

Л. Ф. Карплюк, В. І. Мороз, І. Р. Головач, А. Ю. Нищий  
Національний університет "Львівська політехніка,  
кафедра ЕКС

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗГОНУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ КУЛЬОВОГО МЛИНА

© Карплюк Л. Ф., Мороз В. І., Головач І. Р., Нищий А. Ю., 2018

**Засобами комп'ютерного моделювання проаналізовано роботу системи керування електроприводом кульового млина в процесі пуску. У розробленій комп'ютерній моделі враховано змінний нелінійний характер механічного навантаження та змінний момент інерції. Наведено результати проведених досліджень, які можна використати для розроблення нових систем електроприводів.**

*Ключові слова: кульовий млин, нелінійний момент навантаження, частотно-керований електропривід.*

**The work of the control system of ball mill electric drive during the start-up process is analyzed using computer simulation. The developed computer model uses the variable nonlinear model of the mechanical load and the variable moment of inertia. The results of the conducted researches can be used at development of new systems of electric drives.**

*Key word: ball mill, variable nonlinear model of the mechanical load, frequency-controlled asynchronous electric drives.*

### Вступ

**Постановка проблеми.** Високої інтенсивності технологічних процесів і зростання вимог до якості продукції сучасного виробництва досягають застосуванням досконалішого механічного та електротехнічного обладнання. Досягнення в галузі напівпровідникової та мікропроцесорної техніки, цифрових систем створили базу застосування керованих електроприводів змінного струму ТПЧ-АД зі скалярним та векторним керуванням, які дають змогу отримати високі показники енергозбереження та керованості технологічними процесами. Значний інтерес викликає встановлення сучасних частотно-керованих електроприводів на механізми зі змінними у функції кута повороту моментами навантаження та моментами інерції. Серед таких механізмів – кульові млини, дефібрери, глиномішалки, каменедробарки (з переважно змінним моментом статичного навантаження), машини з кривошипно-шатунними або ексцентрикними механізмами (з переважно змінним моментом інерції).

Для аналізу технологічних особливостей роботи кульових млинів використано млин МТД 380, що експлуатується на Львівському керамічному заводі. Такі млини використовують для помолу керамічної глини та фритти-глазури, а також для інших операцій розмелювання та для промислового очищення різноманітних продуктів. Тип приводу млинів "пасова передача – редуктор – асинхронний двигун". Барабан наповнюють розмелюючими тілами з альбіту, переважно циліндричної або овальної форми. Млин завантажують глиною та наповнюють водою. Маса розмелюючих тіл та сировини помолу становить до 20 т, тіла мають різні розміри і, відповідно, різне процентне співвідношення від загальної маси. Використовують глини з різних регіонів Західної України, що мають різну питому густину. Для забезпечення вологості меленої маси у межах 31–34 % заливають воду (близько 10 т). Застосування достатньо грубої техніки дозування, неоднорідність використаних матеріалів, прилипання суміші до стінок млина та футерівки спричиняє значний розкид завантаження млина, що призводить до перевищення моменту навантаження запроєктованих значень. При цьому виникають проблеми під час

пуску млина з можливістю стопоріння приводу при куті повороту, близькі до  $90-120^\circ$  і, як наслідок, неодноразові затяжні невдалі спроби запуску. У таких випадках часто додають воду для збільшення об'єму в бочці млина і, відповідно, до наближення центру мас до осі обертання, що спричиняє бажане зменшення максимального моменту навантаження під час розгону, але при цьому порушується технологічний процес і погіршується якість продукції. Але й це не завжди дозволяє розігнати ненормовано завантажений млин. У такому випадку барабан млина початково розкручують за допомогою троса, який розмотують з барабана млина лебідкою. Перерви у виробництві на операції для розруху млина сягають 3–4 робочі цикли.

Робочий цикл або середній час помолу триває 12–16 год, після чого здійснюють контроль розмеленої сировини на відповідність основним показникам якості помолу. У випадку невідповідності розмеленої сировини технологічним вимогам продовжують помол. Проблеми запуску існують і при повторному запуску млинів. Отже, досвід експлуатації показав, що відбуваються аварійні переривання запуску млина, які виникають у разі ненормованого завантаження млина та після тривалого помолу при повторних запусках, після вимушеної зупинки для контролю якості сировини.

### **Аналіз останніх досягнень та публікацій**

Традиційно для кульових барабанних млинів середньої потужності застосовують електропривод синхронними та асинхронними двигунами змінного струму [1, 2]. Для забезпечення достатніх моментів зрушення потужність синхронного двигуна вибирають із значним запасом [3]. Асинхронний електропривід з реостатним керуванням в колі ротора здатний розвинути пусковий момент, що дорівнює критичному. Недоліком такого електроприводу є значні втрати енергії на пускових резисторах. Частотно-керований асинхронний електропривод зі скалярним, а там більше, векторним керуванням, з формуванням необхідних статичних і динамічних характеристик зовнішньою двоконтурною системою підпорядкованого регулювання (СПР) із внутрішнім контуром моменту та зовнішнім контуром швидкості з налаштуванням регуляторів за принципом “технічної оптимізації” [4] має реалізувати пускові моменти, близькі до критичних.

Основним методом дослідження процесів у складних електромеханічних системах з урахуванням специфічних технологічних властивостей роботи є моделювання. У наведених у літературі даних досліджень [3, 4, 6] основним чинником, який зумовлює характер навантаження кульового млина, є його статична механічна характеристика. У роботах [3, 4, 6] при моделюванні процесів враховано також зміну моменту інерції. Причому у роботі [3] зміна моменту інерції враховується введенням емпіричного коефіцієнта збільшення, а у роботах [4, 6] зміни статичного моменту та моменту інерції описуються періодичними гладкими функціями, хоча у роботах [3, 5] на основі досліджень роботи млина стверджується про обвальний характер зміни навантаження.

Складність формування нелінійних моделей із розривними функціями підтверджується відсутністю публікацій, в яких розглядається задача врахування такої істотної нелінійності, як стрибкоподібна зміна характеристик об'єкта моделювання, з метою адекватнішого відтворення поведінки реальних об'єктів у комп'ютерній моделі.

### **Постановка задачі**

Метою роботи є дослідження засобами комп'ютерного імітаційного моделювання особливостей роботи частотно-керованого асинхронного електроприводу кульового барабанного млина та вироблення рекомендацій з його впровадження. Для дослідження необхідно мати математичну модель, яка адекватно відтворює особливості характеристик механізму з нелінійним моментом інерції та навантаження та зробити висновки щодо доцільності врахування ефекту їх стрибкоподібної зміни під час моделювання електромеханічних систем.

### **Виклад основного матеріалу**

У роботах [3, 5] зазначено, що основним чинником при обґрунтуванні вибору приводу є надійність запуску млина, а основні вимоги визначає механічна характеристика навантаження (рис. 1). Встановлено, що форма механічної характеристики млина визначається коефіцієнтом заповнення

барабана, параметрами внутрішнього завантаження, рівнем швидкості обертання тощо. Вона має, зазвичай, екстремальні точки: в момент зрушення та при поверненні барабана на кут відриву частини завантаженої маси, до переходу її з колового в каскадний режим руху [7]. Подібні механічні характеристики навантаження наведено також у роботах [2, 4] (рис. 2).

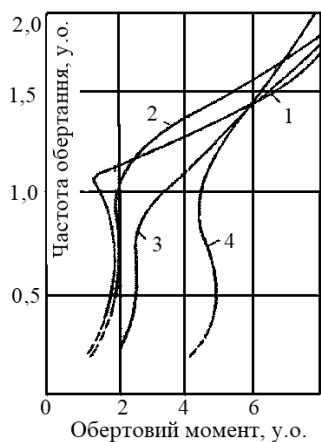


Рис. 1. Механічні характеристики млина

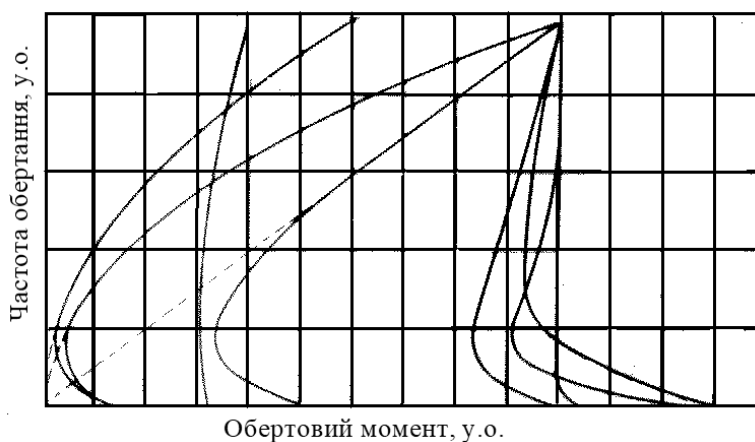


Рис. 2. Типові механічні характеристики робочих машин

Аналіз характеристик 1–4, зображених на рис. 1, 2, дозволяє зробити висновок: для успішного запуску кульового млина його електропривід повинен реалізувати значні за величиною моменти як для зрушення млина, так і під час збільшення кута повороту, коли відбувається зростання статичного моменту навантаження.

Досліджуючи процеси в електромеханічній системі барабанного млина, необхідно враховувати технологічні властивості його роботи. Під час роботи барабана виділяють три основні траєкторії руху сировини [7] (рис. 3):

- каскадний – відбувається перемішування, сировина знаходиться в нижній частині барабана, такий режим характерний для невисоких швидкостей;
- водоспадний – суміш піднімається орієнтовно до верхньої точки барабана і обвалюється; цей режим є достатньо ефективний для змішування, відбувається при середніх швидкостях;
- режим центрифугування – характерний для високих швидкостей роботи.

Теоретично ці режими є почерговими, але практично при розгоні попередньо завантаженого кульового млина у випадку залипання маси в одне ціле відбувається перехід на режим, характерний для водоспадного.

З основ теорії руху сировини барабана [7] відомо, що для заповнених сумішшю тіл, які мають форму кулі, при розгоні за достатнього тертя між футерівкою та сировиною масою  $m$  остання рухається разом з барабаном круговою траєкторією доти, поки момент, що створюється його вагою ( $M = m \cdot g \cdot R \cdot \sin \alpha$ , де  $R$  – радіус барабана;  $\alpha$  – кут між вертикальною віссю та радіусом, який проведений з центра барабана до точки місця положення завантаженої маси), не перевищить моменту тертя. Після цього суміш припиняє рух разом з барабаном і переходить з кругової траєкторії на параболічну, що призводить до стрибкоподібної зміни статичного моменту та моменту інерції. Тобто, поряд зі змінними у функції кута повороту млина виникає стрибкоподібна зміна навантаження в момент обвалу.

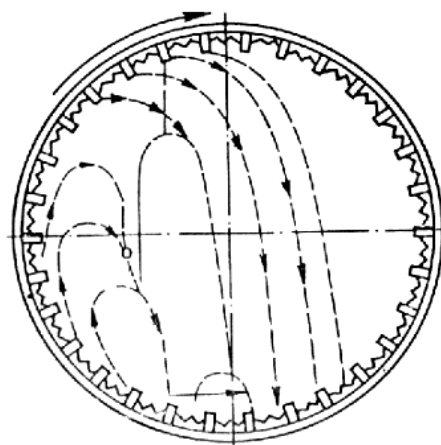


Рис. 3. Траєкторії руху сировини в барабані кульового млина

Електромеханічний перетворювач енергії зі змінними у функції кута повороту робочого органу навантаженням і моментом інерції в загальному вигляді описується рівнянням:

$$M_d - M_c = J \frac{dw}{dt} + \frac{w}{2} \cdot \frac{dJ}{dt}, \quad (1)$$

або

$$M_d - M_c = J \frac{dw}{dt} + \frac{w^2}{2} \cdot \frac{dJ}{da}, \quad (2)$$

де  $M_c$  – статичний момент навантаження,  $M_d$  – момент двигуна;  $J$  – зведений до вала двигуна момент інерції;  $\omega$  – кутова швидкість двигуна.

Умова періодичності зміни статичного моменту  $M_c$  та моменту інерції  $J$  [4]:

$$\begin{aligned} J &= J_0 \cdot (k_j \sin \alpha + 1); \\ M_c &= M_{c0} \cdot (k_m \sin \alpha + 1), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $J_0, M_{c0}$  – постійні значення;  $k_j, k_m$  – коефіцієнти пропорційності змінної та постійної складових, відповідно, моментів інерції та навантаження.

Такій моделі відповідає структурна схема, що наведена на рис. 4 [6]. Змінна складова моменту інерції тут моделюється ланкою 1, а моменту навантаження – ланкою 2.

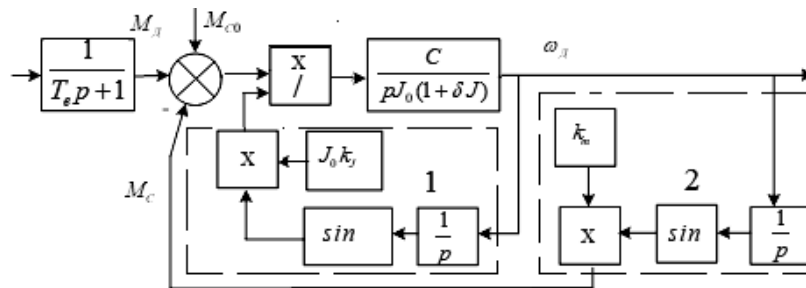


Рис. 4. Структурна схема моделі змінного навантаження

Поряд зі змінним у функції кута повороту млина моменту інерції існує стрибкоподібна зміна навантаження в момент обвалу. У такому випадку опис періодичної функції зміни навантаження повинен мати періодичну розривну тригонометричну функцію. Періодичною розривною тригонометричною функцією, якою доцільно описати зміну статичного моменту, є арктангенс. У такому разі, а також у випадку представлення механічної частини двомасовою з врахуванням пружності механічної передачі  $c$  електромеханічна система кульового млина описуватиметься рівнянням (4), а структурна схема матиме вигляд, як на рис. 5.

$$\left. \begin{aligned} M_d(p) - M_{np}(p) &= \beta \cdot T_{EM} \cdot p \cdot \omega_d(p) \\ M_{np}(p) &= \frac{c}{p} \cdot (\omega_d(p) - \omega_{mex}(p)) \\ M_{np}(p) - M_c(\alpha) &= J_{mex}(\alpha) \cdot p \cdot \omega_{mex}(p) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

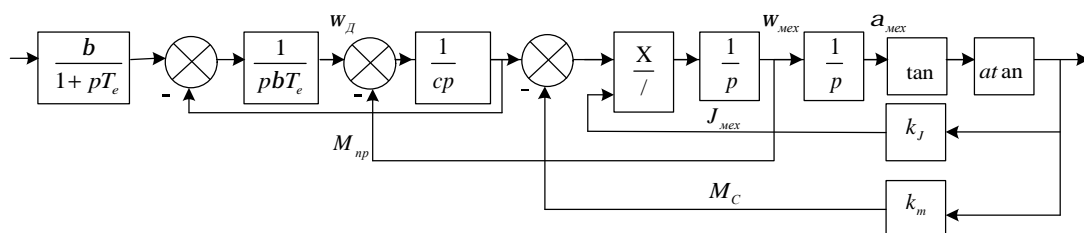


Рис. 5. Блок-схема моделі навантаження

Доволі складною проблемою в моделюванні розглянутої системи є відсутність у стандартних моделях асинхронних машин способу зміни моменту інерції навантаження [8, 9]. Зокрема, особливо гострою є проблема під час застосування відомого середовища імітаційного моделювання MATLAB-Simulink [9, 10].

У статті запропонованій структурній схемі електромеханічної системи відповідає модель частотно-керованого електроприводу з векторним керуванням у середовищі MATLAB-Simulink [9, 11] (рис. 6). Сигнал завдання швидкості  $U_{зш}$  подано через підсилювач, задавач інтенсивності ЗІ та ланку обмеження ЛО на схему керування Vector Control векторним частотним перетворювачем із ланкою постійного струму VDC та інвертором, що використовує IGBT. Сформована напруга інвертора подається на асинхронний короткозамкнений двигун Asynchronous Machine потужністю 75 кВт та параметрами з бібліотеки MATLAB-Simulink. На вал двигуна подано пружний момент  $M_{пр}$ , отриманий інтегруванням зі сталюю, пропорційною пружності механічної передачі, сигналу, пропорційного різниці швидкості двигун  $\omega_d$  та механізму  $\omega_{мех}$ . Швидкість механізму  $\omega_{мех}$  отримується інтегруванням добутку статичного моменту  $M_{пр}$  та моменту інерції механізму  $J_{мех}$ . Причому статичний момент та момент інерції формуються змінними в функції кута повороту вала механізму  $\alpha_{мех}$ , який, своєю чергою, отримуємо інтегруванням кутової швидкості механізму  $\omega_{мех}$ .

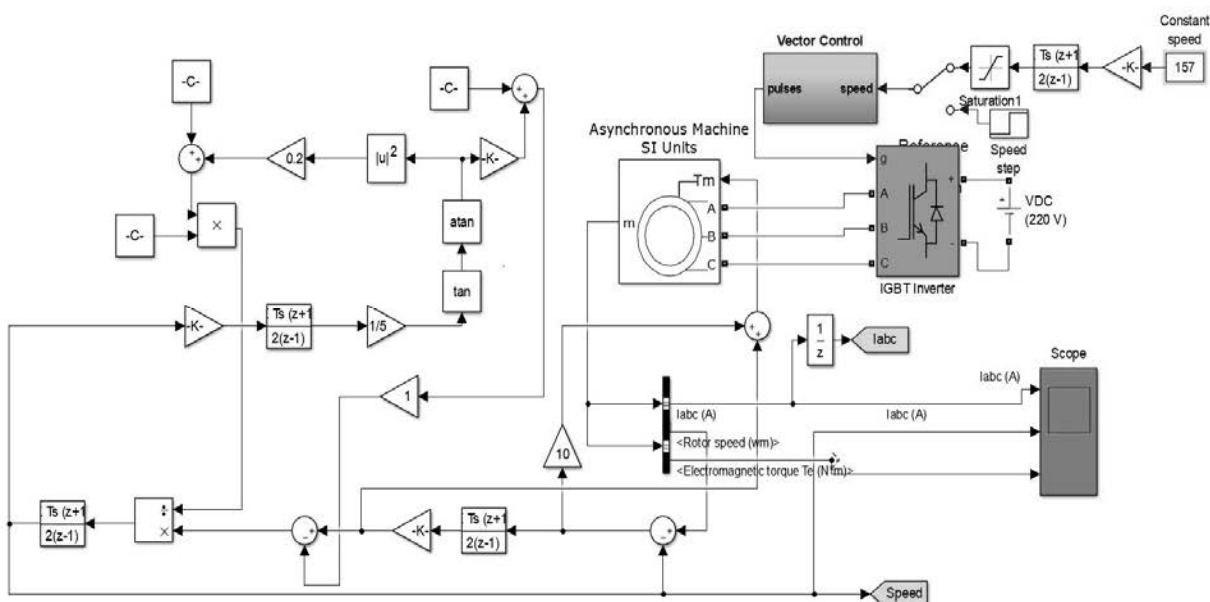


Рис. 6. Модель електромеханічної системи електроприводу кульового млина в середовищі MATLAB-Simulink

### Аналіз одержаних результатів

Перехідні процеси зміни швидкості барабана млина та активної складової струму ротора двигуна під час розгону регульованого асинхронного електроприводу з векторним керуванням двигуном, отримані математичним моделюванням, наведено на рис. 7. Структура та вибір параметрів системи автоматичного регулювання забезпечують астатизм обмеження моменту двигуна заданим максимальним значенням. Аналіз показує, що в такому електроприводі під час розгону максимальне значення активного струму, а отже, й максимальний момент підтримуються на заданому рівні і забезпечує рух млина із наростанням навантаження при зміні кута повороту його барабана, причому, як видно з діаграми, темп наростання швидкості зменшується завдяки збільшенню навантаження і моменту інерції. Електропривід розвиває момент двигуна, достатний для пуску та прискорення із наростанням навантаження до максимального значення. У момент стрибкоподібного зменшення навантаження, яке відповідає обвалу завантаження млина, збільшується кутове прискорення барабана. За час розгону до усталеної швидкості руху таких обвалів відбувається декілька. Високочастотні коливання моменту та швидкості зумовлені пружністю механічної передачі.

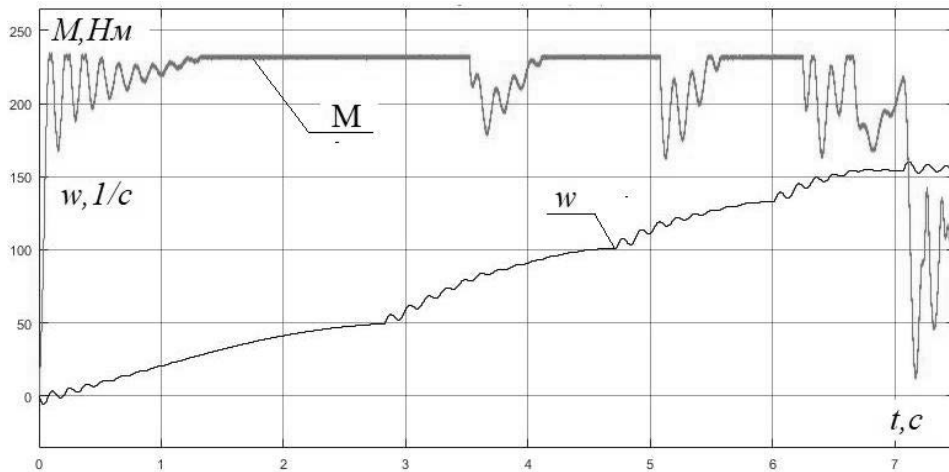


Рис. 7. Розрахункові діаграми зміни швидкості та струму двигуна при розгоні кульового млина

Зняті осцилограми процесів зміни активного струму та швидкості двигуна під час розгону реального млина з різними завантаженнями наведено на рис. 8. Осцилограма процесів, які показано на рис. 8, а, відповідає розгону з двома обвалами породи в млині, а на рис. 8, б – з одним, надалі монолітність маси завантаження порушено, і сировина переходить у каскадний режим руху. Аналіз осцилограм показує, що характер процесів, отриманих математичним моделюванням на малих швидкостях у режимах рухання млина, практично адекватний процесам у реальній електро-механічній системі.

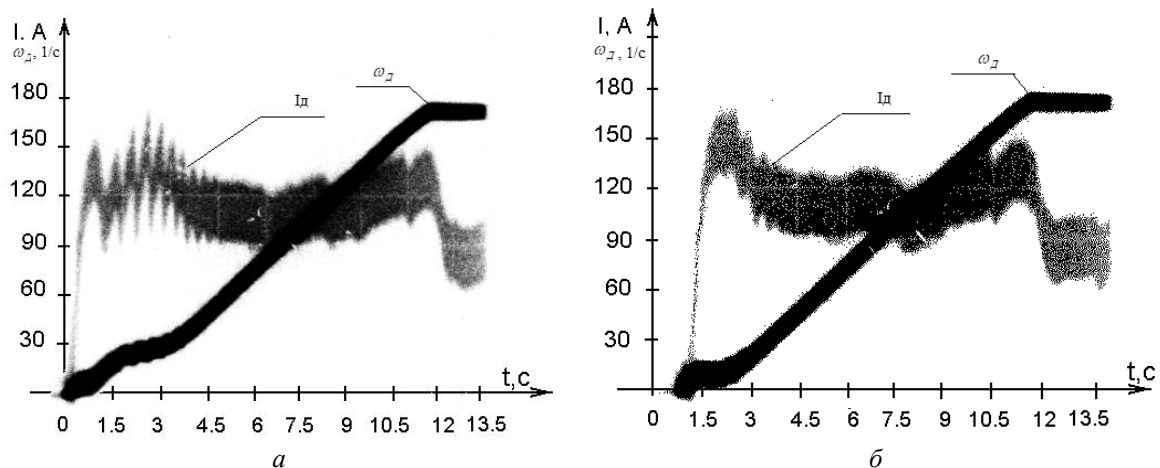


Рис. 8. Перехідні процеси в реальній системі електроприводу

### Висновки

1. Розроблена математична модель електромеханічної системи електроприводу кульового млина дає змогу досліджувати процеси пуску та визначати налаштування системи керування.
2. Сучасні системи частотно-керованого електроприводу з асинхронними двигунами придатні для використання для приводу механізмів зі змінним моментом інерції та навантаження.
3. Система керування частотно-керованим електроприводом повинна мати можливість формування характеристик з реалізацією та підтриманням під час пуску значних моментів.

1. Андреев В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – М. Л.: Энергоиздат, 1963. – 772 с. 2. Гейлер Л. Б. Электропривод в тяжелом машиностроении / Л. Б. Гейлер – М.: Машигиз, 1958. – 587 с. 3. Кириченко В. І. Удосконалення системи керування синхронним двигуном потужністю 2,5 мВт приводу барабанного млина МШРГУ-4500\*600 // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – № 30. – С. 269–272.

4. Лозинський А. О. Дослідження частотно-керованого електроприводу зі змінним моментом інерції та навантаження / А. О. Лозинський, Л. Ф. Карплюк, Б. Л. Карплюк. // Міжвідомчий наук. техн. збірник нац. Одеського ун-ту «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – 2006. – № 66. – С. 46–47. 5. Черный А.П. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: монография / [Черный А. П., Гладырь А. И., Осадчук Ю. Г. та ін.]. – Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2006. – 280 с. 6. Карплюк Л. Ф. Частотно-керований електропривод для навантаження з кривошипно-шатунним механізмом / Л. Ф. Карплюк, Б. Л. Карплюк, Б. Я. Панченко // Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2006. – № 563. – С. 38–41. 7. Гийо Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие / Р. Гийо. – М., 1964. 8. Шевченко І. С. Спеціальні питання теорії електропривода. Динамічні процеси в складних електромеханічних системах: навч. посіб. / І. С. Шевченко, Д. І. Морозов. – К.: Кафедра, 2014. – 200 с. 9. Костинюк Л. Моделирование электроприводів: навч. посіб. / Л. Костинюк, В. Мороз, Я. Паранчук. – Львів: Видид-во Нац. ун-ту "Львівська політехніка", 2004. – 404 с. 10. Simulink: Simulation and Model-Based Design. С. 1994–2018 The Math-Works, Inc. [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html>. 11. SimPowerSystems : MATLAB®, the language of technical computing [MathWorks Documentation Center] [Електронний ресурс]. – [Режим доступу]: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/index.html>.