

ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕНЕРГЕТИКА

DOI 10.31891/2307-5732-2021-295-2-139-146

УДК 67/68.08:678.053

М.Є. СКИБА, О.В. МІСЯЦЬ, А.О. ПОЛІЩУК

Хмельницький національний університет

В.П. МІСЯЦЬ, М.М. РУБАНКА

Київський національний університет технологій та дизайну

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ АСИНХРОННОГО ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ РОТОРНОЇ ДРОБАРКИ

Проведено аналіз конструкції та принципу роботи сучасних роторних дробарок для подрібнення відходів полімерних матеріалів. Визначено шляхи можливого удосконалення існуючого обладнання для подрібнення відходів полімерних матеріалів. Сформульовано принципи автоматизації роботи приводу роторної дробарки. Розроблено структурну схему системи частотного керування приводом роторної дробарки. Проведено аналіз роботи асинхронних трифазних двигунів при частотному керуванні швидкістю обертання. Визначено механічні характеристики електроприводу роторної дробарки. Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні нових і модернізації існуючих конструкцій роторних дробарок для подрібнення відходів полімерних матеріалів.

Ключові слова: електродвигун, подрібнення, полімери, відходи, привод, частотне керування, роторна дробарка, механічні характеристики.

MYKOLA J. SKYBA, OLEKSANDR V. MISIATS, A.O. POLISHUK

Khmelnitskyi National University

VOLODYMYR P. MISIATS, MYKOLA M. RUBANKA

Kyiv National University of Technologies and Design

SYSTEM OF ADAPTIVE FREQUENCY CONTROL OF SPEED OF ROTATION OF THE ASYNCHRONOUS THREE-PHASE ELECTRIC MOTOR OF THE ROTOR CRUSHER DRIVE

The analysis of a design and the principle of work of modern rotary crushers for crushing of waste of polymeric materials is carried out. Ways of possible improvement of the existing equipment for crushing of waste of polymeric materials are defined. The principles of automation of the rotary crusher drive are formulated. The structural scheme of the frequency control system of the rotor crusher drive is developed. The analysis of operation of asynchronous three - phase motors at frequency control of speed of rotation is carried out. The mechanical characteristics of the electric drive of the rotary crusher are determined. The methodological and theoretical bases of the study are the main provisions of strength of materials, theoretical mechanics and the theory of electric drive. The paper for the first time uses a comprehensive approach to the study of the grinding process of polymeric materials, which takes into account the dependence of their physical and mechanical properties on the conditions of the process, as well as kinematic and electrical characteristics of the equipment. The object of research is the technological process of mechanical grinding of light industry waste in rotary crushers. The subject of the study is the electric drive of a rotary crusher for processing polymer waste. The expression for calculation of mechanical characteristics of asynchronous electric motors according to their passport data is received that allows to calculate modes of work of drives of crushers at various power frequencies and various control laws. The use of frequency control of the electric drive of the rotary crusher for the processing of waste polymeric materials from light industry will increase the reliability of its operation. The research results can be used in the design of new and modernization of existing structures of rotary crushers for grinding waste polymeric materials.

Key words: electric motor, grinding, polymers, waste, drive, frequency control, rotary crusher, mechanical characteristics.

Вступ

На сьогоднішній день існує понад 400 різних видів пластмасових відходів. Універсального рішення екологічної проблеми так і не знайдено, тому ідея радикального рішення проблеми відходів залишається актуальною [1–4]. Із-за специфічних властивостей полімерних матеріалів, які не піддаються гниттю, корозії, а при спалюванні ще й утворюється токсична зола і гази, такі як аміак, оксиди азоту, хлороводень, діоксин – проблема їх утилізації носить, перш за все, екологічний характер [5–8]. Разом з цим виникають економічні проблеми, оскільки поступово зростають потреби в здешевленні сировини для виробництва полімерів [9, 10].

Найбільш поширеним представником обладнання для переробки відходів матеріалів виробництв легкої промисловості в Україні є роторна дробарка, яка може також використовуватися для переробки відходів підприємств інших галузей – хімічної, харчової тощо [11–15].

В теперішній час існує ряд питань, що пов'язані з енергоефективністю технологічних процесів переробки відходів та довговічністю роторних дробарок, оскільки неусталені режими роботи роторних дробарок супроводжуються значними динамічними навантаженнями на робочі органи [16–18].

Вдосконалення роторних дробарок та систем їх електроприводу з врахуванням фізико-механічних властивостей подрібнюваних матеріалів є актуальною задачею, оскільки переробка відходів матеріалів виробництв легкої промисловості дозволяє заощадити кошти та підвищити екологічність виробництв [11].

Вдосконалення електроприводу дробарки можливе шляхом розробки системи адаптивного керування його асинхронним електродвигуном.

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом досліджень є технологічний процес механічного подрібнення відходів матеріалів виробництв легкої промисловості в роторних дробарках. В ході розв'язання поставлених задач були використані основні положення опору матеріалів, теоретичної механіки і теорії електроприводу.

Постановка завдання

Враховуючи актуальність питання удосконалення систем електроприводу роторних дробарок для переробки відходів матеріалів виробництв легкої промисловості, завданням досліджень є розробка адаптивної схеми керування електродвигуном роторної дробарки, яка дозволить регулювати частоту обертання ротора дробарки, а в ідеалі і автоматично регулювати ступінь завантаження дробарки в залежності від потужності, яка витрачається на подрібнення відходів.

Результати та їх обговорення

Для адаптивного керування приводом роторної дробарки під час подрібнення відходів полімерних матеріалів виробництв легкої промисловості запропоновано структурну схему, яка представлена на рис. 1.

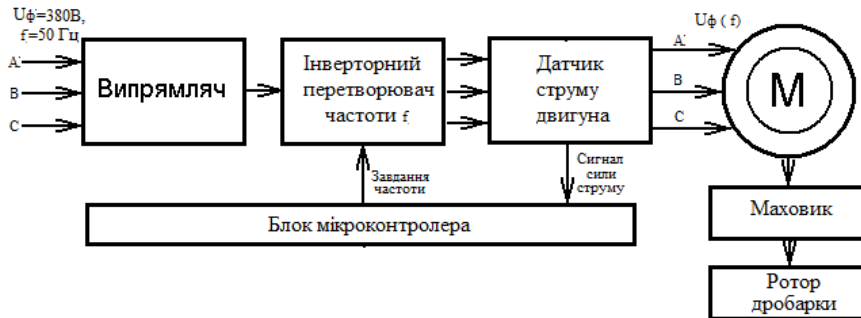


Рис. 1. Структурна схема системи адаптивного керування приводом роторної дробарки

У відповідності до структурної схеми (рис. 1), система керування приводом живиться від трифазної мережі з фазною напругою 380 В, частотою 50 Гц. Живлення подається на випрямляч, який формує постійний струм, що необхідний для інверторного перетворювача частоти, який формує трифазний струм, що може мати різні значення фазної напруги $U_{\phi}(f)$ і частоти f . На вході живлення електродвигуна встановлено датчик струму, який формує на своєму виході сигнал, рівень якого залежить від моменту опору на валу електродвигуна. Сигнал датчика струму є основним керуючим показником для адаптивного визначення частоти живлення і фазної напруги. Основним керуючим елементом системи є блок мікроконтролера, який у відповідності записаній програмі визначає необхідний режим живлення електродвигуна і керує роботою частотного інвертора.

При частотному керуванні швидкістю асинхронного електродвигуна має водночас змінюватись частота f та амплітуда U напруги живлення. Співвідношення напруги живлення і частоти може визначатись за різними законами. Самий простим є лінійний закон частотного керування швидкістю асинхронного двигуна, який ще називається законом Костенка:

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}} = const \quad (1)$$

Згідно з (1) частота повинна змінюватись пропорційно зміні напруги. Це забезпечує незмінне значення критичного моменту та незмінний номінальний магнітний потік при широкому діапазоні керування швидкістю від нуля і до максимальної. Найчастіше в якості максимальної виступає номінальна швидкість, якій відповідає номінальна напруга статора. Підвищення напруги вище номінальної обмежується електричною стійкістю ізоляції обмотки. Семейство штучних механічних характеристик, які мають паралельні робочі ділянки, представлено на рис. 2.

Розглянутий закон частотного керування швидкістю асинхронного двигуна є основним. Його перевагою є плавна зміна швидкості від нуля і до максимальної (номінальної) при незмінній жорсткості механічних характеристик та переважувальній здатності двигуна. Діапазон керування складає 5...10 для розімкнутих систем та 1000 і більше для замкнених. Він називається "керування в першій зоні з постійним моментом двигуна". Недолік полягає у відносній складності та підвищеній вартості перетворювача частоти.

Для вентиляторів і насосів, статичний момент яких пропорційний квадрату швидкості $M_c \cong \omega^2$, придатний наступний закон частотного керування:

$$\frac{U_1}{f_1^2} = \frac{U_{1н}}{f_{1н}^2} = const \quad (2)$$

при якому критичний момент двигуна зменшується пропорційно квадрату швидкості $M_k \cong \omega^2$ (рис. 4).

Для керування швидкістю із забезпеченням повної потужності двигуна, але з послабленням

магнітного потоку і відповідно зменшенням критичного моменту двигуна застосовується закон керування:

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \frac{U_{1n}}{\sqrt{f_{1n}}} = \text{const} \quad (3)$$

При цьому момент двигуна змінюється обернено пропорційно, а синхронна швидкість пропорційно частоті, тому потужність, як їх добуток залишається незмінним. Сімейство штучних механічних характеристик показано на рис. 5. Ці три закони частотного керування швидкості асинхронного двигуна є найбільш поширеними.

Розглянемо схему заміщення асинхронного двигуна (рис. 6) і отримаємо формулу для побудови механічних характеристик приводу.

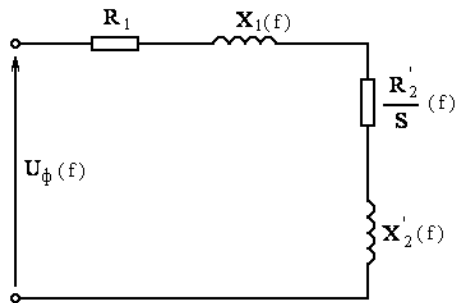


Рис. 6. Схема заміщення асинхронного двигуна: U_ϕ - фазна напруга живлення; X_1 - індуктивний опір статора; R_1 - активний опір статора; R_2' - активний приведенний опір ротора; X_2' - індуктивний опір ротора, приведенний до обмотки статора

Згідно схеми заміщення, представленої на рис. 6, струм ротора визначається наступною залежністю:

$$I_2' = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + X_k^2}}, \quad (4)$$

де $X_k = X_1 + X_2'$ – сумарний індуктивний опір.

Активна електромагнітна потужність трифазного АД, яка передається до ротора через повітряний зазор, з однієї сторони дорівнює:

$$P_{12} = 3I_2'^2 R_2'/s = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'/s}{(R_1 + R_2'/s)^2 + X_k^2},$$

а з іншої

$$P_{12} = M\omega_c.$$

Після порівняння вказаних потужностей отримується рівняння електромагнітного моменту асинхронного двигуна:

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_c s [(R_1 + R_2'/s)^2 + X_k^2]}. \quad (5)$$

Як видно з виразу (5), момент асинхронного двигуна залежить від квадрату напруги статора, тому АД дуже чутливий до зниження напруги живлення.

Вираз для пускового моменту двигуна отримується з (5) при ковзанні $s=1$:

$$M_n = \frac{3U_{1\phi}^2 R_2'}{\omega_c [(R_1 + R_2')^2 + X_k^2]}. \quad (6)$$

Функція (5) має точки екстремуму за ковзанням, які можна знайти прирівнявши відношення dM/ds до нуля. Це буде критичне ковзання двигуна:

$$s_{k1,2} = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}}. \quad (7)$$

Критичному ковзанню відповідає критичний момент:

$$M_{k1,2} = \pm \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_c [\pm R_l + \sqrt{R_l^2 + X_k^2}]} \quad (8)$$

В рівняннях (7) та (8) знак “-“ береться, якщо швидкість двигуна більша за синхронну швидкість $\omega > \omega_c$.

З урахуванням формул для критичного ковзання (7) та критичного моменту (8) рівняння моменту двигуна (5) перетворюється у формулу Клоса [15], яка використовується для аналітичної побудови механічних характеристик АД:

$$M = \frac{2M_k (1 + s_k \frac{R_l'}{R_2})}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{R_l'}{R_2}} \quad (9)$$

Двигуни середньої та великої потужності мають значення опору R_l значно менше за інші електричні опори двигуна, тому воно часто нехтується $R_l=0$ і формули критичного ковзання, моменту та Клосса значно спрощуються

$$s_k \approx \pm \frac{R_2'}{X_k}; \quad M_k \approx \pm \frac{3U_{1\phi}^2}{2\omega_c X_k}; \quad M \approx \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}};$$

та знаходиться простий вираз для знаходження критичного ковзання двигуна:

$$s_k \approx s_n (\lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 - 1}), \quad (10)$$

де $\lambda_m = M_k / M_n$ – відношення критичного моменту до номінального.

Швидкісні характеристики можна отримати, виходячи з виразу для струму I_2' . Розрахуємо електромеханічну характеристику для різної частоти живлячої напруги:

$$I_2' = \frac{U_\phi(f)}{\sqrt{\left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S(f)} \right)^2 + (x_k \cdot f^*)^2 \right]}} \quad (11)$$

де $U_\phi(f)$ – фазна напруга при заданій частоті; $S(f)$ – це ковзання при заданій частоті. Скористаємось наступними формулами для визначення невідомих параметрів схеми заміщення: Критичне ковзання S_k :

$$S_k = S_n \cdot (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,029 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,12 \quad (12)$$

де S_n – номінальне ковзання; λ_m – коефіцієнт перевантаження. Індуктивний фазний опір короткого замикання x_k :

$$x_k = \sqrt{\frac{R_2'^2}{S_k^2} - R_1^2} \quad (13)$$

Фазна напруга повинна змінюватись у відповідності до певного закону зі зміною частоти. В залежності від виду моменту опору найчастіше дотримуються пропорцій:

$$\frac{U_\phi}{f} = const \quad \text{або} \quad \sqrt{\frac{U_\phi}{f}} = const \quad (14)$$

В нашому випадку ми не змінюємо частоту живлення при постійному режимі роботи електродвигуна, а задаємо йому дві фіксованих частоти обертання. Окрім того, ми не можемо підвищити напругу живлення вище номінальної при регулюванні швидкості вверх від номінальної. Тому приймемо, що фазна напруга $U_\phi(f)$ при збільшенні частоти залишається 380 В, а при частоті обертання менше номінальної двигун живиться пониженою напругою, значення якої знаходиться в межах:

$$U_{\phi.ном} \frac{f_i}{50} \leq U_\phi \leq U_{\phi.ном} \sqrt{\frac{f_i}{50}} \quad (15)$$

Для частоти живлення 30 Гц $U_\phi=280...310$ В. Варіювання фазної напруги в цих межах дасть змогу

підібрати необхідну механічну характеристику електродвигуна.

Ковзання при заданій частоті можна знайти за формулою:

$$S(f) = \frac{\omega_0 \cdot f^* - \omega}{\omega_0 \cdot f^*} \quad (16)$$

де ω_{0n} – номінальна швидкість обертання; $f^* = f_i / f$; f – задана частота живлячої напруги; f_i – частота, що змінюється.

В результаті підстановки виразу (16) в (12) отримаємо остаточний вираз для швидкісної характеристики:

$$I_2' = \frac{U_\phi(f)}{\sqrt{\left[\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_{0n} \cdot f^*}{\omega_{0n} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_k \cdot f^*)^2 \right]}} \quad (17)$$

Підставивши різні значення частоти живлячої напруги, і швидкості від 0 до ω_0 у формулу (17), отримаємо значення струму I_2' для швидкісних характеристик при різних частотах.

Запишемо вирази для моменту АД, підставляючи в нього значення параметрів з урахуванням частоти живлячої напруги:

$$M = \frac{3 \cdot U_\phi^2(f) \cdot \frac{R_2'}{S(f)}}{\omega_0(f) \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S(f)} \right)^2 + x_k^2(f) \right]} \quad (18)$$

В результаті перетворень виразу (18), підставивши в нього (16), отримаємо остаточний вираз для побудови механічної характеристики:

$$M = \frac{3 \cdot (U_{\phi,ном} \cdot \sqrt{f^*})^2 \cdot \frac{R_2' \cdot \omega_{0n} \cdot f^*}{\omega_{0n} \cdot f^* - \omega}}{\omega_{0n} \cdot f^* \cdot \left[\left(R_1 + \frac{R_2' \cdot \omega_{0n} \cdot f^*}{\omega_{0n} \cdot f^* - \omega} \right)^2 + (x_k \cdot f^*)^2 \right]} \quad (19)$$

Підставивши різні значення частоти живлячої напруги, і швидкості від 0 до ω_0 у формулу (19), отримаємо значення моменту для механічних характеристик електродвигунів при різних частотах.

В приводі роторної дробарки, що потребує удосконалення, встановлено асинхронний трифазний двигун з короткозамкненим ротором АИР100s4u2, який має наступні характеристики [16]:

- номінальна напруга живлення 380 В;
- потужність 3 кВт;
- коефіцієнт потужності 0,82;
- частота обертання 1420 об/хв;
- номінальний струм 7,2 А;
- номінальний момент 12 Нм;
- кратність перевищення моменту 2,3.

Розрахунки проведено з використанням програмного забезпечення «MathCad».

На рис. 8 представлено механічні характеристики електродвигуна 4А50В2У3 з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом керування $U_\phi / f = const$.

На рис. 9 представлено механічні характеристики електродвигуна 4А100В2У3 з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом керування $U_\phi / f^2 = const$.

На рис. 10 представлено механічні характеристики електродвигуна 4А50В2У3 з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом керування $\sqrt{U_\phi / f} = const$.

Для отримання робочих точок електроприводу при різних законах керування можна в першому наближенні вважати момент опору на валу дробарки постійним.

З отриманих графіків механічних характеристик електродвигуна видно, що при законі керування $U_\phi / f = const$ (рис. 8) робота приводу дробарки не ефективна в усьому діапазоні регулювання частоти

живлення, оскільки максимальний момент «перекидання» асинхронного двигуна не змінюється. А для роботи дробарки при виникненні пікових перевищень моменту це є визначальним чинником.

При законі керування $U_{\phi} / f^2 = const$ (рис. 9) не можлива робота, оскільки в цьому випадку його момент опору буде знаходитись в небезпечній області характеристик при частотах живлення нижче номінальної. Цей закон більше підходить для вентиляторних пристроїв, коли момент опору пропорційний квадрату швидкості обертання.

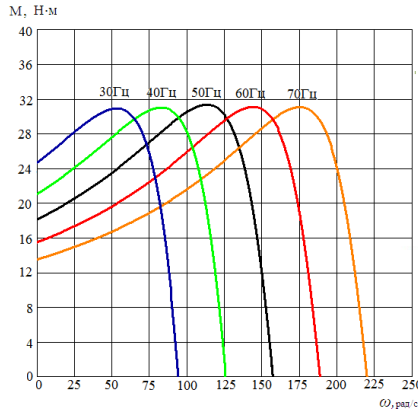


Рис. 8. Механічні характеристики електродвигуна 4А50В2У3 з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом керування $U_{\phi} / f^2 = const$

При законі керування $\sqrt{U_{\phi} / f} = const$ (рис. 10) робота дробарки буде найбільш ефективною, оскільки його момент опору буде знаходитись в безпечній області характеристик при всіх заданих частотах живлення.

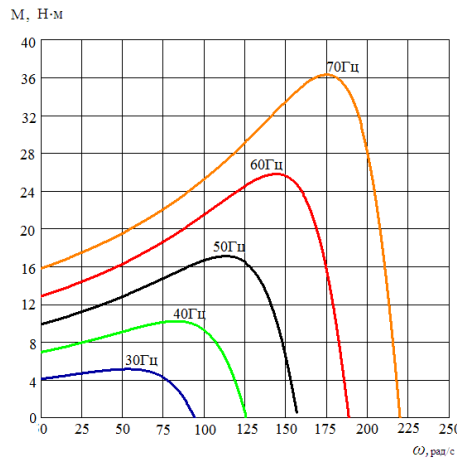


Рис. 9. Механічні характеристики електродвигуна 4А50В2У3 з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом керування $U_{\phi} / f^2 = const$

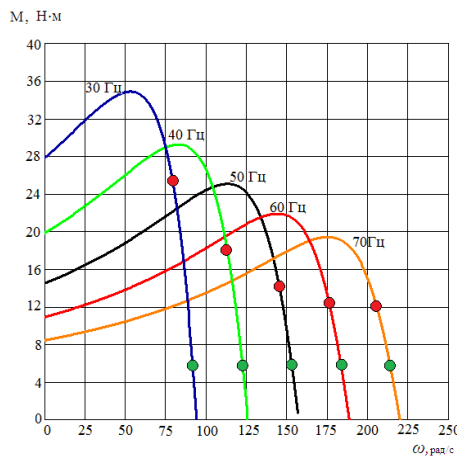


Рис. 10. Механічні характеристики електродвигуна 4А50В2У3 з синхронною частотою обертання 3000 об/хв при різних частотах живлення за законом керування $\sqrt{U_{\phi} / f} = const$

Програмований пристрій керування (блок мікроконтролера) повинен виконувати наступний алгоритм:

- запуск двигуна здійснювати при мінімальній частоті живлення (30 Гц); в цьому режимі пусковий момент двигуна максимальний, а швидкість невелика, що сприяє «м'якому» розгону ротора з маховиком (з таким приводом маховик можна навіть збільшити);
- після розгону привода до усталеної швидкості (рис. 8) частоту потрібно підвищити до номінальної (50 Гц); це середній режим роботи приводу;
- при завантаженні відходів полімеру в дробарку момент опору зростає і якщо він почне перевищувати максимальне значення для режиму роботи з номінальною швидкістю, то блок керування повинен зменшити частоту живлення. А якщо момент зменшується, то потрібно збільшувати частоту.

Потрібно зазначити те, що згідно даним про залежність сили різання від швидкості, момент опору при більших частотах обертання буде меншим. Це узгоджується з характеристиками на рис. 10.

Для представлення принципу керування на характеристиках (рис. 10) показані маркери небезпечного перевищення моменту при різних частотах (червоні крапки) і маркери, що визначають можливість переходу на більшу частоту обертання (зелені крапки). При збільшенні моменту до «червоного» рівня привод повинен переходити на меншу частоту обертання, а при досягненні «зеленого» рівня – на більшу. При досягненні «червоного» рівня на мінімальній частоті подається команда на аварійне зупинення електродвигуна і він знеструмується. Це забезпечить його надійний захист від «перекидання».

Ділянки між «червоними» і «зеленими» маркерами визначають робочі механічні характеристики приводу дробарки, на яких вона працює в нормальному режимі.

Висновки

Під час використання роторної дробарки для переробки полімерних відходів матеріалів легкої промисловості періодично виникають пікові зростання моменту опору, які у випадку частого повторення призводять до падіння кінетичної енергії махових мас ротора і зупинення електродвигуна внаслідок «перекидання» (перевищення критичного моменту).

Отримано вираз для розрахунку механічних характеристик асинхронних електродвигунів за їх паспортними даними, що дозволяє розраховувати режими роботи приводів дробарок при різних частотах живлення і різних законах управління.

Встановлено, що найбільш придатним законом керування частотою і фазною напругою асинхронного електродвигуна приводу роторної дробарки для переробки відходів полімерних матеріалів виробництв легкої промисловості є співвідношення $\sqrt{U_{\phi}}/f = const$.

Використання частотного керування електроприводом роторної дробарки для переробки відходів полімерних матеріалів виробництв легкої промисловості призведе до підвищення надійності його роботи.

Література

1. Состояние вопроса об отходах и современных способах их переработки : учеб. пособие / [Г. К. Лобачева, В. Ф. Желтобрюхов, И. И. Прокопов, А. П. Фоменко]. – Волгоград : ВолГУ, 2005. – 176 с.
2. Екологічний менеджмент : навчальний посібник / [В. Ф. Семенов, О. Л. Михайлюк, Т. П. Галушкіна та ін.] ; за ред. В. Ф. Семенова, О. Л. Михайлюк. – К. : Центр навчальної літератури, 2004. – 407 с.
3. Гринин А. С. Промышленные и бытовые отходы: хранение, утилизация, переработка / А. С. Гринин, В. Н. Новиков. – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 336 с.
4. Управління та поведження з відходами. Частина 4. Технології переробки твердих побутових відходів : навчальний посібник / [В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, В. А. Іщенко, Р. В. Петрук]. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 234 с.
5. Штриплинг Л. О. Основы очистки сточных вод и переработки твердых отходов : учеб. пособие / Л. О. Штриплинг, Ф. П. Туренко. – Омск : ОмГТУ, 2005. – 192 с.
6. Кривошеин Д. А. Основы экологической безопасности производств : учеб. пособие / Д. А. Кривошеин, В. П. Дмитренко, Н. В. Федотова. – СПб : Лань, 2015. – 336 с.
7. Відходи виробництва і споживання та їх вплив на ґрунти і природні води : навчальний посібник / [В. М. Савицький, В. К. Хільчевський, О. В. Чунар'єв, М. В. Яцюк]. – К. : Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2007. – 152 с.
8. Сметанин В. И. Защита окружающей среды от отходов производства и потребления / В. И. Сметанин. – М. : Колос, 2000. – 232 с.
9. Клинков А. С. Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов : учеб. пособие / А. С. Клинков, П. С. Беляев, М. В. Соколов. – Тамбов : ТГТУ, 2005. – 80 с.
10. Переробка відходів гуми та термопластичних матеріалів : монографія / [О. П. Бурмістенков, В. П. Місяць, І. В. Панасюк, Б. М. Злотенко]. – К. : Кафедра, 2012. – 240 с. – ISBN 978-966-2071-20-2.
11. Рубанка М. М. Відходи легкої промисловості, способи переробки і області подальшого

використання / М. М. Рубанка, В. П. Місяць // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2015. – № 4 (88). – С. 34–39.

12. Саленко Ю. С. Обладнання для подрібнення матеріалів: дробарки та млини : навч. посібник / Ю. С. Саленко. – Кременчук : КДПУ, 2008. – 100 с.

13. Борщев В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учебное пособие / В. Я. Борщев. – Тамбов : ТГТУ, 2004. – 75 с.

14. Рубанка М. М. Експериментальні дослідження динаміки роторної дробарки для переробки відходів легкої промисловості / М. М. Рубанка, В. П. Місяць // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія "Технічні науки". – 2016. – № 1 (94). – С. 27–35.

15. Белов М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов / М. П. Белов, А. Д. Новиков. – 3-е изд. доп. и перераб. – М. : Академия, 2007. – 576 с.

16. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / [А. Э. Кравчик, М. М. Делаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская]. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.

References

1. Lobacheva G.K., Zheltobryukhov V.F., Prokopov I.I., Fomenko A.P. The state of the question of waste and modern methods of processing. Volgograd: VolGU, 2005. 176 p.

2. Semenov V.F., Mikhailyuk O.L., Galushkina T.P. Ecological management; edited by V.F. Semenov, O.L. Mykhailyuk. K.: Center for Educational Literature, 2004. 407 p.

3. Grinin A.S., Novikov V.N. Industrial and household waste: Storage, utilization, processing. M.: FAIR-PRESS, 2002. 336 p.

4. Petruk V.G., Vasylykivsky I.V., Ishchenko V.A., Petruk R.V. Waste management and management. Part 4. Technologies of processing of solid household waste. Vinnytsia: VNTU, 2013. 234 p.

5. Shtripling L.O., Turenko F.P. Fundamentals of wastewater treatment and solid waste processing. Omsk, 2005. 192 p.

6. Krivoshein D.A., Dmitrenko V.P., Fedotova N.V. Fundamentals of environmental safety of production: textbook. Manual. StP, 2015. 336 p.

7. Savitsky V.M., Khilchevsky V.K., Chunaryov O.V., Yatsyuk M.V. Wastes of production and consumption and their impact on soils and natural waters. Kyiv: Publishing and Printing Center "Kyiv University", 2007. 152 p.

8. Smetanin V.I. Protection of the environment from production and consumption wastes. M.: Колос, 2000. 232 p.

9. Klinkov A.S., Belyaev P.S., Sokolov M.V. Utilization and secondary processing of polymeric materials: textbook. Tambov: TSTU, 2005. 80 p.

10. Burmistenkov O.P., Misiats V.P., Panasyuk I.V., Zlotenko B.M. Processing of rubber waste and thermoplastic materials. K.: Cathedra, 2012. 240 p. ISBN 978-966-2071-20-2.

11. Rubanka M.M., Misiats V.P. Waste of light industry, types of recycling and the follow-use. Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. 2015. № 4 (88). P. 34–39.

12. Salenko Y.S. Equipment for grinding materials: crushers and mills. Kremenchuk: KDPU, 2008. 100 p.

13. Borshchev V.Ya. Equipment for grinding materials: crushers and mills. Tambov: TSTU, 2004. 75 p.

14. Rubanka M.M., Misiats V.P. Experimental researches of rotor crusher dynamics are for recycling of light industry wastes. Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. "Technical Sciences" series. 2016. № 1 (94). P. 27–35.

15. Belov M.P., Novikov A.D. Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes. 3rd ed., Ext. and rework. M.: Academic, 2007. 576 p.

16. Kravchik A.E., Delaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. Series 4A Induction Motors: Handbook. M.: Energoizdat, 1982. 504 p.

Надійшла/Paper received : 21.02.2021 р. Надрукована/Printed : 02.06.2021 р.