

171 ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 62-94

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321358

© Хребтова О.А.¹, Перекрест А.Л.², Зачепа Ю.В.³, Зачепа Н.В.⁴,
Некрасов А.В.⁵, Маслій М.А.⁶**УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ СИСТЕМИ ПЧ-АД
МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПЛИТ ФІЛЬТР-ПРЕСУ ФКМ-500**

Моменти навантаження електропривода механізму переміщення плит фільтр-пресу ФКМ-500 супроводжуються достатньо великими значеннями механічних зусиль, що складаються зі статичних і змінних складових стохастичного характеру. Аналіз аварійних ситуацій дозволив визначити чинники, які впливають на формування аварійних ситуацій. Для збільшення працездатності роботи системи автоматизованого електропривода під час виконання технологічних операцій проведено аналіз можливостей налаштування параметрів перетворювача частоти ACS580. При використанні можливостей перетворювача частоти виконано удосконалення алгоритму роботи системи електропривода для безаварійного виконання технологічної операції під час нетипових режимі роботи за рахунок введення додатково підпрограми алгоритму з новими налаштуваннями перетворювача частоти для виконання покрокового переміщення плит фільтр-пресу. Перетворювач частоти має групу параметрів, що були визначені як пріоритетні для параметрування пристрою під час забезпечення безаварійного виконання динамічних режимів переміщення плит фільтр-пресу по напрямним зі збільшеним моментом опору. Розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи електропривода на базі перетворювача частоти ACS580 з урахуванням характеру зміни навантаження під час виконання технологічної операції та нетипових режимів роботи технологічного механізму. Алгоритм складається з двох складових. Перша складова забезпечує виконання типового технологічного процесу, параметри перетворювача частоти налаштовуються у відповідності з вимогами до системи електропривода саме для виконання цього режиму. Друга складова, що була розроблена, має підпрограму, яка виконує контрольоване покрокове збільшення моменту двигуна для подолання стропоріння за необхідності та запобігання перекосів сторін плити, що переміщується. Алгоритм, що використовує відповідні налаштування перетворювача частоти в реальному часі, забезпечує виконання технологічної операції з заданими параметрами робочого режиму системи електропривода, і, як наслідок, забезпечує зменшення аварійних режимів.

Ключові слова: перетворювач частоти, технологічний процес, параметри налаштування, фільтр-прес.

¹ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-4369-0262, okkhrebtova@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-7728-9020, pksg13@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, м. Харків, ORCID: 0000-0003-4364-6904, iuriizachepa@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0003-0365-5320, zachepa.nataliia@ukr.net

⁵ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-6507-4102, AndriiNekrasov@gmail.com

⁶ аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0009-0008-6221-0659, misha87767@gmail.com

O.A. Khrebtova, A.L. Perekrest, Iu.V. Zachepa, N.V. Zuchepa, A.V. Nekrasov, M.A. Masliy. Improvement of the control algorithm for the VFD-IM system of the plate movement mechanism in the FKM-500 filter press. Load moments on the electric drive of the plate movement mechanism in the FKM-500 filter press are accompanied by significant mechanical forces, which consist of static and variable components of a stochastic nature. An analysis of emergency situations identified factors influencing the formation of such incidents. To improve the performance of the automated electric drive system during technological operations, an analysis of the tuning possibilities for the ACS580 frequency converter parameters was conducted. Using the capabilities of the frequency converter, the operation algorithm of the electric drive system was improved to ensure the fault-free execution of technological operations during atypical operating modes. This was achieved by introducing an additional subroutine into the algorithm with new frequency converter settings for stepwise movement of the filter press plates. The frequency converter has a set of parameters identified as priority for device parameterization to ensure fault-free execution of dynamic modes during plate movement along the guides under increased resistance torque. An algorithm for the automated electric drive system was developed based on the ACS580 frequency converter, considering the nature of load variations during technological operations and atypical operating modes of the mechanism. The algorithm consists of two components. The first component ensures the execution of the typical technological process, with the frequency converter parameters configured according to the requirements for the electric drive system for this mode. The second component, newly developed, includes a subroutine that performs controlled stepwise torque increases of the motor to overcome sticking, if necessary, and to prevent misalignment of the sides of the moving plate. The algorithm, utilizing appropriate frequency converter settings in real time, ensures the execution of the technological operation with specified working mode parameters of the electric drive system. As a result, the occurrence of emergency modes is reduced.

Key words: frequency converter, technological process, setting parameters, filter press.

Постановка проблеми. У більшості технічної та наукової літератури питання динаміки електроприводу під час виконання динамічних і статичних режимів розглядаються за умови незмінності опору навантаження $M_c(\omega) = \text{const}$ [1-3].

На сьогодні з більшості досліджень встановлено, що навантаження електротехнічного обладнання технологічного механізму формуються за рахунок наступних чинників: вага технологічного середовища, яке переміщується; власна вага окремих деталей, вузлів, механізмів та металоконструкцій рухливої частини технологічного механізму; зусилля, що формується за рахунок попереднього натягу кінематичного ланцюгу; зусилля початкової затяжки з'єднувального ланцюгу елементів кінематики, запресування та розклинювання в рухомих складових кінематичного ланцюгу; робочі динамічні навантаження та сили опору руху під час стаціонарного режиму роботи промислового механізму [4-7].

Одним із прикладів такого технологічного комплексу є електропривод (ЕП) механізму переміщення плит фільтр-пресу ФКМ-500, що забезпечує ефективне відділення твердих часток від рідини під час фільтрації руди і промислових матеріалів, вугілля і, так званих, «хвостів» в процесі роботи гірничо-збагачувального обладнання.

Під час виконання технологічної операції особливістю усталених навантажень є те, що для одних елементів конструкції електротехнічного обладнання вони можуть виступати постійними, а для інших елементів виявляються квазівстановленими. Квазівстановлені навантаження змінюються в часі за періодичним законом (синусоїдальним, прямокутним, трапецеїдальним тощо), кількісні параметри якого (мінімальна і максимальна величина навантаження, періодичність, тривалість окремих стадій тощо) досить стійкі протягом тривалого періоду експлуатації [8, 9].

Чинники, що формують характер квазівстановлених навантажень, це: параметри робочого середовища, якість виконання попередньої технологічної операції, зовнішні збурення, в тому металоконструкції, відпрацювання зворотних зв'язків автоматизованої системи керування тощо. Тому функція зміни в часі величини навантаження має заздалегідь непередбачуваний характер, вона неповторна для різних інтервалів часу і є стохастичним процесом [10, 11].

Встановлено, що в реальних умовах залежність $M_c(\omega)$ складається з двох основних складових: класичного чинника, що формує навантаження ($M_0 + k(\omega/\omega_n)^p$), і чинника, що має складний стохастичний характер ($M_p(\varphi) + M_d f(v_{mp})$):

$$M_c(\omega) = M_0 + k(\omega/\omega_n)^p + M_p(\varphi) + M_d f(v_{mp}), \quad (1)$$

де $M_p(\varphi)$ – залежність моменту від кута повороту валу φ , що, в свою чергу, залежить від часу t , на протязі якого агрегат знаходиться в нерухомому стані, властивостей масла ν , температури навколишнього середовища $^{\circ}C$, характеристик робочого тіла і ін., тобто $M_p(\varphi) = F(t, \nu, ^{\circ}C, \dots)$, M_d – момент двигуна; $f(v_{mp})$ – коефіцієнт тертя, що залежить від багатьох факторів і може мати характер як квазівстановленого процесу, так і стохастичного, тобто $f(v_{mp}) = F(t, \nu, m, \rho, \dots)$.

В роботі [12] зазначено, що наявність змінних стохастичних навантажень обумовлена високим ступенем динамічності робочого процесу під час переміщення плит фільтр-пресу ФКМ-500. До них віднесено ударні навантаження при натиканні рухомого елемента механізму на перешкоду, удари на кінцевий упор; навантаження, що виникають під час пуско-гальмівного, перехідного та випробувального режимів роботи технологічного механізму. Значні динамічні ударні моменти призводять до погіршення стану елементів технологічного ланцюга, зниження показників якості технологічного процесу, опосередковано впливають на погіршення електричних характеристик ЕП і, як наслідок, виникнення аварійних ситуацій.

Проблема покращення виконання технологічного процесу за рахунок налаштування системи автоматизованого керування частотно-регульованого електропривода з використанням спеціальних алгоритмів робота під час контролю як електромеханічних параметрів електротехнічного обладнання, так і параметрів кінематичної ланки, на сьогодні дуже актуальна і розглядається в багатьох роботах різного напрямку [13, 14].

Технологічний комплекс має вбудовану систему автоматики, що забезпечує майже повний контроль та виконує керування технологічною операцією з фіксацією і зберіганням всіх подій і значень елементів контролю і керування.

В системі керованого електропривода перетворювач частоти (ПЧ) відіграє ключову роль, дозволяючи точно регулювати швидкість і момент обертання двигуна, що приводить в рух плити фільтр-пресу. Має простоту і зручність у застосуванні, розширені функціональні можливості налаштування, стійкість к кібератакам. Використання сучасних перетворювачів частоти, таких як ACS580, забезпечує високу ефективність і надійність роботи системи [15, 16].

Метою даної роботи є розробка алгоритму роботи автоматичної системи електропривода механізму переміщення плит фільтр-пресу під час виконання технологічної операції з урахуванням факторів, що впливають на формування моменту опору, за рахунок встановлення певних значень параметрів перетворювача частоти в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічний комплекс фільтр-пресу ФКМ-500 має наступні технічні характеристики: напруга і частота мережі живлення – $3 \sim 50$ Гц, 380 В; номінальний сумарний струм 80 А; двигун приводу затискання/розтискання (SIEMENS) – 22 кВт, 380 В, 50 Гц, 1465 об/хв, $I_n = 41,5$ А.

Динамічні навантаження під час роботи механізму пересування (рух плити по траверсі) виникають як у періоди розгону і гальмування, так і при переміщенні. Характер руху плити формується відповідно до режиму переміщення рухомого елемента по нерівному шляху, що викликано знаходженням робочого середовища на елементах, по яким виконується переміщення плити. Аналіз динамічної завантаженості є досить значним і впливає на формування перекосів сторін фільтру під час його переміщення при виконанні технологічної операції.

В роботі [12] наведено значення експериментальних досліджень завантаженості елементів переміщення фільтр-пресу, значення динамічних навантажень під час виконання типової технологічної операції змінюються в діапазоні $100 \div 280$ Нм, номінальне значення моменту електроприводу – 143,4 Н. За експериментальними даними виконано математичний розрахунок результатів схематизації, встановлено щільність ймовірності (2) та тип ймовірнісного закону розподілу динамічних навантажень (3) під час виконання технологічної операції [12]. Також наведено графіки цих залежностей (рис. 1).

За законом Вейбулла залежності:

$$F(x_a) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_a - 5}{87,64} \right)^{4,5} \right], \quad (2)$$

де x_a – амплітуд навантажень (a – номер кроку),

$$f(x_a) = \frac{4,5x_a^{3,5}}{87,64^{4,5}} \exp \left[- \left(\frac{x_a - 5}{87,64} \right)^{4,5} \right]. \quad (3)$$

За нормальним законом розподілення:

$$f(x_a) = \frac{1}{20,156 \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(x_a - 40)^2}{2 \cdot 20,156^2} \right], \quad (4)$$

$$F(x_a) = \frac{1}{20,156 \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^{x_a} \exp \left[- \frac{(x_a - 40)^2}{2 \cdot 20,156^2} \right] dx_a. \quad (5)$$

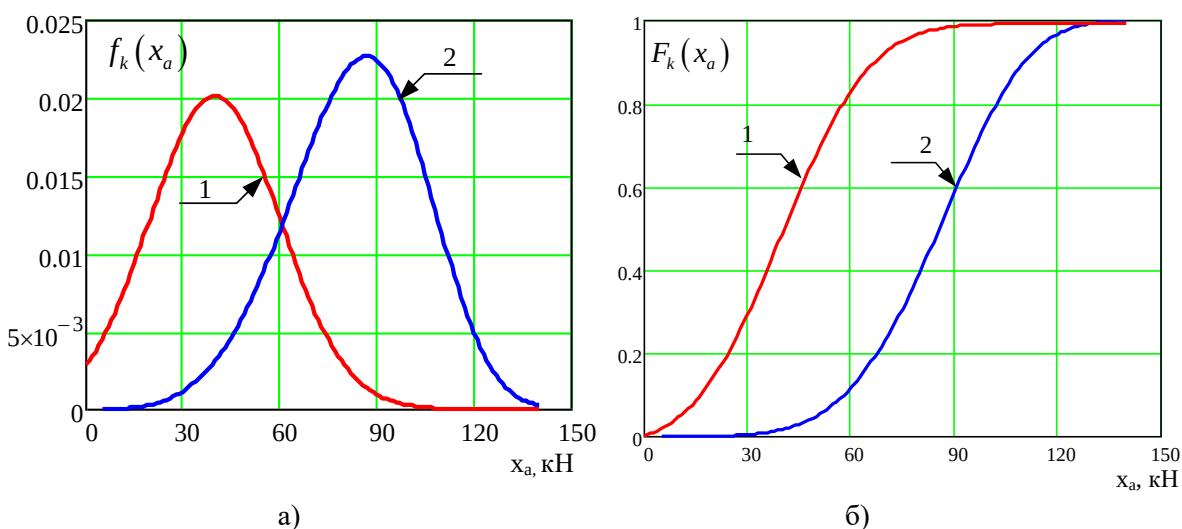


Рис. 1 – Графік щільності ймовірності (а) і функції розподілу (б) амплітуди навантаження (x_a) для схематизованого навантаження: 1 – нормальний закон; 2 – закон Вейбулла

Результати такої обробки використовуються для розробки алгоритму роботи електротехнічного устаткування технологічного обладнання і моделювання реального процесу навантаження під час розробки оптимальних режимів роботи системи електропривода і алгоритмів керування. Також під час розробки алгоритму керування ЕП механізму переміщення необхідно враховувати чинники, які впливають на виникнення аварійних ситуацій.

Виклад основного матеріалу. До табл. 1 зведено дані стосовно аварійних ситуацій та пошкоджень системи електропривода затискання/розтискання, що виникали під час виконання технологічної операції фільтр-преса ФКМ-500 за останній рік, інформація надано в процентному співвідношенні для наочного представлення.

Таблиця 1

Аварійні повідомлень, що надає система автоматики, та їх чинники

Опис пошкоджень	Умови виникнення	Кількість, %
Попередження – перевищено час силового дотискання	Перевищення моменту опору під час дотискання	17
Фільтр-прес не затиснутий	Стороннє середовище в затисканні	14
Двигун затискання/розтискання не відреагував на команду включення	Відсутній сигнал з датчика положення траверси	5
Двигун затискання/розтискання не відреагував на команду відключення		6
Аварія частотного перетворювача станції оливнонасосної затискання/розтискання	Перевищення струму двигуна станції оливнонасосної затискання/розтискання	7

Продовження таблиці 1

Опис пошкоджень	Умови виникнення	Кількість, %
Перевищено час розфіксування траверси штоками	Перевищення моменту опору	18
Схід із датчика Траверса в положенні для фіксації правим штоком	Перекося траверси	8
Сход із датчика Траверса в положенні для фіксації лівим штоком		8
Перевищено час змикання плит	Перевищення моменту опору	16

За результатами аналізу виконання технологічних операцій та ситуацій, що виникають, встановлено вимоги до керованої системи електропривода під час виконання технологічної операції для забезпечення безаварійної і ефективної роботи, а саме: при необхідності форсування пуску, тобто підвищення пускового моменту двигуна у разі необхідності формування підвищеного моменту рухання M_p ; штучного збільшення часу пуску з метою створення умов, що виключають термічні і механічні перенапруження, які виникають при форсованому пуску як в технологічному механізмі, так і в двигуні; створення фіксованих переміщень ротора з метою цілеспрямованого зменшення шкідливих складових статичного моменту; забезпечувати максимально допустимий момент двигуна для подолання сил опору елементів технологічного механізму; при необхідності формувати циклічність включення електропривода для виконання керованого покрокового переміщення робочого органу; за необхідності визначати час роботи зі значним перевантаженням по струму для створення достатнього пускового моменту.

Вірно задані вимоги щодо технологічних параметрів та показників якості роботи системи автоматизованого електропривода під час виконання технологічного процесу дозволяють забезпечити не тільки безаварійні режими роботи, а і значно підвищити продуктивність виконання робочого процесу [17-21].

Для розробки алгоритму роботи, який забезпечить безаварійний режим системи електропривода затискання/розтискання необхідно адаптувати і доповнити завдання алгоритму для перетворювача частоти, який формує силові параметри керування для асинхронної машини, що входить до системи електропривода.

В системах з підвищеними вимогами до динамічних або статичних характеристик регулювання вихідних змінних електроприводу, а також у випадках, коли регульованою змінною є момент, широке розповсюдження знайшли векторні системи керування асинхронними двигунами.

Для визначення параметрів частотного керування під час виконання технологічної операції зі змінним моментом опору було виконано математичне моделювання.

При дослідженні динамічних режимів на математичній моделі використовувалася стандартна математична модель АД [22, 23] з наступними параметрами: тип асинхронного двигуна – 1LE1502-1EB43-4AA4-Z; потужність – 22 кВт; напруга – 380 В; частота обертання – 1465 об/хв (153,3 1/с); кількість полюсів – 4; номінальний момент – 143,4 Н; номінальний струм двигуна (IE) – 42 А; співвідношення пусковий/номінальний струм – 6,9; співвідношення максимальний/номінальний момент – 3,2; співвідношення пусковий/номінальний момент – 2,5; ККД – 89,9%; момент інерції – 0,03; коефіцієнт потужності – 0,84. Рівняння електромагнітних процесів записано відносно потокозчеплення ротора та струму статора в синхронній ортогональній системі координат (d, q), орієнтованих за вектором потокозчеплення ротора. Для побудови графіків перехідних процесів використовуємо векторну та скалярну математичну модель системи електропривода.

Під час моделювання момент опору складався з двох складових, перша – це динамічні навантаження, що формуються за рахунок динамічних властивостей кінематичних пар самого технологічного механізму у вигляді пульсацій [12] і момент опору, що формується за рахунок залишкового середовища на напрямних траверси та зміни властивостей кінематичного ланцюга технологічного механізму. Математична залежність першої складової під час типового технологічного процесу враховує функції розподілу амплітуди навантаження за нормальним законом (3), а під час стопоріння – за законом Вейбулла (4).

Таким чином, момент опору в деякий час становить $M_c \leq 2,4M_{\text{ном}}$. Результати

математичного моделювання наведено на рис. 2-3.

Як видно з отриманих графіків, під час векторного керування швидкість залишається незмінною, за винятком короточасних швидкісних ривків, момент двигуна має значну швидкодію, що призводить до наявності ударних моментів, які негативно впливають на стан системи електропривода і можуть привести до перекосів плити та аварійних режимів в кінематичних елементах. Під час скалярного керування швидкість змінюється відповідно до моменту навантаження, але значно зменшуються ударні моменти за рахунок збільшення часу перехідного процесу, що для системи електропривода і кінематичного ланцюгу несуттєво, а для виконання даної технологічної операції є більш важливим тому, що попереджує виникнення перекосів та стопоріння.

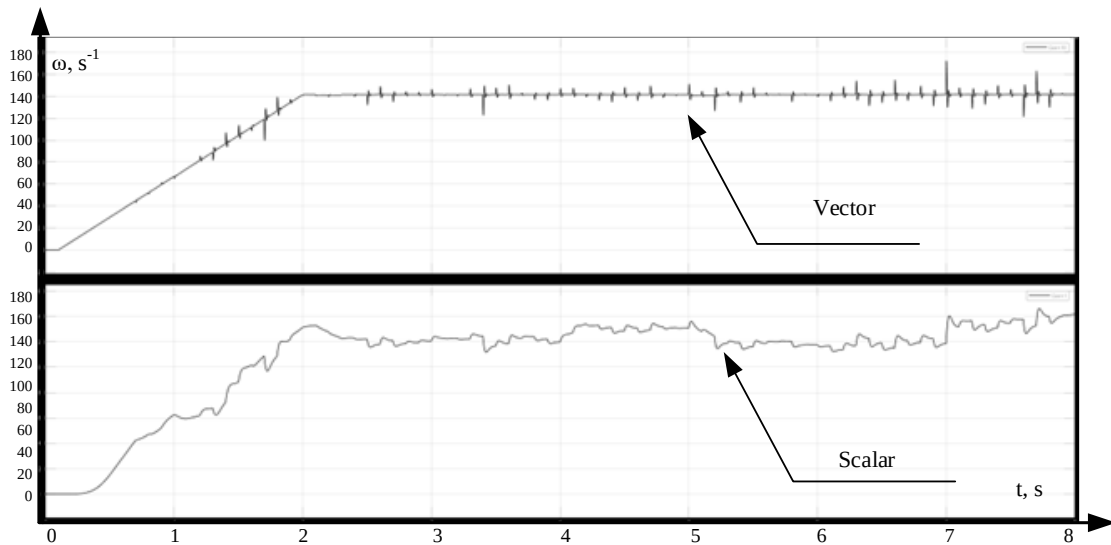


Рис. 2 – Перехідний процес за швидкістю двигуна

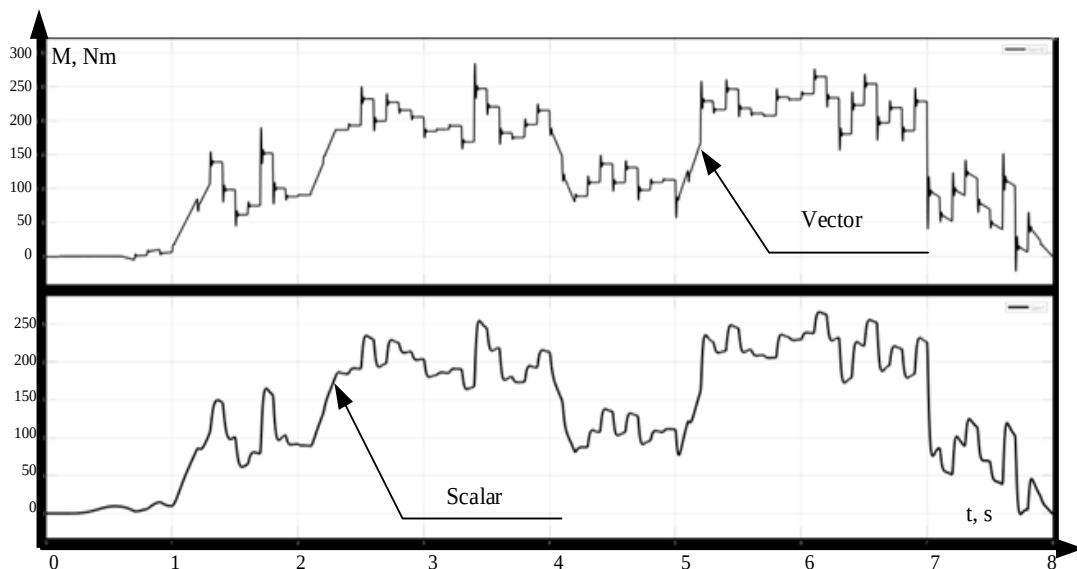


Рис. 3 – Перехідний процес за моментом двигуна під час змінного навантаження

З результатів моделювання системи прямого векторного керування можна зробити висновок, що при векторному керуванні відпрацювання математичної моделі сигналу завдання зменшується часу перехідного процесу на 2%, зменшення похибки регулювання – на 8%. Тобто векторне керування є більш точнішим та швидшим за скалярне, що гарантує ефективне виконання

типових режимів технологічного процесу. Але для здолання підвищеного моменту опору та запобігання стопоріння, що більш важливо, авторами пропонується використовувати методику формування моменту рушання та пуску, що було розглянуто у роботі [2, 13]. В роботах зазначено, що під час рушання та пуску отримання збільшеного пускового моменту на низьких частотах можна сформувавши за рахунок використання наступної залежності:

$$U/f^{1/\beta} = \text{const}, \quad (6)$$

де U – керована напруга живлення; f – керована частота напруги живлення; β – ступень, що визначає співвідношення частоти та напруги живлення під час скалярного частотного керування. Таке співвідношення можна отримати під час налаштування перетворювача частоти за рахунок використання функції «буст» (рис. 4, а). З урахуванням того, що пропонується використовувати кроковий режим переміщення плит фільтр-пресу, основний режим електропривода під час виконання цієї операції буде саме пуск і гальмування. Скалярне керування слід застосовувати під час забезпечення процесу керування моментом пуску та покроковим рухом двигуна з мінімальними ударними моментами та формування збільшеного моменту опору при необхідності під час пуску та переміщення робочого механізму.

Таким чином, за результатами аналізу математичного моделювання встановлено, що під час виконання технологічної операції з типовими режимами роботи слід використовувати векторне керування частотно-регульованого електропривода, а під час нетипових режимів (перекосів, стопоріння), коли необхідно сформувавши покрокове переміщення робочого органу або сформувавши підвищений керований момент ЕП, запропоновано використовувати скалярний режим частотного керування.

Для реалізації алгоритму роботи системи автоматизованого керування ЕП в нетипових режимах використовується вбудоване адаптивне програмування, що дозволяє надбудовувати функції приводу без використання спеціальних інструментів та мов програмування.

У табл. 2 наведено перелік завдань, що виконуються програмами-майстрами та відповідні параметри ПЧ для забезпечення налаштувань саме під час формування частотних режимів роботи ЕП. Майстер запуску визначає необхідну послідовність завдань залежно від обраного режиму роботи.

Один з важливих аспектів розробки алгоритму – це забезпечення його гнучкості та можливості легкої адаптації до змінних умов. Це може включати використання регуляторів зі змінними параметрами, що дозволяють швидко реагувати на зміни в роботі системи. Важливо також передбачити можливість ручного втручання в роботу системи у разі виникнення непередбачених ситуацій. Розробка алгоритму виконання технологічної операції переміщення плит фільтр-пресу включає кілька основних етапів: аналіз технологічного процесу; визначення основних параметрів, які необхідно контролювати під час роботи (швидкість, момент, положення плити); створення математичної моделі; розробка моделі, яка враховує кінематичні і динамічні характеристики системи; програмування алгоритму; реалізація алгоритму на основі зібраних даних і математичної моделі; тестування та налагодження; перевірка алгоритму на практиці, виявлення та виправлення можливих помилок [24].

Початок роботи системи електропривода розпочинається з ідентифікації параметрів двигуна, особливо це потрібно, коли використовується векторний закон частотного керування. Модель двигуна уточнюється щоразу під час пуску приводу після зміни параметрів двигуна. Після прогону автоматично встановлюється значення 0. Двигун має бути від'єднаний від механічного навантаження. Після визначення параметрів встановлюються робочі параметри системи керування.

Перетворювач частоти є складовою системи автоматики фільтр-преса ФКМ-500, тому джерело управління зовнішнє – панель керування (1001 (0 – 14)). Встановлюємо значення 8. Команди «Пуск»/«Стоп» та «Напрямок» подаються з панелі керування. Для керування напрямком обертання, в нашому випадку для забезпечення реверсу, необхідний параметр 1003 = 3 (ВПЕРЕД, НАЗАД).

Таблиця 2

Перелік завдань, що виконуються під час роботи ПЧ

Найменування	Опис	Параметри, що встановлюються
Вибір мови	Вибирає мову	9901
Встановлення параметрів двигуна	Встановлення даних двигуна Виконує ідентифікацію двигуна (Якщо граничні значення швидкості виходять за допустимий діапазон: встановлення граничних значень)	9904...9909 9910
Прикладний макрос	Вибір прикладного макросу	9902
Дод. модулі	Активізація додаткових модулів	9802
Кер. швидкістю ЗОВНІШ1	Вибір джерела завдання швидкості Встановлення граничних значень завдання Встановлення граничних значень (частоти) Встановлення часу прискорення/уповільнення	1103 1104, 1105 2001, 2002,(2007) 2202, 2203
Кер. Швидкістю ЗОВНІШ2	Вибір джерела завдання швидкості Встановлення граничних значень завдання	1106 (13011303,3001) 1107, 1108
Керування моментом	Вибір джерела завдання крутного моменту Установка граничних значень завдання Установка часу наростання та спаду моменту	1106 (13011303,3001) 1107, 1108 2401, 2402
ПД-регулятор	Вибір джерела завдання регульованої величини Установка граничних значень завдання Встановлення граничних значень швидкості (завдання) Встановлення джерела та граничних значень регульованої величини	1106 (1301...1303, 3001) 1107, 1108 2001, 2002, (2007, 2008) 4016, 4018, 4019
Керування. Пуском/Стопом	Вибір джерела сигналів пуску та зупинки від двох зовнішніх пристроїв керування (ЗОВНІШ1 та ЗОВНІШ2) Вибір ЗОВНІШ1 або ЗОВНІШ2 Визначення режиму управління напрямком обертання Завдання режимів пуску та зупинки	1001, 1002 1102 1003 2101...2103
Таймерні функції	Вибір таймерних функцій Вибір керування пуском/зупинкою з використанням таймера для зовнішніх джерел керування ЗОВНІШ1 і ЗОВНІШ2 Вибір джерела керування ЗОВНІШ1 / ЗОВНІШ2 за часом Активізація режиму 1 Р _{вих} Вибір керування набором параметрів 1/2 ПД-регулятора за часом	Група 36: Таймерні функції 1001, 1002 1102 1401 4027
Захист	Установка граничних значень крутного моменту і струму	2003, 2017
Вихідні сигнали	Вибір сигналів, для індикації яких використовується релейний вихід Р _{вих} Вибір сигналів, для індикації яких використовується аналоговий вихід Встановлення мінімального та максимального рівня, а також масштабу та інверсії	Група 14 Релейні виходи Група 15 Аналогові виходи

Старт налаштувань починається з процесу самоналаштування приводу, який виконується заданим значенням параметру 9910. З урахування того, що алгоритм формує векторний та скалярні режими роботи електропривода, виконуємо вимірювання, що необхідні для визначення характеристик двигуна і створення його математичної моделі, що використовується потім для внутрішніх обчислень. Встановлено, що під час переходу з векторного режиму керування до скалярного значення параметру необхідно встановлювати значення 1 для стабілізації швидкості і значення 2 для стабілізації моменту. Значення 2 параметру 9910 встановлюється під час переходу на виконання запропонованої підпрограми керованого руху.

З урахування стохастичної складової моменту опору, що є наслідком залишку робочого середовища в напрямних траверси, де переміщається плита фільтр-пресу, обираємо векторний закон керування з забезпеченням моменту технологічного ланцюгу ($9904=2$), максимальний момент ($2017=300\%$). Відповідно, максимальне значення струму асинхронного двигуна складає $2,0 I_{2hd}$ ($9906=200\%$), авторами запропоновано обирати саме ці значення, а не ті, що встановлені за замовченням, як типові.

Двигун починає виконувати технологічну операцію. Під час виконання операції необхідно виконувати контроль переміщення плити фільтру по траверсі, а саме перевіряти встановлене значення довжини (S_m) переміщення плити. Якщо під час виконання технологічної операції переміщення припиняється, то алгоритм зупиняє роботу технологічного механізму і переходить на підпрограму алгоритму щодо виконання керованого переміщення зі здоланням стопоріння і заклинювання.

Для виконання запропонованої підпрограми необхідно виконати переналаштування перетворювача частоти на відповідні параметри.

Для виконання підпрограми керованого переміщення необхідно забезпечити постійний керований момент, для цього обираємо закон керування скалярний ($9904=3$) з квадратичним законом частотного керування ($2605=2$), який дозволяє отримати достатній момент двигуна $(1 \div 2,5)M_{ном}$ під час зниженої частоти напруги живлення і встановленні максимального «бусту» (рис. 4, а). Момент двигуна встановлюємо двома значеннями: перше – стандартне ($2017=300\%$) і другу позначку встановлюємо до максимально можливого ($2018=600\%$).

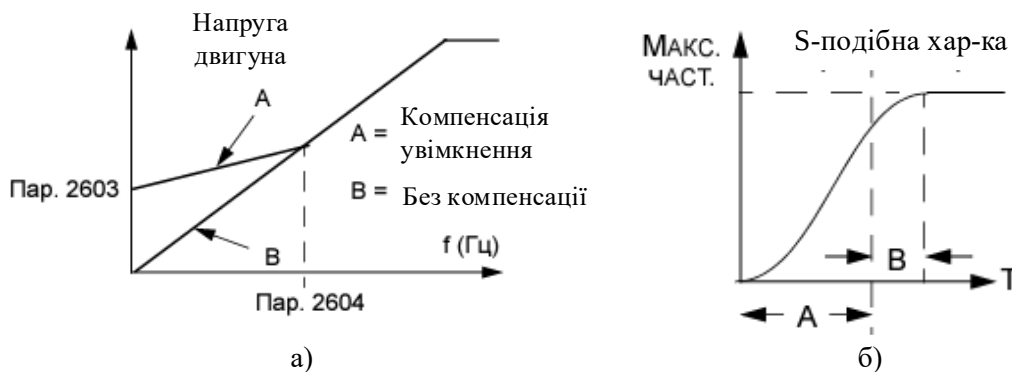


Рис. 4 – Візуалізація параметрів ПЧ: а – графік формування «Буст»; б – форма кривої прискорення/уповільнення: А = 2202 час прискорення; В = 2204 крива прискорення

З урахуванням того, що двигун буде виконувати пуск для підпрограми керованого переміщення під навантаженням, так як була виконана зупинка в процесі виконання технологічної операції, то необхідно сформувати достатній пусковий момент засобами частотно-регульованого електропривода, для цього встановлюємо початкове значення напруги живлення максимально можливим ($2603=100\text{ В}$) і максимально можливе значення струму ($2110=300\%$).

Під час виконання керованого переміщення плити пресу необхідно сформувати підвищений момент двигуна. Для цього використовується налаштування параметру 2101 і встановлюється значення 4 (тільки для режиму скалярного керування). Частина алгоритму, що виконує керовані покрокові переміщення плити потребує в деяких випадках підвищення моменту. Такий

режим формується при запуску двигуна та завершується при частоті 20 Гц або в момент, коли вихідна частота зрівняється із заданою, що відповідає можливостям керуючого пристрою. Двигун попередньо намагнічується постійним струмом протягом часу, який задається під час налаштування параметра 2103.

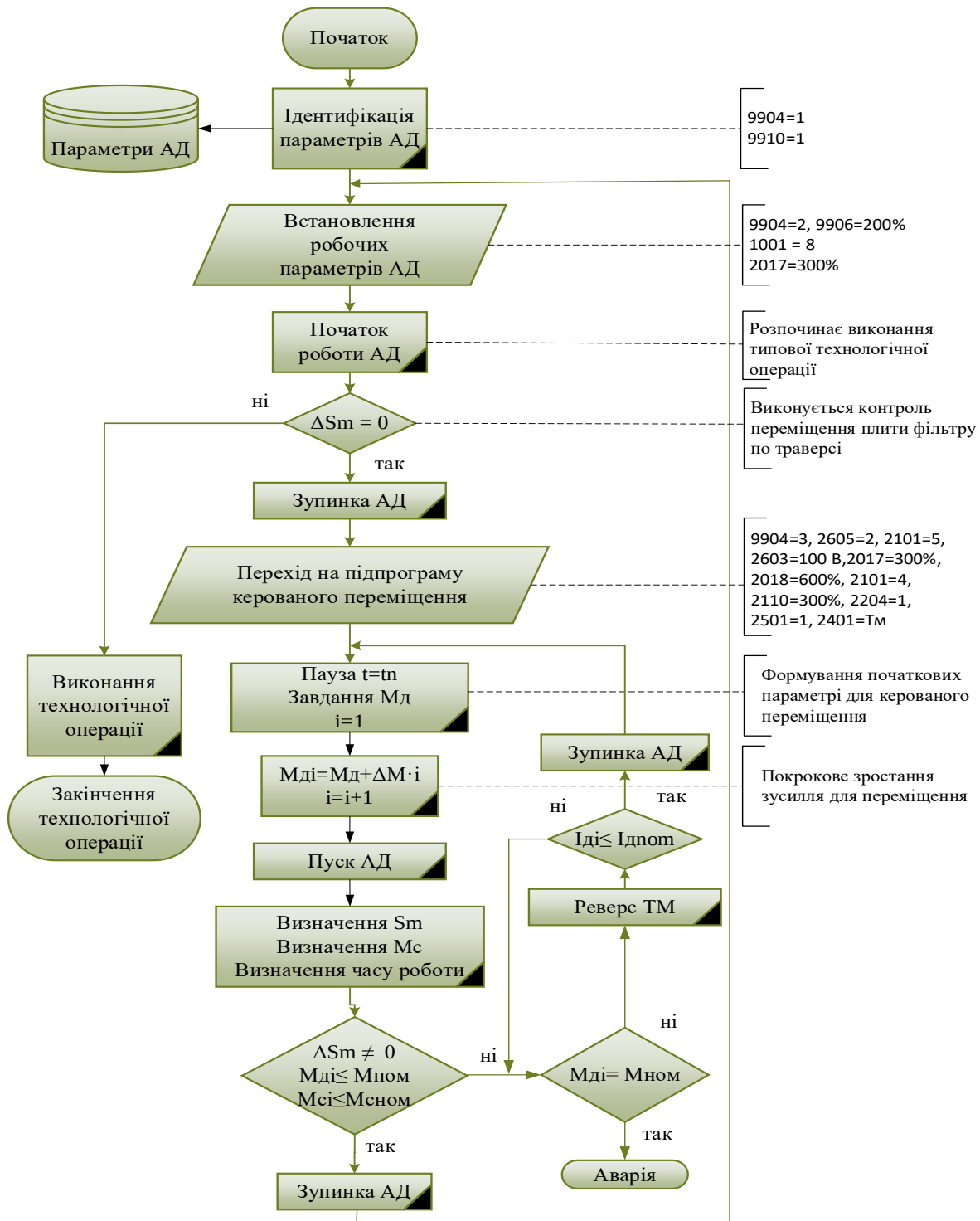


Рис. 5 – Алгоритм виконання технологічного процесу переміщення плити по траверсам фільтр-пресу

Для попередження динамічних ударів, під час перехідних режимів, вид прискорення обираємо як криву типу S-подібну ($2204=1$) (рис. 4, б). Час перехідного процесу для виконання контрольованого переміщення встановлюємо в співвідношенні до постійної електромеханічної системи електропривода ($120 \text{ с} \leq 2401 \leq T_m$) та налаштування параметру 2204 зі значенням 1.

Складна електромеханічна система має таке явище, як резонансні частоти. Резонансну частоту визначає момент інерції роботи двигуна і момент інерції навантаження, що приведено до валу двигуна. Під час виконання реального технологічного процесу явище резонансу викликає явне погіршення технічних характеристик елементів електротехнічного механізму.

З наведеного графіку щільності ймовірності динамічних навантажень (рис. 1) видно, на яких саме навантаженнях ця залежність має найбільше значення.

Тому під час виконання керованого переміщення з формуванням достатнього зусилля, запропоновано вилучити частоти, в яких навантаження елементів має значні параметри і співпадають з власними частотами коливань системи електропривода механізму переміщення ($2501=1$). Параметр 2501 задає увімкнення/вимкнення функції критичних швидкостей, що унеможливує роботу у певних діапазонах швидкостей. Значення 0 = відключення, 1 = включення. Цей параметр застосовується для заборони роботи на швидкостях, на яких виникає вібрація кінематичного ланцюга системи електропривода.

Після переналаштування перетворювача частоти алгоритм починає виконувати кероване переміщення. Процес переміщення виконується за циклом. Формується початковий момент ($M_{ді}$, $i = 1 \dots n$), якщо за встановлений час переміщення робочого органу не виконується ($\Delta S_m = 0$), момент двигуна не перевищує максимально можливий ($M_{ді} \leq M_{ном}$), то виконується наступний цикл, де момент двигуна збільшується на зазначений відсоток з урахуванням максимально допустимого значення (ΔM) і виконується повторна спроба виконання переміщення, з контрольним вимірюванням переміщення, часу роботи циклу і непрямым визначенням моменту опору технологічного механізму.

Якщо під час виконання підпрограми момент двигуна досягає номінального значення ($M_{ді} = M_{ном}$), а переміщення не виконується, то з'являється повідомлення про аварійну ситуацію. Алгоритм роботи та параметри налаштування ПЧ наведено на рис. 5.

Подальший напрям досліджень буде спрямований на розробку математичної моделі для відпрацювання розробленого алгоритму керування з урахуванням всіх чинників, що було розглянуто в наведеному матеріалі.

Висновки

За результатами аналізу попередніх досліджень визначено складові, що формують реальний момент опору технологічного механізму під час виконання як статичних, так і динамічних режимів роботи електроприводу.

Для визначення параметрів частотного керування під час виконання технологічної операції зі змінним моментом опору було виконано математичне моделювання на стандартній математичній моделі асинхронного двигуна для векторного і скалярного керування.

Математичні залежності щільності ймовірності та тип ймовірнісного закону розподілу динамічних навантажень використовуються для визначення власних частот коливань системи електропривода механізму переміщення для вилучення їх з параметрів роботи ПЧ.

Встановлено, що під час виконання технологічної операції з типовими режимами роботи слід використовувати векторне керування частотно-регульованого електропривода, а під час нетипових режимів (перекосів, стопоріння), коли необхідно сформулювати покрокове переміщення робочого органу або сформулювати підвищений керований момент ЕП, запропоновано використовувати скалярний режим частотного керування.

Виконано аналіз можливостей налаштування перетворювача частоти ACS580, як елемента керування системи автоматики фільтр-преса ФКМ-500. Розглянуто функціональні можливості ПЧ, на базі яких розроблено алгоритм виконання технологічної операції переміщення з забезпеченням керованого формування зусилля для здолання стопоріння і заклинювання. Встановлена послідовність виконання кроків алгоритму, де виконується налаштування параметрів в реальному часі.

Розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи електропривода на базі

перетворювача частоти ACS580 з урахуванням характеру зміни навантаження під час виконання технологічної операції та нетипових режимів роботи системи електропривода технологічного механізму затискання/розтискання плити фільтр-пресу.

Алгоритм складається з двох складових. Перша – виконання типового технологічного процесу з налаштуванням параметрів перетворювача частоти для цього. Друга підпрограма – це контрольоване покрокове збільшення моменту двигуна для здолання стропоріння та запобігання перекосів сторін плити, що переміщується, і, як наслідок, запобігання аварійних режимів.

Перелік використаних джерел:

1. Гладир А. І., Гомілко В. І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами запуску. *Електроінформ.* 2005. №1. С. 17-19.
2. Хребтова О. А., Сергієнко С. А. Електропривід механізму підймання затвора зливної греблі з керованим процесом рухання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* 2017. № 2. С. 56-62.
3. Хребтова О. А., Сергієнко С. А. Дослідження властивостей системи електропривода механізму підйому затвора зливної греблі. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи.* 2012. № 4/2012 (20). С. 63-69.
4. Evaluation of the technical condition of marine internal combustion engines according to parameters of the work process at modes other than nominal them / М. Е. Rybalchenko et al. *Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance: Proceedings of 13th Int. Sci. and Pract. Conf., Kherson, 07-09 September 2022.* Kherson : Kherson State Maritime Academy. 2022. Pp. 20-24.
5. Research of an Automated Control System for the Technological Process of a Rolling Mill with the Application of the Electroplastic Effect / Khrebtova O., Zachepa I., Zachepa N., Khrebtov O. 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 2-6 Oct. 2023. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org.10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312941>.
6. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів / Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Кременчук : ЧП Щербатых А.В., 2019. 122 с.
7. Теоретична механіка. Статика і кінематика: навч. посіб. / Іскрицький В. М., Подлесьний С. В., Водолазська О. Г., Єрфорт Ю. О. Краматорськ : ДДМА, 2007. 204 с.
8. Види навантажень, що діють на деталі машин. URL: <http://um.co.ua/1/1-1/1-13211.html> (дата звернення: 17.07.2024).
9. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посіб. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І.Пулужа, 2011. 322 с.
10. Starting System of Induction Motor with Dynamic Torque Control Powered by an Autonomous Sources of Energy Supply / Zachepa I., Zachepa N., Antonov M., Pyrozhok A. 2022 *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenichuk, 20-22 Oct. 2022. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org.10.1109/MEES58014.2022.10005708>.
11. Dynamics and strength of mechanisms, machines, and structures under the conditions of complex loading. Part 2: collective monograph. Series «Dynamics and Strength of Mechanisms, Machines, and Structures» / V. R. Pasika et al. Lviv: СПОЛІОМ, 2023. 168 p.
12. Khrebtova O., Zachepa I., Zachepa N. Dynamics Loads of the Automated Electric Drive for Moving FKM-500 Filter-Press Plates. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*, Kremenichuk, 27-30 Sept. 2023. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org.10.1109/MEES61502.2023.10402505>.
13. Formation of Starting Torque of Double-Fed Induction Motor / O. Khrebtova et al. *Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP) 2020: Proceedings of the 25th IEEE International Conference*, Kremenichuk, 21-25 Sept. 2020. Pp. 544-547. DOI: <https://doi.org.10.1109/PAEP49887.2020.9240786>.
14. The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply / D. Shokarov et al. 2017 *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenichuk, 15-17 Nov. 2017. Pp. 52-55. DOI: <https://doi.org.10.1109/MEES.2017.8248950>.
15. Гелетій В. М., Корендій В. М., Пасіка В. Р. Визначення кінематичних і навантажувальних

- параметрів транспортних систем вертикального складування. *Підйомно-транспортна техніка*. 2023. № 1(68). С. 17-27. DOI: <https://doi.org/10.15276/pidtt.1.68.2023.02>.
16. Гудрамович В. Про основні наукові досягнення академіка В. І. Моссаковського в напрямку механіки деформівних твердих тіл і тонкостінних конструкцій. *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій*: тези доповідей Другої міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка НАН України В. І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження), м. Дніпро, 10-12 жовтня 2019. С. 23-24
 17. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика : посібник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 494 с.
 18. Аналіз безпеки сервіс-орієнтованого програмування / Замрій І. В., Придибайло О. Б., Захаржевський А. Г., Полонський К. В. *Зв'язок*. 2021. № 5. С. 29-33. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.052933>.
 19. Kenjić D., Antić M., Anđelić T. Theoretical Aspects of Automatically Generated Service-Oriented Communication Between ADAS and IVI Domains. *2022 IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, Novi Sad, Serbia, 25-26 May 2022. Pp. 87-92. DOI: <https://doi.org/10.1109/ZINC55034.2022.9840567>.
 20. Автоматизація технологічного процесу переробки молока на базі програмованого логічного контролера VIPA / О. Хребтова та ін. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук : КрНУ, 2023. Вип. 1 (60). С. 50-60. DOI: <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.1.60.5>.
 21. Eckhardt H. D. Kinematic design of machines and mechanisms. New York : McGrawHill, 1998. 621 p.
 22. Лозінський А. О., Карплюк Л. Ф., Карплюк Б. Л. Дослідження частотно-регульованого електропривода зі змінним моментом інерції та навантаженням. *Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика*. 2006. № 66. С. 46-47.
 23. Замрій І. В., Сосновий В. О. Безпека мережі з використанням рекурентної нейромережі. *Зв'язок*. 2022. № 5. С. 21-24. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2022.0502124>.
 24. Перетворювачі частоти: їх види, переваги і недоліки, способи управління і застосування. ТОВ «Перша редукторна компанія». URL: <https://prk.com.ua/ua/a473092-preobrazovateli-chastoty-vidy.html> (дата звернення: 18.07.2024).

References:

1. A. I. Gladyr, and V. I. Gomilko, «Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektropriwodiv zminnoho strumu z vazhkymy umovamy zapusku» [«The system of formation of starting characteristics of alternating current electric drives with difficult starting conditions»], *Elektroinform – Electronic information*, no. 1, pp. 17-19, 2005. (Ukr.)
2. O.A. Khrebtova, and S.A. Sergienko, «Elektroprovod mekhanizmu pidiimannia zatvora zlyvnoi hrebli z kеровanym protsesom rushannia» [«Electric wire of the mechanism for lifting the gate of the spillway dam with a controlled movement process»], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, no. 2, pp. 56-62, 2017. (Ukr.)
3. O.A. Khrebtova, and S.A. Sergienko, «Doslidzhennia vlastivostei systemy elektropriroda mekhanizmu pidiomu zatvoru zlivnoi hrebli» [«Study of the properties of the electric drive system of the lifting mechanism of the outlet gate»], *Elektromekhanichni y enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, no. 4/2012 (20), pp. 63-69, 2012. (Ukr.)
4. M.E. Rybalchenko, E.V. Bilousov, V.P. Savchuk, A.P. Marchenko, and G.Ya. Tuluchenko, «Evaluation of the technical condition of marine internal combustion engines according to parameters of the work process at modes other than nominal them», in Proc. 13th Int. Sci. and Pract. Conf. «Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance», Kherson, 2022, pp. 20-24.
5. O. Khrebtova, I. Zachepa, N. Zachepa, and O. Khrebtov, «Research of an Automated Control System for the Technological Process of a Rolling Mill with the Application of the Electroplastic Effect», in Proc. IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-6. doi: [10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312941](https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312941).
6. O. P. Cherny, Yu. V. Zachepa, V. K. Tytyuk, and O.A. Chorna, *Monitorynh i diahnostyka elektromekhanichnykh ob'ektiv* [Monitoring and diagnostics of electromechanical objects].

- Kremenchug, Ukraine: ChP Shcherbatykh A.V. Publ., 2019. (Ukr.)
7. V.M. Iskriitsky, S.V. Podlesny, O.G. Vodolazska, and Y.O. Yerfort, *Teoretychna mekhanika. Statyka i kinematyka: navch. posib.* [Theoretical mechanics. Statics and kinematics: Study guide]. Kramatorsk, Ukraine: DDMA Publ., 2007. (Ukr.)
 8. Types of loads acting on machine parts. [Online]. Available: <http://um.co.ua/1/1-1/1-13211.html>. Accessed on: 17 July 2024. (Ukr.)
 9. O.V. Zakalov, and I.O. Zakalov, *Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: navch. posib.* [Fundamentals of friction and wear in machines: Training manual]. Ternopil, Ukraine: Publishing House of TNTU named after I. Pulyuya, 2011. (Ukr.)
 10. I. Zachepa, N. Zachepa, M. Antonov, and A. Pyrozhok, «Starting System of Induction Motor with Dynamic Torque Control Powered by an Autonomous Sources of Energy Supply», in Proc. IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, 2022, pp. 1-6. **doi: 10.1109/mees58014.2022.10005708.**
 11. V.R. Pasika, V.M. Heletiy, Ya.M. Novitskiy, B.V. Solohub, and Ya.Ya. Danylo, «Dynamics and strength of mechanisms, machines, and structures under the conditions of complex loading», in *Dynamics and Strength of Mechanisms, Machines, and Structures*, part 2. Lviv, Ukraine: SPOLOM Publ., 2023. (Ukr.)
 12. O. Khrebtova, I. Zachepa, N. Zachepa, A. Nekrasov, K. Pavlo, and O. Hrytsai, «Dynamics Loads of the Automated Electric Drive for Moving FKM-500 Filter-Press Plates», in Proc. IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, 2023, pp. 1-5. **doi: 10.1109/mees61502.2023.10402505.**
 13. O. Khrebtova, N. Zachepa, I. Zachepa, V. Prokopenko, and G. Mykhalchenko, «Formation of Starting Torque of Double-Fed Induction Motor», in Proc. 25th IEEE Int. Conf. on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, Kremenchuk, 2020, pp. 544-547. **doi: 10.1109/paep49887.2020.9240786.**
 14. D. Shokarov, I. Zachepa, N. Zachepa, V. Chorna, and D. Susyk, «The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply», in Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, 2017, pp. 52-55. **doi: 10.1109/mees.2017.8248950.**
 15. V.M. Geletii, V.M. Korendiy, and V.R. Pasika, «Vyznachennia kinematychnykh i navantazhuvannykh parametriv transportnykh system vertykalnoho skladuvannia» [«Determination of kinematic and loading parameters of transport systems of vertical storage»], *Pidiomno-transportna tekhnika – Hoisting and conveying equipment*, vol. 1(68), pp. 17-27, 2023. **doi: 10.15276/pidtt.1.68.2023.02.** (Ukr.)
 16. V. Gudramovich, «Pro osnovni naukovy dosiahnennia akademika V. I. Mossakovskoho v napriamku mekhaniky deformivnykh tverdykh til i tonkostinnykh konstruksii» [«About the main scientific achievements of Academician V. I. Mossakovskii in the field of mechanics of deformable solids and thin-walled structures»], in Abstracts of reports of the II Int. Sci. and Tech. Conf. in memory of Academician of the NAS of Ukraine V. I. Mossakovskii «Current problems of continuum mechanics and structural strength». Dnipro, 2019, pp. 23-24. (Ukr.)
 17. M.V. Kartashov, *Imovirnist, protsesy, statystyka : posibnyk* [Probability, processes, statistics]. Kyiv, Ukraine: VOC «Kyiv University» Publ., 2008. (Ukr.)
 18. I.V. Zamrii, O.B. Prydybailo, A.G. Zakharzhevskiy, and K.V. Polonskyi, «Analiz bezpeky servis-orientovanoho prohramuvannia» [«Security analysis of service-oriented programming»], *Zviazok – Connectivity*, no. 5, pp. 29-33, 2021. **doi: 10.31673/2412-9070.2021.052933.** (Ukr.)
 19. D. Kenjić, M. Antić, and T. Anđelić, «Theoretical Aspects of Automatically Generated Service-Oriented Communication Between ADAS and IVI Domains», in Proc. IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC), Novi Sad, Serbia, 2022, pp. 87-92. **doi: 10.1109/zinc55034.2022.9840567.**
 20. O. Khrebtova, Yu. Zachepa, M. Radchenko, O. Khrebtov, and P. Kvitash, «Avtomatyzatsiia tekhnolohichnoho protsesu pererobky moloka na bazi prohramovanoho lohichnoho kontrolera VIPA» [«Automation of the technological process of milk processing based on the VIPA programmable logic controller»], *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, iss. 1(60), pp. 50-60, 2023. **doi: 10.32782/2072-2052.2023.1.60.5.**

(Ukr.)

21. H.D. Eckhardt, *Kinematic design of machines and mechanisms*. New York: McGrawHill Publ., 1998.
22. A.O. Lozinskyi, L.F. Karpluk, and B.L. Karpluk, «Doslidzhennia chastotno-rehulovanoho elektro-pryvoda zi zminnym momentom inertsii ta navantazhenniam» [«Research of a frequency-controlled electric drive with a variable moment of inertia and load»], *Problemy avtomatyzovanoho elektro-pryvodu. Teoriia i praktyka – Problems of the automated electric drive. Theory and practice*, no. 66, pp. 46-47, 2006. (Ukr.)
23. I.V. Zamrii, and V.O. Sosnovy, «Bezpeka merezhi z vykorystanniam rekurentnoi neiromerezhi» [«Network security using a recurrent neural network»], *Zviazok – Connectivity*, no. 5, pp. 21-24, 2022. doi: 10.31673/2412-9070.2022.0502124. (Ukr.)
24. Frequency converters: their types, advantages and disadvantages, methods of management and application. LLC «First Gearbox Company». [Online]. Available: <https://prk.com.ua/ua/a473092-preobrazovateli-chastoty-vidy.html>. Accessed on: July 19 2024.

Стаття надійшла 21.10.2024

Стаття прийнята 17.12.2024