перехідні процеси, що виникають в ШІМ-перетворювачі під час регулювання, враховуються лише основні складові вихідних напруг [18, 19].

На рис. 13 представлено реалізацію блоку непрямого керування з орієнтацією на поле. В середині блоку відбувається розрахунок значень i_{ds}^* , i_{qs}^* , ω_2^* , кут θ – сума кута повороту ротора θ_2 та кута інтегрованого по ковзанню від датчика повороту ротора θ_r . В середині блоку $qde2abc$ (рис. 12) відбувається генерація опорних струмів abc .

Під час моделювання було реалізовано два види керування. Перший – ступінчата зміна обертового моменту за бажаним, фіксованим значенням кутової швидкості обертання (рис. 14-17).

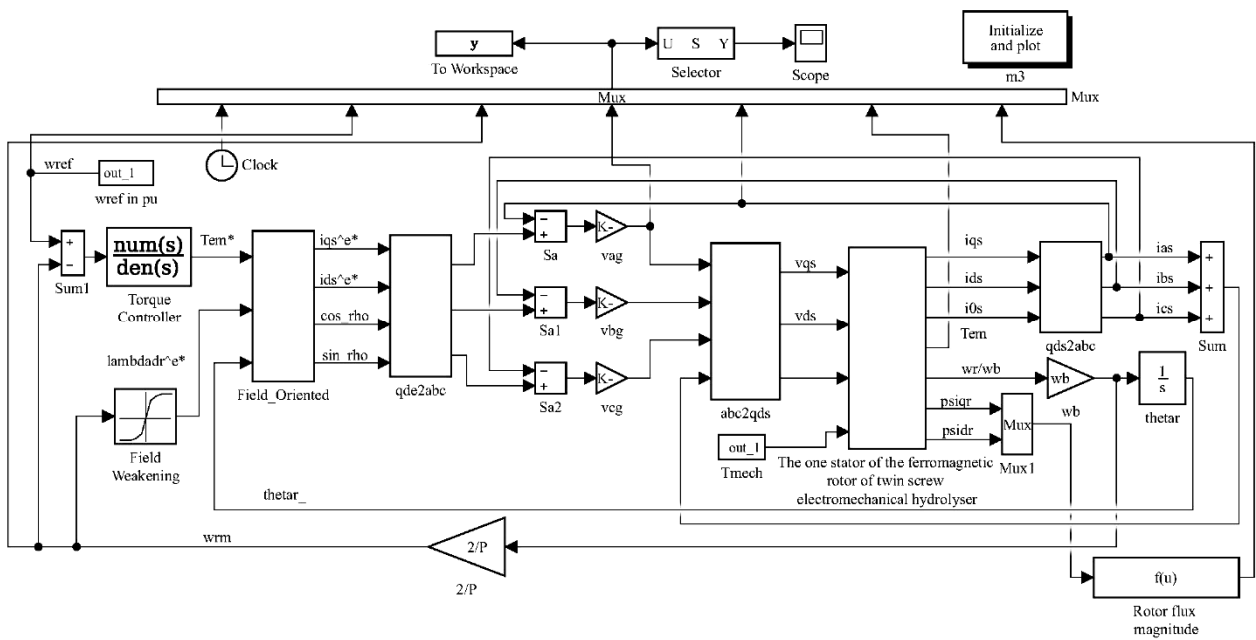


Рис. 12. MATLAB / Simulink модель двошнекового електромеханічного гідролізера при непрямому керуванні з орієнтацією на поле

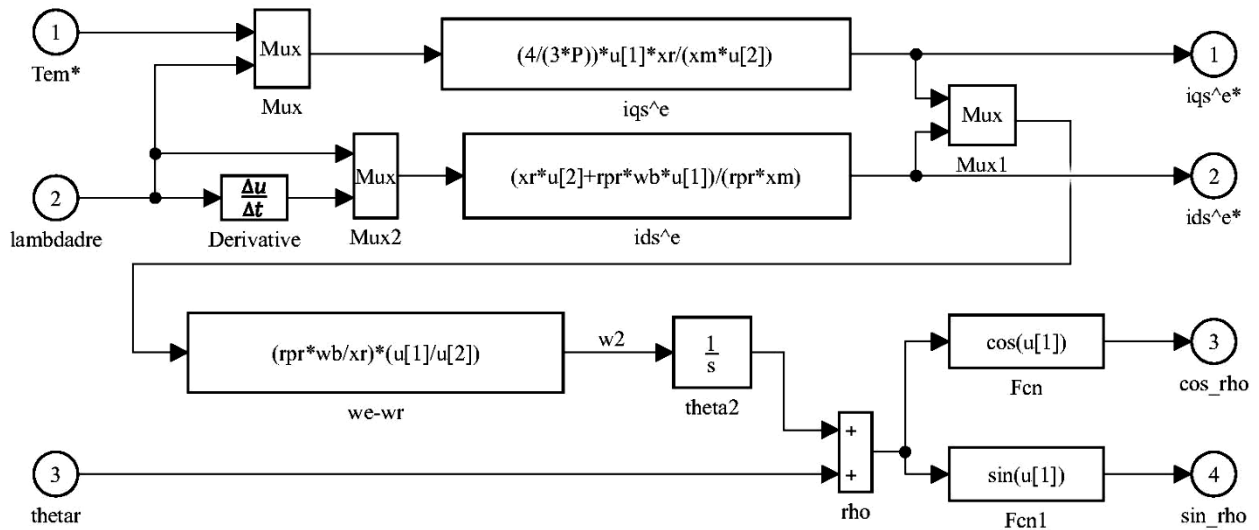


Рис. 13. Реалізація моделі непрямого керування двошнековим електромеханічним гідролізером з орієнтацією на поле

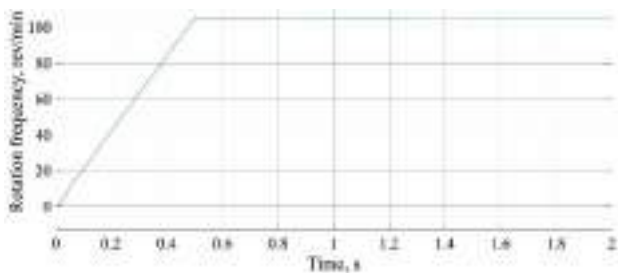


Рис. 14. Кутова швидкість обертання під час запуску та навантаження, рад/с

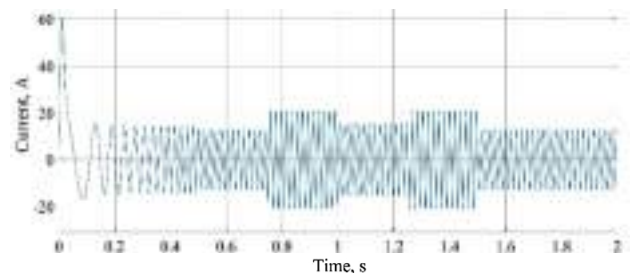


Рис. 16. Струм під час запуску та навантаження, А

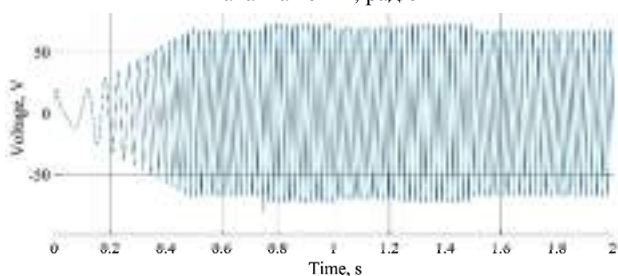


Рис. 15. Напруга під час запуску та навантаження, В

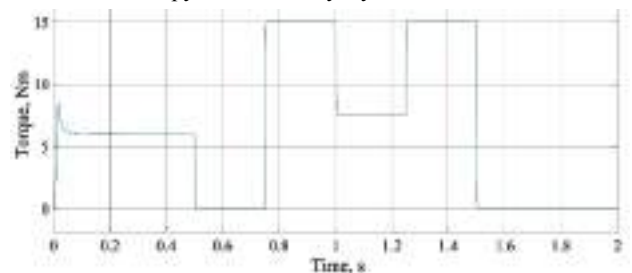


Рис. 17. Обертний момент під час запуску та навантаження, Н·м

Другий – циклічна зміна кутової швидкості обертання (рис. 18-21).

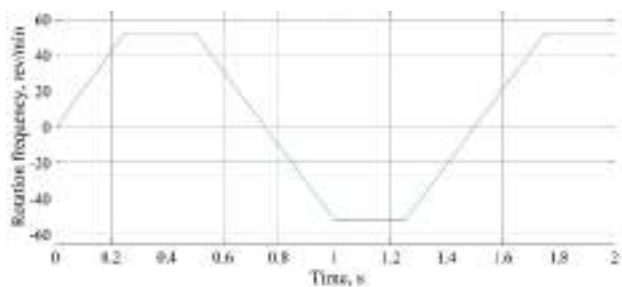


Рис. 18. Зміна кутової швидкості під час неробочого ходу, рад/с

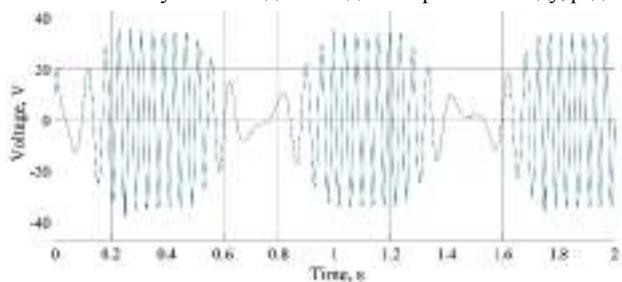


Рис. 19. Напруга під час зміни кутової швидкості при неробочому ході, В

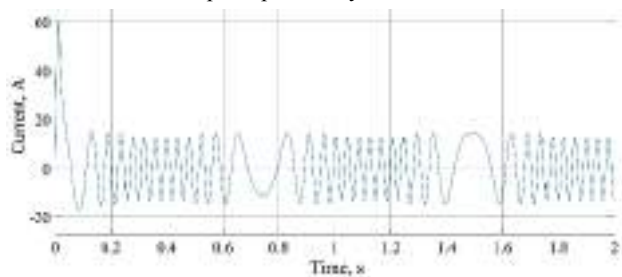


Рис. 20. Струм під час зміни кутової швидкості при неробочому ході, А

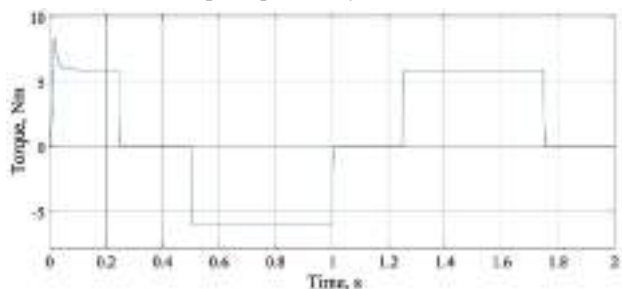


Рис. 21. Обертовий момент під час зміни кутової швидкості при неробочому ході, Н·м

Висновки. Оскільки двошнековий електромеханічний гідролізер відноситься до пристроїв, що об'єднують декілька технологічних процесів, існує необхідність в підтриманні точних параметрів технологічного процесу. Результати моделювання отримані за умов: час моделювання від 0 до 2 с з кроком в 0,5 с; фіксоване значення кутової швидкості при ступінчастій зміні обертового моменту дорівнює номінальному значенню; часовий масив зміни обертового моменту становить [0, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5] с; часовий масив циклічної зміни кутової швидкості становить [0, 0.25, 0.5, 1, 1.25, 1.7] с. З результатів моделювання помітна доцільність застосування методу непрямого керування з орієнтацією на поле в двошнековому електромеханічному гідролізері.

В порівнянні з розглянутими методами керування непряме керування з орієнтацією на поле більш просте в проектуванні та реалізації, дозволяє досягнути бажаних характеристик та відкриває подальші можливості для дослідження двошнекового електро-механічного гідролізера.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

- Zablodskiy N., Kovalchuk S., Chuenko R., Romanenko O., Gritsyuk V. The nanofluids application in a twin-screw electromechanical hydrolyser. *2021 IEEE 21st International Conference on Nanotechnology (NANO)*, 2021, pp. 108-111. doi: <https://doi.org/10.1109/NANO51122.2021.9514326>.
- Zablodskiy M., Kovalchuk S. The main aspects of the technology of processing keratin raw materials under the influence of a magnetic field. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 2020, pp. 278-282. doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250153>.
- Yang S., Ding D., Li X., Xie Z., Zhang X., Chang L. A Novel Online Parameter Estimation Method for Indirect Field Oriented Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, vol. 32, no. 4, pp. 1562-1573. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2699681>.
- Yan N., Cao X., Deng Z. Direct Torque Control for Switched Reluctance Motor to Obtain High Torque–Ampere Ratio. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, vol. 66, no. 7, pp. 5144-5152. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2870355>.
- Kumar R.H., Iqbal A., Lenin N.C. Review of recent advancements of direct torque control in induction motor drives – a decade of progress. *IET Power Electronics*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 1-15. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0252>.
- Wang F., Zhang Z., Mei X., Rodríguez J., Kennel R. Advanced Control Strategies of Induction Machine: Field Oriented Control, Direct Torque Control and Model Predictive Control. *Energies*, 2018, vol. 11, no. 1. doi: <https://doi.org/10.3390/en11010120>.
- Amezquita-Brooks L., Liceaga-Castro J., Liceaga-Castro E. Speed and Position Controllers Using Indirect Field-Oriented Control: A Classical Control Approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 61, no. 4, pp. 1928-1943. doi: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2262750>.
- De Oliveira V M.R., Camargo R.S., Encarnação L.F. Field Oriented Predictive Current Control on NPC Driving an Induction Motor. *2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2020, pp. 169-174. doi: <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067236>.
- Benbouhenni H. Seven-Level Direct Torque Control of Induction Motor Based on Artificial Neural Networks with Regulation Speed Using Fuzzy PI Controller. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 85-94. doi: <http://dx.doi.org/10.22068/IJEEE.14.1.85>.
- Nikzad M.R., Asaei B., Ahmadi S.O. Discrete Duty-Cycle-Control Method for Direct Torque Control of Induction Motor Drives With Model Predictive Solution. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 2317-2329. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2690304>.
- Mousavi M.S., Davari S.A., Nekoukar V., Garcia C., Rodriguez J. A Robust Torque and Flux Prediction Model by a Modified Disturbance Rejection Method for Finite-Set Model-Predictive Control of Induction Motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, vol. 36, no. 8, pp. 9322-9333. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3054242>.
- Ekaputri C., Syaichu-Rohman A. Model predictive control (MPC) design and implementation using algorithm-3 on board SPARTAN 6 FPGA SP605 evaluation kit. *2013 3rd International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA)*, 2013, pp. 115-120. doi: <https://doi.org/10.1109/ICA.2013.6734056>.

13. Wang L. *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*. Springer, London, 2009. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-331-0>.
14. Zablodsky N., Chuenko R., Gritsyuk V., Kovalchuk S., Romanenko O. The Numerical Analysis of Electromechanical Characteristics of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyzer. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, 2021, pp. 130-135. doi: <https://doi.org/10.1109/ACIT52158.2021.9548392>.
15. Zablodskiy M., Pliuhin V., Chuenko R. Simulation of induction machines with common solid rotor. *Technical Electrodynamics*, 2018, no. 6, pp. 42-45. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.042>.
16. Hiware R.S., Chaudhari J.G. Indirect Field Oriented Control for Induction Motor. *2011 Fourth International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, 2011, pp. 191-194. doi: <https://doi.org/10.1109/ICETET.2011.56>.
17. Abu-Rub H., Iqbal A., Guziński J. *High Performance Control of AC Drives with MATLAB/Simulink Models*. John Wiley & Sons, 2012. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119969242>.
18. Malyar V.S., Hamola O.Ye., Maday V.S., Vasylychshyn I.I. Mathematical modelling of starting modes of induction motors with squirrel-cage rotor. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 2, pp. 9-15. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.2.02>.
19. Shurub Yu.V. Statistical optimization of frequency regulated induction electric drives with scalar control. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no. 1, pp. 26-30. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2017.1.05>.

Надійшла (Received) 24.11.2021

Прийнята (Accepted) 26.12.2021

Опублікована (Published) 23.02.2022

Заблодський Микола Миколайович¹, д.т.н., проф.,
 Плюгін Владислав Євгенович², д.т.н., проф.,
 Ковальчук Станіслав Ігорович¹, аспірант,
 Тетерев Віталій Олегович², аспірант,
¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України, 03041, Київ, вул. Героїв Оборони, 12, e-mail: zablodskiyinn@gmail.com, kovalchuk@it.nubip.edu.ua
² Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 61002, Харків, вул. Маршала Бажанова, 17, e-mail: vladyslav.pliuhin@kname.edu.ua (Corresponding author), vitaliy.teterev@kname.edu.ua

M.M. Zablodskiy¹, V.E. Pliuhin², S.I. Kovalchuk¹, V.O. Tietieriev²

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 12, Heroyiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine.

²O.M. Beketov National University of Urban Economy on Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Indirect field-oriented control of twin-screw electromechanical hydrolyzer.

Goal. Development of a mathematical model of indirect field-oriented control of a twin-screw electromechanical hydrolyzer.

Methodology. The paper presents a mathematical model of Indirect field-oriented control of twin-screw electromechanical hydrolyzer. The mathematical model was developed in the MATLAB / Simulink software environment. The determination of the main parameters of a twin-screw electromechanical hydrolyzer was carried out by developing a finite element model in the Comsol Multiphysics software environment. **Results.** Based on the results of a mathematical study, graphical dependences of the distribution of magnetic induction in the air gap of a ferromagnetic rotor, a spatial representation of the distribution of magnetic induction on a 3D model of a ferromagnetic rotor of a twin-screw electromechanical hydrolyzer were obtained. The results of finite element modeling were confirmed by a practical study of a mock-up of a ferromagnetic rotor of a twin-screw electromechanical hydrolyzer. By implementing the MATLAB / Simulink model, graphical dependences of the parameters of the ferromagnetic rotor of a twin-screw electromechanical hydrolyzer are obtained under the condition of a stepwise change in the torque and a cyclic change in the angular velocity. **Originality.** The paper presents an implementation of the method of indirect field-oriented control for controlling the ferromagnetic rotor of a twin-screw electromechanical hydrolyzer. The work takes into account the complex design of the ferromagnetic rotor of a twin-screw electromechanical hydrolyzer. **Practical significance.** The practical implementation of the results of mathematical modeling makes it possible to achieve effective control of a complex electromechanical system, allows further research to maintain the necessary parameters of the technological process and to develop more complex intelligent control systems in the future. References 19, tables 4, figures 21.

Key words: Maxwell's equations, field-oriented control, polyfunctional electromechanical converters, hydrolyzer, dissipative energy.