

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
Факультет енергетики і комп'ютерних технологій

«На правах рукопису»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Електротехніки і електромеханіки

імені професора В.В. Овчарова

к.т.н., доц. _____ Сергій КВІТКА

“__14__” __ __ лютого __ 2025 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
здобувача другого (магістерського) ступеня вищої освіти

на тему: **“Удосконалення системи керування електроприводу
дробарки концентрованих кормів”**

21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти М2 курсу, 22 МБ ЕЕ групи
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Освітня програма: Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

_____ М. С. Дудкін
(підпис)

Керівник: к.т.н., доц. _____ С. О. Квітка
(підпис)

Консультант: к.т.н., доц. _____ М. В. Зоря
(підпис)

Консультант: к.е.н., доц. _____ С. Р. Плотніченко
(підпис)

Нормоконтролер: к.т.н., доц. _____ О. Ю. Вовк
(підпис)

Рецензент: _____ О. І. Коваленко
(підпис)

Запоріжжя, 2025 рік

№ рядка	Формат	Познака	Найменування	Кільк. аркушів	№ примірн.	Примітка
1	A4	21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Удосконалення системи			
2			керування електроприводу			
3			дробарки концентрованих			
4			кормів. Пояснювальна			
5			записка	75	—	
6	A1	21ЕМД.11260573.02.25.210000Э2	Дробарка концентрованих			
7			кормів. Схема електрична			
8			функційна	1	—	
9	A1	21ЕМД.11260573.02.25.310000Э1	Імітаційна модель			
10			електроприводу дробарки			
11			концентрованих кормів.			
12			Схема електрична структурна	1	—	
13	A1	21ЕМД.11260573.02.25.320000РР	Залежності графічні.			
14			Результати розрахунку.			
15			Розрахунок	1	—	
16	A1	21ЕМД.11260573.02.25.330000РР	Залежності графічні.			
17			Результати розрахунку.			
18			Розрахунок	1	—	
19	A1	21ЕМД.11260573.02.25.410000Э3	Дробарка концентрованих			
20			кормів. Система керування.			
21			Схема електрична принципова	1	—	
22	A1	21ЕМД.11260573.02.25.420000ТБ	Дробарка концентрованих			
23			кормів. Показники техніко-			
24			економічні. Таблиця	1	—	
25						
			21ЕМД.11260573.02.25.000000ТП			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата		
Розроб.	Дудкін			12.02.25	Літ.	Аркуш
Перев.	Квітка			14.02.25		Аркушів
Т. контр.					1	
Н. контр.	Вовк			13.02.25	1	
Затв.	Квітка			14.02.25	ТДАТУ, 2025	
					Відомість технічного проєкту	

РЕФЕРАТ

Дудкін М. С. Удосконалення системи керування електроприводу дробарки концентрованих кормів : кваліфікаційна робота. Запоріжжя : ТДАТУ, 2025. 75 с.

В роботі проведений аналіз конструкцій і особливостей електроприводу дробарок концентрованих кормів, способів покращення енергетичних і динамічних показників електроприводу дробарок.

Розглянуто технологію виробництва концентрованих кормів, вибране технологічне та електросилове обладнання. Розроблені схеми електрична функційна та електрична принципова керування електроприводом дробарки.

В роботі проведено теоретичне дослідження пускових динамічних процесів електроприводу дробарки концентрованих кормів, розглянуті динамічні показники та способи покращення динамічних показників електроприводу. Проведено моделювання енергетичних і динамічних показників електроприводу та моделювання процесу пуску електроприводу дробарки при обмеженні швидкості зростання прикладеної напруги з використанням програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0. За результатами моделювання були отримані наступні залежності: кутової швидкості, струму статора, електромагнітного моменту, температури електродвигуна від часу моделювання.

В роботі також вирішені питання охорони праці при експлуатації електрообладнання дробарки концентрованих кормів. Доцільність прийнятих рішень підтверджено техніко-економічними розрахунками.

Дипломна робота містить чотири розділи пояснювальної записки.

Ключові слова: КОНЦЕНТРОВАНІ КОРМИ, ДРОБАРКА, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, ЕЛЕКТРОПРИВОД.

Табл. 6

Іл. -

Бібл. 27

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркциш	№ докум	Підпис	Дата		5

ABSTRACT

Dudkin M. S. Improvement of the control system of the electric drive of the concentrated feed crusher : Qualification thesis. Zaporizhzhia : TDATU, 2025. 75 pages.

The thesis analyzes the structures and features of the electric drive of concentrated feed crushers, methods for improving the energy and dynamic indicators of the electric drive of crushers.

The technology of concentrated feed production is considered, technological and electric power equipment is selected. Electrical functional and electrical principle control schemes of the electric drive of the crusher are developed.

The thesis conducts a theoretical study of the starting dynamic processes of the electric drive of the concentrated feed crusher, considers dynamic indicators and methods for improving the dynamic indicators of the electric drive.

The modeling of the energy and dynamic indicators of the electric drive and the modeling of the process of starting the electric drive of the crusher with a limited rate of increase in the applied voltage using the Matlab 6.12 program and the Simulink 5.0 application program package were carried out. According to the modeling results, the following dependencies were obtained: angular velocity, stator current, electromagnetic torque, electric motor temperature on the modeling time.

The thesis also addresses issues of labor protection during the operation of electrical equipment of a concentrated feed crusher. The feasibility of the decisions made is confirmed by technical and economic calculations.

The thesis contains four sections of the explanatory note.

Keywords: CONCENTRATED FEED, CRUSHER, CONTROL SYSTEM, ELECTRIC DRIVE.

Tabl. 6

Fig. -

Bibl. 27

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арх
Зм	Аркш	№ докум	Підпис	Дата		6

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	12
1.1 Аналіз конструкцій і особливостей електроприводу дробарок концентрованих кормів	12
1.2 Аналіз способів покращення енергетичних і динамічних показників електроприводу дробарок концентрованих кормів	15
1.3 Висновки і постановка задач дослідження	19
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	22
2.1 Опис технологічного процесу подрібнення концентрованих кормів	22
2.2 Характеристика технологічного та силового електрообладнання	24
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДРОБАРКИ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ	26
3.1 Вибір методів дослідження	26
3.2 Методика теоретичного дослідження	26
3.3 Математичне моделювання динамічних та енергетичних показників електроприводу дробарки концентрованих кормів	29
3.3.1 Енергетичні і динамічні показники електроприводу дробарки концентрованих кормів	29
3.3.2 Моделювання приводного електродвигуна	33
3.3.3 Моделювання механічної характеристики робочої машини	39
3.3.4 Моделювання енергетичних і динамічних показників електроприводу	41
3.3.5 Моделювання процесу пуску приводного електродвигуна при обмеженні швидкості зростання прикладеної напруги	45
3.3.6 Аналіз одержаних результатів та висновки	49
3.4 Достовірність отриманих результатів	51

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДРОБАРКОЮ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ	52
4.1 Вимоги до системи керування дробаркою концентрованих кормів	52
4.2 Розробка функційної схеми автоматизації дробарки концентрованих кормів	53
4.3 Розробка схеми електричної принципової керування електроприводом дробарки концентрованих кормів	53
4.4 Аналіз надійності елементів системи керування	55
4.5 Специфікація матеріалів і обладнання	57
4.6 Охорона праці при експлуатації електрообладнання дробарки концентрованих кормів	59
4.7 Техніко-економічні розрахунки ефективності системи керування електроприводом дробарки концентрованих кормів	62
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73

ВСТУП

Електропривод – основний споживач електроенергії: близько 60 % виробленої електроенергії перетворюється в механічну роботу засобами електроприводу. Постійно зростають вимоги до якості технологічних операцій, гостро ставляться питання енергозбереження як при відповідному виконанні технологічного процесу, так і в окремих елементах електроприводу.

Наявність в сільському господарстві машин з важкими умовами пуску: значними моментами інерції, пусковими моментами і моментами зрушення, обумовлює використання низки заходів, щодо зменшення енерговитрат під час перехідних процесів: ступеневий пуск, використання передавальних пристроїв. Однак такі заходи не в повній мірі забезпечують вимоги до надійності роботи машин та обладнання і створюють передумови для завищення потужності приводних електродвигунів та обладнання електропостачання.

Найбільш поширеному в сільському господарстві електроприводу з асинхронними короткозамкненими двигунами притаманні мала керованість і низькі динамічні властивості. Мала керованість обумовлена не тільки неможливістю зміни швидкості в широкому діапазоні при постійній частоті струму мережі, але й важкістю реалізації режимів плавного пуску зокрема. Виникаючі при комутації кіл двигуна знакозмінні електромагнітні моменти суттєво погіршують перехідні режими.

Одним з можливих шляхів підвищення керованості і покращення динамічних якостей асинхронного електропривода є вплив на електромагнітні перехідні процеси. Поява і швидкий розвиток сучасних технічних засобів керування: силових напівпровідникових, приладів, елементів мікроелектроніки, обумовлює зменшення відсотка некерованих електроприводів.

Мета роботи: покращення динамічних показників електроприводу дробарки концентрованих кормів шляхом підвищення його керованості.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркциш	№ докум	Підпис	Дата		9

Задачі дослідження:

1. Дослідити динаміку процесу пуску електроприводу дробарки при використанні встановлених електродвигунів, які постачаються комплектно з робочою машиною.
2. Обґрунтувати можливість заміни приводного електродвигуна дробарки у відповідності до перевірного розрахунку його потужності для приводу робочої машини.
3. Провести моделювання процесу пуску електроприводу дробарки при обмеженні швидкості зростання прикладеної напруги.
4. Дослідити динаміку процесу пуску при заміні приводного електродвигуна дробарки та надати рекомендації щодо заміни некерованих електроприводів приладами на базі пристроїв плавного пуску.
5. Обґрунтувати та розробити систему керування електроприводу дробарки концентрованих кормів.

Об'єкт дослідження: пускові перехідні процеси в асинхронних електроприводах.

Предмет дослідження: закономірності протікання перехідних процесів в асинхронних електроприводах під час пуску.

Методи дослідження: при виконанні досліджень використовувались наступні методи: узагальненої теорії електричних машин і асинхронного електроприводу; математичного і комп'ютерного моделювання електричних машин і асинхронного електроприводу; аналітичні і чисельні методи розрахунку параметрів асинхронного електроприводу; диференціального і інтегрального числення. Дослідна частина виконана за допомогою комп'ютерного моделювання динамічних процесів в розробленій системі керованого асинхронного електроприводу в середовищі Matlab-Simulink.

Для запису диференціальних рівнянь асинхронної машини використовувався метод узагальнених векторів у просторі (суть метода полягає в тому, що сукупна дія всіх трьох фаз виражається одним узагальненим просторовим вектором,

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		10

зв'язаним з миттєвими значеннями відповідних фазних струмів, потокозчеплень і напруг).

Моделювання приводного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, моделювання робочих характеристик машини та моделювання обмеження швидкості зростання напруги проводилося за допомогою програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Використання отриманих закономірностей дало можливість вивчити динаміку процесу пуску асинхронного електроприводу дробарки концентрованих кормів при обмеженні швидкості зростання напруги.

2. Обґрунтований і визначений діапазон зміни постійної часу обмеження швидкості зростання напруги для асинхронного електроприводу дробарки концентрованих кормів.

3. Розроблені рекомендації щодо практичної реалізації керування пусковими перехідними процесами асинхронного електроприводу на основі пристроїв плавного пуску.

4. Запропоноване технічне рішення системи керування асинхронного електроприводу дробарки концентрованих кормів.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз конструкцій і особливостей електроприводу дробарок концентрованих кормів

У сучасному тваринництві та птахівництві подрібнення кормів є критично важливим етапом технологічного процесу їх виготовлення. Для забезпечення високої ефективності цього процесу широко застосовуються дробарки, оснащені електричними приводами [1-3].

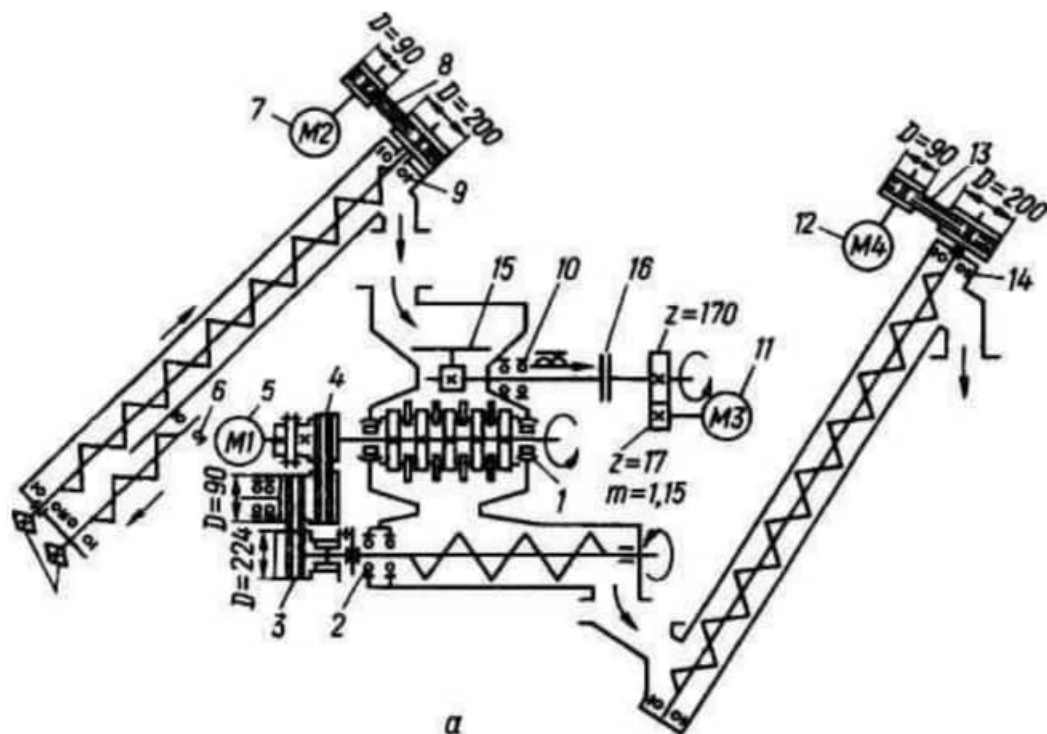
Електропривід подрібнювачів кормів має ряд суттєвих особливостей, які слід враховувати при його проектуванні та експлуатації:

- 1) значні споживані потужності;
- 2) випадковий характер навантаження, широкі межі коливання споживаної потужності, викликані неоднорідністю оброблюваного продукту та ручним завантаженням;
- 3) необхідність безперервного або періодичного контролю струму навантаження двигуна. Це дає можливість зменшити перевантаження і недовантаження, завдяки чому знижується питома витрата електроенергії. З метою контролю струму в електроприводах подрібнювачів передбачають індикатори навантаження — спеціальні перевантажувальні амперметри з нерівномірною шкалою, проградуєваною в процентах від номінального струму;
- 4) великі моменти інерції робочих органів привідних машин і, як наслідок, великі коефіцієнти інерції системи. Цим спричиняється значний час пуску електроприводу і виникає загроза перегрівання двигуна;
- 5) порівняно малий момент зрушення робочих органів подрібнювачів кормів ($M_C < 0,2M_{C\text{ном}}$);
- 6) неможливість пуску з заповненою робочою камерою. Тому алгоритмом керування повинно бути передбачено спорожнення робочої камери перед зупинкою машини, а також встановлення засувки на шляху перероблюваного продукту.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		12

Робочі органи подрібнювачів кормів мають досить значний момент інерції, внаслідок чого тривалість пуску машини досягає кількох десятків секунд. Для покращення умов пуску робочі органи комплектують електродвигунами з підвищеним пусковим моментом.

Кінематична схема дробарки ДБ-5 приведена на рисунку 1.



1, 2, 6, 9, 10, 14 – підшипники; 3, 4, 8, 13 – паси клинові; 5, 7, 12 – електродвигуни;
11 – мотор редуктор; 15 – засувка; 16 – муфта електромагнітна

Рисунок 1 – Кінематична схема дробарки ДБ-5

Потужність, споживана подрібнювачем кормів, дорівнює [1]

$$P_{\text{маш}} = P_1 + P_2 + P_{\text{хх}}, \quad (1.1)$$

де P_1 – потужність, яка витрачається на подрібнення матеріалу;

P_2 – потужність приводу механізму подачі;

$P_{\text{хх}}$ – потужність холостого ходу машини.

Потужність подрібнення P_1 знаходять за виразом [1]

$$P_1 = Q \cdot A_{\text{под}}, \quad (1.2)$$

де Q – продуктивність машини, кг/с;

$A_{\text{под}}$ – робота, яка витрачається на подрібнення матеріалу.

Робота $A_{\text{под}}$ визначається з основного закону подрібнення [1]

$$A_{\text{под}} = C_{\text{пр}}[C_v \lg \lambda^3 + C_s (\lambda - 1)], \quad (1.3)$$

де $C_{\text{пр}}$ – дослідний коефіцієнт, що враховує вплив способу подрібнення, змінні характеристики матеріалу, конструктивні особливості машини;

C_s – коефіцієнт, що характеризує роботу, затрачувану на створення нових поверхонь при подрібненні 1 кг матеріалу, кДж/кг;

C_v – коефіцієнт, що характеризує роботу пружних деформацій матеріалу при вибраному методі механічного навантаження, кДж/кг;

λ – ступінь подрібнення матеріалу.

$$A_{\text{под}} = 1,32[8,5 \cdot \lg 1,4^3 + 7,5(1,4 - 1)] = 8,88 \text{ кДж/кг.}$$

Тоді, потужність подрібнення дорівнює

$$P_1 = 1,39 \cdot 8,88 = 12,34 \text{ кВт.}$$

Потужність холостого ходу визначають із рівняння [1]

$$P_{\text{хх}} = M_{\text{с.хх}} \cdot \omega_{\text{ном}}, \quad (1.4)$$

де $M_{\text{с.хх}}$ – момент холостого ходу, Н·м;

$\omega_{\text{ном}}$ – номінальна швидкість обертання, рад/с.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		14

Потужність холостого ходу дорівнює

$$P_{xx} = 17 \cdot 314 = 5,3 \text{ кВт.}$$

Потужність, яка споживається подрібнювачем корму дорівнює

$$P_{\text{маш}} = 12,34 + 1,5 + 5,3 = 19,14 \text{ кВт.}$$

Наведені розрахунки потужності для приводу подрібнювачів кормів дозволяють зробити висновок про необхідність заміни приводних двигунів двигунами меншої потужності, однак при проведенні таких заміन слід враховувати динамічні показники навантаження, особливо під час перехідних процесів.

1.2 Аналіз способів покращення енергетичних і динамічних показників електроприводу дробарок концентрованих кормів

Способи покращення енергетичних і динамічних показників електроприводу можна поділити за кількома напрямками: вдосконалення процедур вибору потужності приводних двигунів для конкретних машин; збільшення економічності масового нерегульованого електроприводу – перехід на енергозберігаючі двигуни з меншими втратами; створення спеціальних додаткових технічних засобів, які забезпечують мінімізацію шкідливого впливу на енергетичні показники відхилення навантаження від номінальної; перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого [4, 9].

Для визначення економії енергії при збільшенні навантаження робочих машин вводять термін питомої витрати енергії на даній робочій машині. Ці витрати дорівнюють кількості енергії, споживаної електродвигуном з мережі E_m , віднесеної до кожної кіловат-години корисної роботи при даному технологічному режимі [3]

$$E_n = P_m \cdot T_m, \quad (1.5)$$

де P_m – потужність, споживана робочим органом машини, кВт;

T_m – машинний час або час корисної роботи, год.

Питомі витрати енергії [3]

$$\Delta E = \frac{1}{\eta_{м.н} \kappa_n} \left(\kappa_n + \frac{\alpha(1 - \eta_{м.н})}{\kappa_m} \right), \quad (1.6)$$

де $\eta_{м.н}$ – ККД робочої машини при повному навантаженні;

κ_n – коефіцієнт навантаження;

κ_m – коефіцієнт використання робочої машини;

α – коефіцієнт, який залежить від типу та конструкції робочої машини.

При відсутності холостого ходу ($\kappa_m = 1$) питомі витрати енергії

$$\Delta E' = \frac{\kappa_n + \alpha(1 - \eta_{м.н})}{\eta_{м.н} \kappa_n}.$$

При максимальному використанні робочої машини, тобто при відсутності холостого ходу ($\kappa_m = 1$) і повному навантаженні машини ($\kappa_n = 1$), питомі витрати енергії будуть мінімальними

$$\Delta E_0 = \frac{1 + \alpha(1 - \eta_{м.н})}{\eta_{м.н}}.$$

Відношення $\beta = \Delta E / \Delta E_0$ визначає коефіцієнт збільшення питомих витрат енергії в залежності від навантаження і тривалості роботи в режимі холостого ходу [3]

$$\beta = \frac{\kappa_n \kappa_m + \alpha(1 - \eta_{m,n})}{[1 + \alpha(1 - \eta_{m,n})\kappa_n \kappa_m]} \quad (1.7)$$

Використання обмежувачів холостого ходу на обладнанні, які мають між операційний час 10 с і більше, завжди призводить до економії електроенергії. У випадках, коли між операційний час менше 10 с, питання про доцільність обмежувачів холостого ходу потрібно вирішувати шляхом контрольного розрахунку.

Якщо середнє навантаження електродвигуна складає менше 45 % номінальної потужності, то заміна його менш потужним електродвигуном завжди доцільна і перевірки розрахунками не потребує. При навантаженні електродвигуна більше 70 % номінальної потужності можна вважати, що його заміна недоцільна.

При навантаженні електродвигуна в межах 45...70 % номінальної потужності доцільність їх заміни повинна бути підтверджена зменшенням сумарних витрат активної потужності в електричній системі і в електродвигуні. Ці сумарні витрати активної потужності можуть бути визначені з рівняння

$$\Delta P_{\text{сум}} = [Q_{x,x}(1 - \kappa_n^2) + \kappa_n^2 Q_n] K_e + \Delta P_{x,x} + \kappa_n^2 \Delta P_{a,n}, \quad (1.8)$$

де $Q_{x,x}$ – реактивна потужність, споживана електродвигуном з мережі при холостому ході, кВар;

κ_n – коефіцієнт навантаження електродвигуна;

Q_n – реактивна потужність електродвигуна при номінальному навантаженні, кВар;

K_e – коефіцієнт підвищення витрат;

$\Delta P_{x,x}$ – витрати активної потужності при холостому ході електродвигуна, кВт;

$\Delta P_{a,n}$ – приріст витрат активної потужності в електродвигуні при навантаженні 100 %, кВт.

Заміна незавантажених електродвигунів, навіть якщо вона підтверджена розрахунком, може виконуватися тільки після ретельної перевірки можливості їх повного завантаження за рахунок правильного використання робочих машин. Цей захід виправдано у тих випадках, коли двигун вибрано невірно і перевищує за потужністю в порівнянні з робочою машиною. Встановлення двигуна меншої потужності ніби узаконює недостатнє використання робочої машини і в майбутньому може стати перешкодою для повного використання її при відповідному удосконаленні технологічного процесу.

Найбільш ефективним засобом зниження витрат є реалізація керованих перехідних процесів. Для сільськогосподарських машин, для яких час перехідних процесів складає велике значення, керування перехідними процесами під час пуску набуває особливого значення. У зв'язку з обмеженою кількістю пусків, більшість такого обладнання досить тривалий час працює в недозавантаженому режимі. Крім того, реалізація режимів пуску пов'язана з незадовільною динамікою пуску двигунів – різкими і значними коливаннями моменту та швидкості в початковий момент процесу, що може призвести до пошкоджень робочих органів, передавальних пристроїв.

При проведенні аналізу особливостей електроприводу сільськогосподарських машин, для яких час перехідних процесів складає велике значення, можна зробити наступні висновки:

- дані сільськогосподарські машини характеризуються значними моментами інерції та пусковими моментами, що передбачає використання спеціальних пристроїв або заходів для здійснення пуску з метою зменшення витрат під час перехідних процесів;
- всі машини обладнані некерованим електроприводом із завищенням потужності встановлених електродвигунів в середньому на 25...40 %, що задовольняє проведення перехідних процесів під час пуску, але негативно впливає на енергетичні показники під час тривалої роботи;
- значні коливання динамічного моменту під час пуску призводять до ушкоджень передавальних пристроїв (муфт, редукторів) та робочих органів, що

пов'язане з неузгодженою динамікою пуску приводних електродвигунів та робочих машин;

– значні моменти інерції та пускові моменти призводять до значних витрат енергії під час перехідних процесів, що впливає на вимоги до обладнання живлення – потужність силових трансформаторів, перетин проводів живлячих ліній.

1.3 Висновки і постановка задач дослідження

Висновки:

1. Результати розрахунку потужності електродвигуна для приводу дробарки концентрованих кормів дозволяють зробити висновок про необхідність заміни приводних електродвигунів двигунами меншої потужності, однак при проведенні таких замін слід враховувати динамічні показники навантаження, особливо під час перехідних процесів.

2. При проведенні аналізу особливостей електроприводу дробарок концентрованих кормів, для яких час перехідних процесів складає велике значення, можна зробити наступні висновки:

– дані сільськогосподарські машини характеризуються значними моментами інерції та пусковими моментами, що передбачає використання спеціальних пристроїв або заходів для здійснення пуску з метою зменшення витрат під час перехідних процесів;

– всі машини обладнані некерованим електроприводом із завищенням потужності встановлених електродвигунів в середньому на 25...40 %, що задовольняє проведення перехідних процесів під час пуску, але негативно впливає на енергетичні показники під час тривалої роботи;

– значні коливання динамічного моменту під час пуску призводять до ушкоджень передавальних пристроїв (муфт, редукторів) та робочих органів, що пов'язане з неузгодженою динамікою пуску приводних електродвигунів та робочих машин;

– значні моменти інерції та пускові моменти призводять до значних витрат енергії під час перехідних процесів, що впливає на вимоги до обладнання живлення – потужність силових трансформаторів, перетин проводів живлячих ліній.

3. Способи покращення енергетичних і динамічних показників електроприводів можна поділити за кількома напрямками: вдосконалення процедур вибору потужності приводних двигунів для конкретних машин; збільшення економічності масового нерегульованого електроприводу – перехід на енергозберігаючі двигуни з меншими втратами; створення спеціальних додаткових технічних засобів, які забезпечують мінімізацію шкідливого впливу на енергетичні показники відхилення навантаження від номінальної; перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого.

На підставі цього сформульована мета та задачі дослідження.

Мета роботи: покращення динамічних показників електроприводу дробарки концентрованих кормів шляхом підвищення його керованості.

Задачі дослідження:

1. Дослідити динаміку процесу пуску електроприводу дробарки при використанні встановлених електродвигунів, які постачаються комплектно з робочою машиною.

2. Обґрунтувати можливість заміни приводного електродвигуна дробарки у відповідності до перевірного розрахунку його потужності для приводу робочої машини.

3. Провести моделювання процесу пуску електроприводу дробарки при обмеженні швидкості зростання прикладеної напруги.

4. Дослідити динаміку процесу пуску при заміні приводного електродвигуна дробарки та надати рекомендації щодо заміни некерованих електроприводів приладами на базі пристроїв плавного пуску.

5. Обґрунтувати та розробити систему керування електроприводу дробарки концентрованих кормів.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		20

Об'єкт дослідження: пускові перехідні процеси в асинхронних електроприводах.

Предмет дослідження: закономірності протікання перехідних процесів в асинхронних електроприводах під час пуску.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		21

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис технологічного процесу подрібнення концентрованих кормів

До концентрованих кормів відносяться корми з невеликим вмістом води (8-12 %) і клітковини (3-10 %), високої загальної поживності (0,7-1,35 кормових одиниць в 1 кг). Це зерно злакових, бобових і олійних культур і продукти їх переробки (дерть, висівки, макуха, комбікорми). Злакові зернові корми (пшениця, овес, ячмінь, сорго, кукурудза) містять недостатню кількість перетравного протеїну (55-80 г на 1 кормову одиницю). Основна маса їх сухої речовини представлена у вигляді крохмалю. Зернобобові (горох, соя, боби, люпин) і олійні (соняшник) культури містять значну кількість перетравного протеїну (160-330 г на 1 кормову одиницю), але невелику кількість вуглеводів. Тому в годуванні сільськогосподарських тварин, як правило, використовують суміші різних видів зерна і інших компонентів (комбікорм). У зерні кукурудзи, вівса, сої міститься також значна кількість жиру.

Зернові корми містять вітаміни Е і групи В, але у них (окрім жовтого зерна кукурудзи) відсутній каротин.

Дробарка ДБ-5 призначена для подрібнення фуражного зерна вологістю до 17 %. До технологічного процесу подрібнення зерна дробаркою ДБ-5 входять наступні операції: завантаження зернового бункера; подача зерна на подрібнення; подрібнення зерна; подача подрібненого матеріалу з дробильної камери в розподільчу; розподілення подрібненого матеріалу на фракції; подача готової фракції на вивантаження; повернення недоподрібненої фракції в дробильну камеру; вивантаження готового продукту та викидання зайвого повітря через фільтруючий пристрій [1, 2].

Безрешітна дробарка ДБ-5 складається із бункера, корпусу, ротора і камери розподілу. Дробарка комплектується двома шнеками – завантажувальним і вивантажувальним. Для відділення із подрібненого матеріалу великої фракції всередині

розподільчої камери є два канали: для повернення крупної фракції в дробарку і для рециркуляції повітря.

Зерно, яке підлягає подрібненню, подається з бурта завантажувальним шнеком 10 у зерновий бункер 9. Рівень зерна у бункері контролюється двома магнітокерованими датчиками. З бункера через щілину, створену засувкою 11 і похилою нижньою стінкою, зерно проходить через магнітний сепаратор 12, очищується від випадкових металевих предметів і потрапляє в подрібнювальну камеру 1, де подрібнюється молотковим ротором 2 і декою 13. Подрібнена маса повітряним потоком, створюваним ротором, по кормопроводу 5 транспортується до сепаратора 7 розподільчої камери 8. Дрібна фракція шнеками 3 і 4 вивантажується з дробарки. Крупна фракція спрямовується на повторне подрібнення у дробильну камеру. Ступінь помелу регулюється поворотом засувки 6 і зміною сепаратора 7.

При першому положенні заслінки 6 (дрібний помел) канал для повернення крупної фракції в дробарку повністю відкритий і крупні частинки надходять на доподрібнення, а дрібні – в вивантажувальний шнек. При цьому забезпечується самий дрібний помел.

При переміщенні заслінки по ходу стрілки (крупний помел), щілина каналу повернення зменшується, що забезпечує більш інтенсивний винос продукту в зону вивантажувального шнека. В крайньому положенні заслінка повністю перекриває канал і продукт надходить на вивантаження без сепарування.

Навантаження двигуна М2 дробарки регулюється поворотом засувки 11 вручну або електродвигуном М4. Привод засувки складається з електродвигуна, зубчастої передачі, вала і електромагнітної муфти УА, яка з'єднує вал з електродвигуном. При вимиканні електромагнітної муфти вал засувки роз'єднується з валом електродвигуна і під дією власної ваги засувка швидко перекриває доступ зерна в дробильну камеру.

Схема технологічного процесу подрібнення концентрованих кормів наведена на аркуші 21ЕМД.11260573.02.25.210000Э2 графічної частини роботи.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		23

2.2 Характеристика технологічного та силового електрообладнання

У технологічному процесі подрібнення зерна використовується стандартне технологічне обладнання.

Таблиця 1 – Технічна характеристика дробарки ДБ-5 [1, 2]

Параметри	Значення параметру
Тип	Стаціонарна
Продуктивність за годину роботи, т при подрібненні зерна	4...6
Маса, кг	990
Встановлена потужність, кВт	32,2
Питома енергомісткість, кВт · год/т, на зерні	5,4...8
Габаритні розміри, мм	
довжина	8450
ширина	2600
висота	3720

Потужність та виконання електродвигунів приводу технологічного обладнання визначені та наведені в паспорті електродвигунів. Але необхідно враховувати особливості прийнятої технології виробництва та реальні умови експлуатації, оскільки вони відрізняються від нормальних умов роботи, які визначені в технічному паспорті обладнання. Тому то при виборі силового обладнання були враховані реальні умови навколишнього середовища, а саме, кліматичне виконання, категорія розміщення, ступінь захисту та спосіб охолодження.

Враховуючи те, що у кормоцеху приміщення для приготування концентратів за умовами навколишнього середовища відноситься до групи запилених, то вибираємо електродвигуни з кліматичним виконанням та категорією розміщення УПУЗ (пилозахищеного виконання), за ступенем захисту – IP54 [2].

Згідно з прийнятою технологією подрібнення зерна обираємо силове електрообладнання. Основне силове електрообладнання дробарки концентрованих кормів ДБ-5 складається з приводних електродвигунів, технічна характеристика яких наведена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічна характеристика силового електрообладнання [2, 22]

Тип технологічн. обладнання	Тип електродвигуна	P_n , кВт	n_n , об/хв	η_n , %	$\cos\varphi_n$	μ_n	$\mu_{\min}$	$\mu_{\max}$	K_i	Поз. позн.
ДБ-5	АИР180М2УПУЗ	30	2925	91,5	0,9	2,2	1,9	3,0	7,5	М2
	АИР80В6УПУЗ	1,1	920	74	0,74	2,0	1,6	2,2	4,5	М1,М3
	РД-0,9	0,01	2,5	-	-	-	-	-	-	М4

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДРОБАРКИ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ

3.1 Вибір методів дослідження

При виконанні досліджень використовувались наступні методи: узагальненої теорії електричних машин і асинхронного електроприводу; математичного і комп'ютерного моделювання електричних машин і асинхронного електроприводу; аналітичні і чисельні методи розрахунку параметрів асинхронного електроприводу; диференціального і інтегрального числення. Дослідна частина виконана за допомогою комп'ютерного моделювання динамічних процесів в розробленій системі керованого асинхронного електроприводу в середовищі Matlab-Simulink.

Для запису диференціальних рівнянь асинхронної машини використовувався метод узагальнених векторів у просторі (суть метода полягає в тому, що сукупна дія всіх трьох фаз виражається одним узагальненим просторовим вектором, зв'язаним з миттєвими значеннями відповідних фазних струмів, потокозчеплень і напруг).

Моделювання приводного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, моделювання робочих характеристик машини та моделювання обмеження швидкості зростання напруги проводилося за допомогою програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0.

3.2 Методика теоретичного дослідження

Моделювання приводного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором пропонується провести за допомогою програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0 з використанням бібліотеки електричних машин Machines та моделі асинхронного електродвигуна Asynchronous Machine SI Units, для отримання вимірюваних змінних стану машини використовується універсаль-

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		26

ний блок вимірювань Measurment demultiplexer з тієї ж бібліотеки прикладних програм [7, 8].

Моделювання робочих характеристик машини пропонується провести за допомогою програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0 з використанням бібліотеки Functions & Table з моделюванням навантаження робочих машин за допомогою універсального обчислювального блоку Fcn, який дозволяє провести будь-яке обчислення, аргументом якого є вхідний сигнал, в даному випадку – це швидкість приводного електродвигуна [7, 8].

Моделювання обмеження швидкості зростання напруги також проводитиметься з використанням програми Matlab 6.12 пакету прикладних програм Simulink 5.0 [7, 8].

На основі теоретичних засад моделювання складових електроприводу сільськогосподарських машин з важкими умовами пуску було створено загальну структурну схему моделювання енергетичних і динамічних показників з використанням програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0. Структурна схема моделювання енергетичних і динамічних показників при проведенні заміни приводного електродвигуна дробарки ДБ-5 приведена на аркуші графічної частини роботи 21ЕМД.11260573.02.25.310000Э1, схема №1.

Структурна схема має наступні складові блоки: блок моделювання джерела живлення, блок моделювання приводного асинхронного електродвигуна, блок вимірювань, блок моделювання витрат енергії при пуску на виконання технологічного процесу, блок моделювання електричних втрат в приводному асинхронному електродвигуні, блок моделювання процесу нагріву.

При проведенні моделювання навантаження приводного електродвигуна враховувалися технічні і розрахункові показники, які наведені в таблиці 3.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		27

Таблиця 3 – Технічні та розрахункові дані дробарки ДБ-5

Показники	Значення
Продуктивність, т/год	5...8
Тип встановленого електродвигуна	АИР180М2УПУЗ
Потужність встановленого електродвигуна, кВт	30
Момент зрушення, Н·м	4
Момент опору, Н·м	17
Момент інерції системи ЕД-РМ, кг·м ²	2,49
Маса машини, кг	990
Габаритні розміри, мм	8450×2600×3720
Розрахункова потужність приводу машини, кВт	19,14
Рекомендований тип електродвигуна при проведені заміни	АИР180S2УПУЗ
Потужність електродвигуна, кВт	22

Моделювання енергетичних і динамічних показників проводилося для двох електродвигунів: встановленого АИР180М2УПУЗ потужністю 30 кВт і рекомендованого АИР180S2УПУЗ потужністю 22 кВт, з урахуванням параметрів схеми заміщення.

За допомогою імітаційної моделі електроприводу проведені дослідження:

- кутової швидкості від часу моделювання;
- струму статора при пуску від часу моделювання;
- моменту на валу електродвигуна від часу моделювання;
- температури електродвигуна від часу моделювання;
- витрат енергії на здійснення технологічного процесу від часу моделювання;
- електричних втрат у приводному електродвигуні від часу моделювання.

При проведенні досліджень енергетичних і динамічних показників приводного електродвигуна дробарки концентрованих кормів вибраний час моделювання в інтервалі від 0 до 15 с [6-8].

Моделювання обмеження швидкості зростання напруги проводилося з використанням програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0. Блок живлення приводного електродвигуна з реалізацією обмеження зростання напруги живлення функціонально складається з двох блоків: блоку керування, в якому формується сигнал керування та блоку керованого джерела живлення. Структурна схема моделі наведена на аркуші графічної частини роботи 21ЕМД.11260573.02.25.310000Э1, схема №2.

За допомогою імітаційної моделі електроприводу при обмеженні швидкості зростання напруги проведені дослідження:

- кутової швидкості від часу моделювання;
- струму статора при пуску від часу моделювання;
- моменту на валу електродвигуна від часу моделювання;
- температури електродвигуна від часу моделювання.

При проведенні моделювання динамічних показників приводного електродвигуна дробарки ДБ-5 при керуванні з обмеженням швидкості зростання напруги вибраний час моделювання в інтервалі від 0 до 15 с при постійній швидкості зростання напруги, яка змінюється в діапазоні 0,1...1,0 с.

3.3 Математичне моделювання динамічних та енергетичних показників електроприводу дробарки концентрованих кормів

3.3.1 Енергетичні і динамічні показники електроприводу дробарки концентрованих кормів

Для електродвигунів втрати є складною функцією електричних, магнітних та механічних навантажень, причому кожна з них нелінійно пов'язана з втратами у відповідних елементах електродвигуна.

В той же час при цілеспрямованому впливі на електродвигун є можливість зміни в визначених межах його сумарних втрат, не змінюючи режим роботи на валу, який характеризується моментом і кутовою швидкістю. Очевидно, що най-

більш ефективним з енергетичної точки зору є режим роботи двигуна, який характеризується найменшими втратами.

Потенційні можливості для зменшення втрат в електричних машинах можна виявити, аналізуючи зміни складових втрат в залежності від режиму роботи електроприводу.

В загальному випадку потужність втрат енергії в електродвигунах зручно представляти сумою втрат ΔP_c , які не залежать від навантаження (постійні втрати), і втрат ΔP_v , які визначаються навантаженням двигунів (змінні втрати) [4]

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v. \quad (3.1)$$

Постійні втрати потужності включають в себе втрати в сталі $\Delta P_{ст.}$, механічні ΔP_m .

Втрати в сталі залежать від амплітуди і частоти зміни потоку [4]

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст.н} (f / f_n)^{\beta} (\Phi / \Phi_n)^2, \quad (3.2)$$

де $\beta = 1,2 \dots 1,5$ – показник, який залежить від марки електротехнічної сталі.

Механічні втрати визначаються кутовою швидкістю двигунів [4]

$$\Delta P_m = \Delta P_{м.н} (\omega / \omega_n)^n. \quad (3.3)$$

В асинхронних двигунах немає спеціальної обмотки збудження, яка призначена для створення магнітного потоку. Потік асинхронного двигуна створюється реактивною складовою I_0 струму статора, яка називається струмом намагнічування. Тому для асинхронних двигунів втрати від струму намагнічування [4]

$$\Delta P_{\Sigma} = I_0^2 r_1, \quad (3.4)$$

де r_l – активний опір обмотки статора.

Змінні втрати ΔP_v визначаються втратами в міді, які пропорційні квадрату струму навантаження і опору обмоток.

Для асинхронних двигунів змінні втрати складаються з втрат в обмотках статора і ротора за вирахуванням втрат від струму намагнічування. При роботі в зоні малих ковзань (не більше номінального значення) з векторної діаграми струмів асинхронного двигуна слідує, що

$$I_1^2 \approx I_2'^2 + I_0^2, \quad (3.5)$$

де I_l – струм статора асинхронного двигуна;

I_2' – приведений до статора струм ротора асинхронного двигуна.

Тому для асинхронних двигунів [4]

$$\Delta P_v = 3I_2'^2(r_1 + r_2'), \quad (3.6)$$

де r_2' – приведений до статора опір фази ротора.

Перехід електроприводу від одного усталеного статичного або динамічного режиму до іншого супроводжується перехідним процесом. Оцінка витрат енергії за час перехідного процесу у загальному випадку може бути визначена [4]

$$\Delta W_{п.п} = \int_0^t \Delta P_{\Sigma} dt. \quad (3.7)$$

Для аналізу витрат енергії в перехідному процесі використовуємо вираз для потужності змінних витрат у вигляді [4]

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= M(\omega_0 - \omega), \\ \Delta P_{\Sigma} &= M\omega_0 s. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Для виділення витрат, обумовлених перехідним процесом, враховується, що момент статичного опору $M_{оп} = 0$. При цьому, електромагнітний момент з урахуванням основного рівняння руху електроприводу можна записати у вигляді [4]

$$M = J_{\Sigma} d\omega / dt. \quad (3.9)$$

Підставляючи (3.9) в (3.7) з урахуванням (3.8) отримаємо

$$\Delta W_{п.п} = \int_0^t (J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega_0 - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega) dt. \quad (3.10)$$

Після проведення інтегрування та проведення заміни кутових швидкостей на відповідні показники ковзання, витрати енергії можна виразити наступним чином

$$\Delta W_{п.п} = J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} (s_{поч}^2 - s_{кин}^2). \quad (3.11)$$

Однак, навіть при пуску на холостому ході, на валу приводного електродвигуна присутній момент опору $M_{оп} \neq 0$, тому витрати енергії визначаються при врахуванні моменту опору

$$\begin{aligned} M &= J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} + M_{оп}, \\ \Delta W_{п.п} &= \int_0^t (J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega_0 - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega) dt + \int_0^t M (\omega_0 - \omega) dt, \\ \Delta W_{п.п} &= J_{\Sigma} \frac{\omega_0^2}{2} \frac{M}{M - M_{оп}}. \end{aligned} \quad (3.12)$$

В найбільш поширених видах електроприводів – некерованих – при проходженні перехідних процесів, коли кутова швидкість встановлюється стрибком, втрати енергії, а відповідно, і витрати енергії за час перехідного процесу пропорційні сумарному моменту інерції електроприводу, квадрату швидкості ідеального холостого ходу, діапазону змінення ковзання і залежать від навантаження.

3.3.2 Моделювання приводного електродвигуна

Основою математичного опису моделі асинхронного електроприводу, як і будь якого електромеханічного перетворювача енергії, є диференційні рівняння електричної та механічної рівноваги системи, а також рівняння перетворення електромагнітної енергії в механічну. Але точний опис реальної асинхронної машини, який представляє сукупність складних трьохмірних електричних і магнітних ланцюгів з різною магнітною проникністю, з допомогою рівняння Максвела здається практично неможливим. Тому при дослідженнях користуються спрощеними уявами про фізичні процеси в машині, приблизно враховуючи, а в деяких випадках і зовсім не розглядаючи вплив змінного насичення магнітного ланцюга, ефекту витіснення струму, втрат в сталі, полігармонійного складу струмів і інших факторів. Рівняння, які записані з такими спрощеними припущеннями, є лише приблизною математичною моделлю реальної машини, але в багатьох випадках вони описують явища в машині і її поведінку з майже достатньою для практичних цілей точністю, якщо тільки вірно визначені основні параметри машини. В залежності від особливостей аналізованих явищ ступінь приближення може бути різною. Тому припущення, що використовуються, повинні бути чітко оговорені, а їх прийнятність обґрунтована або доведена експериментально.

Для запису диференційних рівнянь асинхронної машини найбільш зручно використовувати отриманий розповсюдження метод узагальнених векторів у просторі. Суть метода полягає, як відомо, в тому, що сукупна дія всіх трьох фаз виражається одним узагальненим просторовим вектором, зв'язаним з миттєвими значеннями відповідних фазних струмів, потокозчеплень і напруг виразами [5, 6]

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		33

$$\bar{i} = \frac{2}{3}(i_A + a i_B + a^2 i_C); \quad (3.13)$$

$$\bar{\Psi} = \frac{2}{3}(\Psi_A + a \Psi_B + a^2 \Psi_C); \quad (3.14)$$

$$\bar{u} = \frac{2}{3}(u_A + a u_B + a^2 u_C), \quad (3.15)$$

В яких

$$a = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad (3.16)$$

оператор повороту.

В узагальнених векторах і системі координат, які обертаються з деякою кутовою швидкістю, диференціальні рівняння асинхронного електроприводу в найбільш загальній формі мають вигляд [5, 6]

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= \bar{i}_s r_s + [D + j\omega_k] \bar{\Psi}_s; \\ \bar{u}_r &= \bar{i}_r r_r + [D + j(\omega_k - \omega_r)] \bar{\Psi}_r \\ M &= \frac{3}{2} \text{Im}[\bar{\Psi}_s^* \bar{i}_s] \\ JD\omega_r &= M \mp M_{\text{НГ}}. \end{aligned} \right\}, \quad (3.17)$$

де $\bar{i}, \bar{\Psi}, \bar{u}$ – миттєві значення узагальнених просторових векторів струмів, потокозчеплень і напруг, відповідним миттєвим значенням відповідних величин;

r_s (r_r) – активний опір фази статора (ротора);

ω_r – кутова швидкість ротора машини;

D – оператор диференціювання.

Математична модель асинхронної машини описується першими трьома рівняннями (3.17), які відображають умови електричної рівноваги і перетворення енергії. Ці рівняння справедливі, як і метод узагальнених векторів взагалі, при умові синусоїдального розподілу в просторі МРС і магнітних індукцій.

Четверте рівняння (3.17) відображає умову механічної рівноваги динамічної системи. Воно справедливе при наступних умовах: постійності приведенного до швидкості ротора двигуна сумарного моменту інерції системи; абсолютній жорсткості обертаючого валу між точками прикладення моментів двигуна та навантаження; рівності електричного і геометричного кутів повороту ротора, що має місце тільки у дво полюсній машині. Тому для машин з довільним числом пар полюсів p в ліву частину цього рівняння вводиться множник $1/p$. Приймається також, що всі сили опору руху, в тому числі й сили тертя в самому двигуні, враховуються разом з навантаженням і в установленому режимі електромагнітний момент двигуна дорівнює моменту навантаження $M_{н2}$. При холостому ході момент сил тертя в двигуні не враховується і момент навантаження приймається рівним нулю.

Для дослідження нормальних режимів асинхронних електроприводів часто може використовуватися математична модель машини, при виводі рівнянь якої приймаються наступні припущення: магнітне коло машини не насичене; явища гістерезиса, вихрові струми і втрати в сталі відсутні; активні та реактивні опори ланцюгів незмінні; магнітна провідність по окружності повітряного зазору постійна і не залежить від положення ротора.

При цих загальноприйнятих припущеннях рівняння доповнюється лінійними залежностями між потокозчепленнями та струмами [5, 6]

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r; L_s = L_{\sigma s} + L_m; \\ \bar{\Psi}_r &= L_r \bar{i}_r + L_m \bar{i}_s; L_r = L_{\sigma r} + L_m; \\ \bar{\Psi}_m &= L_m \bar{i}_m; \bar{i}_m = \bar{i}_s + \bar{i}_r, \end{aligned} \right\}, \quad (3.18)$$

де L_s (L_r) – індуктивність обмоток статора (ротора);

L_m – взаємна індуктивність між статорними і роторними обмотками.

Рівняння моделі можуть записуватися в іменованих або відносних одиницях. Найбільш зручною є система відносних одиниць, використання якої спрощує запис, перетворення і аналіз багатьох виразів. При моделюванні введення віднос-

них одиниць дозволяє в багатьох випадках позбутися від коефіцієнтів. Тому в подальшому використовується запис рівнянь тільки в системі відносних одиниць з нижче перерахованими базовими значеннями [5, 6]:

- для струму та напруги - номінальні амплітудні значення величин статора

$$I_{\bar{o}} = \sqrt{2}I_n; U_{\bar{o}} = \sqrt{2}U_n;$$

- для опорів

$$r_{\bar{o}} = x_{\bar{o}} = z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{I_{\bar{o}}};$$

- для кутової швидкості - синхронна кутова швидкість поля або питомої мережі

$$\omega_{\bar{o}} = \omega_0;$$

- для часу - час повороту електричного вектору, який обертається з синхронною кутовою швидкістю ω_0 , на один радіан

$$t_{\bar{o}} = \frac{1}{\omega_0};$$

- для потокозчеплень та індуктивностей

$$\Psi_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}}} = U_{\bar{o}} t_{\bar{o}}; L_{\bar{o}} = \frac{\Psi_{\bar{o}}}{I_{\bar{o}}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}} I_{\bar{o}}} = \frac{x_{\bar{o}}}{\omega_{\bar{o}}};$$

- для потужності

$$S_{\bar{o}} = \frac{3}{2} U_{\bar{o}} I_{\bar{o}} = 3 U_n I_n;$$

- для обертового моменту еквівалентної дво полюсної машини і моменту інерції приводу

$$M_{\bar{\theta}} = \frac{3}{2} \Psi_{\bar{\theta}} I_{\bar{\theta}}; J_{\bar{\theta}} = \frac{S_{\bar{\theta}}}{\omega_0^3}.$$

Останній вираз виходить підстановкою в рівняння руху часу, швидкості і моменту в відносних одиницях.

В відносних одиницях рівняння (3.18) приймає вигляд [5, 6]

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Psi}_s &= x_s \bar{i}_s + x_m \bar{i}_r; x_s = x_{os} + x_m; \\ \bar{\Psi}_r &= x_r \bar{i}_r + x_m \bar{i}_s; x_r = x_{or} + x_m; \\ \bar{\Psi}_m &= x_m \bar{i}_m; \bar{i}_m = \bar{i}_s + \bar{i}_r, \end{aligned} \right\}, \quad (3.19)$$

де x_{os}, x_{or} – реактивні опори розсіювання обмоток статора і ротора.

З урахуванням (3.17) і (3.19) рівняння моделі асинхронної машини в найбільш загальному вигляді в системі відносних одиниць записують у вигляді [5, 6]

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= r_s \bar{i}_s + [D + j\omega_k] \bar{\Psi}_s; \\ \bar{u}_r &= r_r \bar{i}_r + [D + j(\omega_k - \omega_r)] \bar{\Psi}_r; \\ \bar{\Psi}_s &= x_s \bar{i}_s + x_m \bar{i}_r; \\ \bar{\Psi}_r &= x_r \bar{i}_r + x_m \bar{i}_s; \\ M &= \text{Im} \left[\bar{\Psi}_s^* \bar{i}_s \right]. \end{aligned} \right\}. \quad (3.20)$$

В моделі, яка описана системою рівнянь (3.20), не враховується насичення магнітного ланцюга машини, але вона є нелінійною за наявності в диференціальних рівняннях добутків змінних. Але в подальшому ця модель називається лінійною.

Аналіз впливу форми запису рівнянь на структурну схему моделі для дослідження перехідних процесів симетричних схем ввімкнення асинхронного двигуна показує, що переважними є дві системи рівнянь: в котрих змінними є тільки потокозчеплення – система $\bar{\Psi}_s - \bar{\Psi}_r$ і система, в якій змінні виражені через роторні ве-

личини – система $\bar{i}_r - \bar{\Psi}_r$. В тих випадках, коли необхідно контролювати струм статора, використовується запис рівняння у формі $\bar{i}_s - \bar{\Psi}_r$. Використання рівнянь, які виражені через струм статора і ротора, призводить завжди до виникнення структурно нестійких схем моделей. Крім того, ці рівняння значно ускладнюються з-за появи так званих динамічних індуктивностей, які залежать від насичення. Якщо, наприклад, рівняння (3.17) і (3.18) рішити відносно струмів, то перше з них в нерухомій системі координат приймає вигляд

$$\bar{u}_s = r_s \bar{i}_s + L_{\sigma s} D\bar{i}_s + L_{\sigma} D\bar{i}_m,$$

де L_{σ} – динамічна індуктивність.

При переході до складових узагальнених векторів по ортогональним осям x і y в рівняння вводяться динамічні індуктивності $L_{\partial x}$, $L_{\partial y}$ і взаємні індуктивності $M_{\partial xy}$, $M_{\partial yx}$, які визначаються наступними виразами [5, 6]

$$L_{\partial x} = L_{\partial m} \cos^2 \eta_m + L_{cm} \sin^2 \eta_m; \quad (3.21)$$

$$L_{\partial y} = L_{\partial m} \sin^2 \eta_m + L_{cm} \cos^2 \eta_m; \quad (3.22)$$

$$M_{\partial xy} = M_{\partial yx} = (L_{\partial m} - L_{cm}) \sin^2 \eta_m \cos^2 \eta_m, \quad (3.23)$$

де $L_{\partial m}$ – динамічна взаємна індуктивність;

L_{cm} – статична взаємна індуктивність;

η_m – кут між вектором потоку або струму намагнічування і віссю x координатної системи.

Величини $L_{\partial x}$, $L_{\partial y}$, $L_{\partial m}$, L_{cm} і $M_{\partial xy}$ є функціями струму намагнічування. Величини $\cos \eta_m$ і $\sin \eta_m$ при кутовій швидкості системи координат, яка відрізняється від кутової швидкості поля машини, є невідірваними функціями часу, що значно ускладнює відображення нелінійних залежностей. Складність виразів для визначення динамічних індуктивностей обумовлює помилки при їх розрахунку, що знижує точність рішення рівнянь і можливість аналізу режимів, які вони описують.

Зручність прийнятої форми запису рівнянь в значній мірі залежить від вибору кутової швидкості системи координат. При дослідженні електромагнітних перехідних процесів використовуються звичайно три системи координат: система $d, q, 0$, нерухома відносно ротора ($\omega_k = \omega_r$); система $\alpha, \beta, 0$, нерухома відносно статора ($\omega_k = 0$); система $x, y, 0$, яка обертається у просторі з синхронною кутовою швидкістю ($\omega_k = \omega_0$).

Заміна змінних в рівняннях електричної рівноваги машини виконується для того, щоб виключити коефіцієнти, які періодично змінюються, в рівняннях поточкозчеплень. Це можливо, якщо нова система координат нерухома відносно кіл, які мають електричну або магнітну асиметрію. Тому систему координат $d, q, 0$ використовують здебільше для дослідження режимів синхронних машин; систему $\alpha, \beta, 0$ – для дослідження режимів асинхронних машин при асиметрії статорних кіл; систему $x, y, 0$ – для дослідження симетричних режимів асинхронних машин, коли її застосування призводить до спрощення опису. Для дослідження спеціальних режимів асинхронного електропривода в багатьох випадках є раціональним застосування систем координат, які обертаються зі змінною кутовою швидкістю.

3.3.3 Моделювання механічної характеристики робочої машини

При розгляданні роботи електродвигуна, який приводить в дію виробничий механізм, необхідно перш за все виявити відповідність механічних характеристик двигуна характеристиці виробничого механізму. Тому для правильного проектування і економічної експлуатації електроприводу необхідно вивчити ці характеристики.

Залежність між приведеними до валу двигуна швидкістю та моментом опору механізму називають механічною характеристикою виробничого механізму.

Різні виробничі механізми мають різні механічні характеристики. Але можна отримати деякі узагальнюючі висновки, якщо використати наступну емпіричну формулу для механічної характеристики виробничого механізму [3]

$$M_c = M_0 + (M_{c,ном} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^x, \quad (3.24)$$

де M_c – момент опору виробничого механізму при швидкості ω ;

M_0 – момент опору тертя у рухомих частинах механізму;

$M_{c,ном}$ – момент опору при номінальній швидкості $\omega_{ном}$;

x – показник ступеню, який характеризує зміну моменту опору при зміні швидкості.

У багатьох випадках привод прискорюється або уповільнюється, і тоді виникає інерційна сила або інерційний момент, які двигун повинен подолати, коли знаходиться у перехідному режимі. Таким чином, перехідним режимом електропривода називають режим роботи при переході від одного встановленого стану до іншого, коли змінюються швидкість, момент і струм.

Причинами виникнення перехідних режимів в електроприводах є або зміна навантаження, пов'язана з виробничим процесом, або вплив на електропривод при керуванні їм, тобто пуск, гальмування, зміна напрямку обертання. Перехідні режими в електроприводах можуть виникати також в результаті аварій або порушення нормальних умов електропостачання (наприклад, зміна напруги або частоти мережі, асиметрія напруги).

Рівняння руху електропривода повинно враховувати всі сили і моменти, які діють в перехідних режимах.

Рівняння рівноваги моментів для обертового руху (рівняння руху привода) має наступний вигляд [3]

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (3.25)$$

Рівняння (3.25) показує, що обертовий момент M , який розвиває двигун, урівнюється моментом опору M_c на його валу і інерційним або динамічним мо-

ментом $J \frac{d\omega}{dt}$. В (3.25) прийнято, що момент інерції привода J є постійними, що справедливо для значного числа виробничих механізмів.

Інерційний (динамічний) момент виявляється тільки під час перехідних режимів, коли змінюється швидкість приводу. При прискоренні приводу цей момент спрямований в зворотному напрямку руху, а при гальмуванні він підтримує рух. Інерційний момент як по значенню, так і по знаку визначається алгебраїчною сумою моментів двигуна і моменту опору.

В загальному вигляді рівняння руху привода може бути записано наступним чином [3]

$$\pm M \mp M_c = J \frac{d\omega}{dt} . \quad (3.26)$$

Вибір знаків перед значеннями моментів в (3.26) залежить від режиму роботи двигуна і характеру моментів опору.

3.3.4 Моделювання енергетичних і динамічних показників електроприводу

Проведемо аналіз енергетичних показників електроприводів в динамічних режимах. Спочатку розглянемо режими, які близькі до статичних, такі, в яких середні значення змінних постійні (такі режими називають усталеними динамічними).

Припустимо, що періодичне навантаження на робочий орган має постійну і синусоїдальну складові. При цьому з'являться гармонійні коливання кутової швидкості робочого органу. Якщо середня складова навантаження урівноважена середньою складовою електромагнітного моменту двигуна, то в загальному вигляді

$$\omega(t) = \omega_{cp} + \Delta\omega \sin \Omega t , \quad (3.27)$$

де ω_{cp} – середнє значення кутової швидкості;

$\Delta\omega$ – амплітуда синусоїдальної складової кутової швидкості;

Ω – частота.

Визначимо втрати енергії в цьому режимі для випадку, коли втрати потужності можна представити виразом

$$\Delta P(t) = M [\omega_0 - \omega(t)]. \quad (3.28)$$

В такому вигляді втрати потужності співпадають з втратами в якірному ланцюгу двигуна постійного струму незалежного збудження і в роторному ланцюгу асинхронного двигуна.

Для аналізу даного режиму велику цікавість викликає зміна за цикл коливань середніх втрат по відношенню до втрат в режимі, коли $\omega_c = \text{const}$ і $M_c = \text{const}$. Оцінимо середні втрати потужності за період коливань $T = 2\pi/\Omega$, для чого здійснимо операцію інтегрування з усередненням [3]

$$\Delta P = \frac{\Omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\Omega} \beta [(\omega_0 - \omega_{cp}) - \Delta\omega \sin \Omega t] \cdot [(\omega_0 - \omega_{cp}) - \Delta\omega \sin \Omega t] dt. \quad (3.29)$$

Після необхідних перетворень маємо

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_{c.cp} + \beta \Delta \omega^2 / 2, \quad (3.30)$$

де $\Delta P_{c.cp}$ – втрати в статичному режимі при значеннях ω і M , рівних даних середнім значенням.

З (3.30) витікає, що по відношенню до втрат $\Delta P_{c.cp}$, які визначаються середніми складовими моменту і швидкості і дорівнюють втратам в статичному режимі при $M_c = M_{cp}$, $\omega_c = \omega_{cp}$, втрати в розглянутому режимі с гармонійною складовою ω збільшуються.

Перехід електропривода від одного встановленого статичного або динамічного режиму до іншого супроводжується перехідним процесом. В практиці рідко виникає необхідність оцінки зміни втрат потужності в перехідному процесі. Частіше достатньо «інтегральної» оцінки втрат енергії за час перехідного процесу

$$\Delta W_{n.n} = \int_0^{t_{n.n}} \Delta P dt, \quad (3.31)$$

або затрат енергії за той же час

$$W_{затр} = \int_0^{t_{n.n}} \Delta P dt. \quad (3.32)$$

Для аналізу втрат енергії в перехідному процесі використовуємо вираз для потужності змінних втрат у вигляді

$$\Delta P = M(\omega_0 - \omega), \quad (3.33)$$

або

$$\Delta P = M \cdot \omega_0 \cdot s,$$

де s – ковзання.

Щоб виділити втрати енергії, обумовлені перехідним процесом, прийmemo, що момент статичного опору $M_c = 0$. при цьому електромагнітний момент з урахуванням основного рівняння руху електропривода можна записати у вигляді

$$M = J_{\Sigma} d\omega/dt. \quad (3.34)$$

Підставивши (4.34) в (4.33), з урахуванням (3.31) отримаємо

$$\Delta W_{n.n} = \int_0^{t_{n.n}} (J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega_0 - J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \omega) dt ,$$

а потім отримаємо

$$\Delta W_{n.n} = \int_{\omega_{поч}}^{\omega_{кін}} (J_{\Sigma} \omega_0 - J_{\Sigma} \omega) d\omega . \quad (3.35)$$

Рівняння (3.35) підкреслює ту обставину, що втрати енергії $\Delta W_{n.n}$ за час перехідного процесу вхолосту (при $M_c = 0$) не залежить від часу, а визначається тільки межею змінення швидкості від $\omega_{поч}$ до $\omega_{кін}$ і параметром механічної частини J_{Σ} – сумарним моментом інерції привода.

Процес нагріву двигуна визначається і описується диференціальним рівнянням

$$C \cdot \frac{d\tau}{dt} + A \cdot \tau = \Delta P_T, \quad (3.36)$$

де ΔP_T – потужність теплових втрат в двигуні, Вт;

τ – перебільшення температури, °С;

C – теплоємність двигуна, Дж/°С·кг;

A – тепловіддача, Дж/°С.

Для спрощення вирішення рівняння (4.38) вводимо відносні (безрозмірні) одиниці і перетворюємо рівняння в форму Коші [5, 6]

$$\frac{d\bar{\tau}}{dt} = \frac{1}{T_H} \cdot \Delta P_T - \frac{1}{T_H} \cdot \bar{\tau}, \quad (3.37)$$

де $\bar{\tau} = \frac{\tau_0}{\tau_{max}}$ – відносне перебільшення температури;

τ_0 – початкове перебільшення температури, °С;

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		44

τ_{max} – максимальне перебільшення температури, яке визначається класом ізоляції двигуна, °C;

T_H – постійна часу нагрівання, с;

$\Delta \bar{P}_T = \frac{\Delta P_T}{P_{max}} = \frac{\Delta P_T}{A \cdot \tau_{max}}$ – відносна потужність теплових втрат в двигуні.

Введення відносних (безрозмірних) одиниць суттєво спрощує задачу, замість двох параметрів (A і C) в рівнянні (3.37) використовується лише один параметр T_H – постійна часу нагрівання, яку можна визначити для будь-якого електродвигуна за паспортними даними

$$T_H = \frac{C \cdot \eta_H \cdot \tau_{max} \cdot m}{P_H \cdot (1 - \eta_H)}, \quad (3.38)$$

де m – маса активних матеріалів електродвигуна, кг;

η_H – номінальний ККД, в.о.;

P_H – номінальна потужність, Вт.

Моделювання енергетичних і динамічних показників здійснюємо за допомогою програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0 з використанням відповідних бібліотек програм.

3.3.5 Моделювання процесу пуску приводного електродвигуна при обмеженні швидкості зростання прикладеної напруги

Сталий режим перетворення електричної енергії в механічну характеризується постійністю значень електричної, магнітної і кінетичної енергій, які накопичуються відповідними системами електродвигуна. При будь-якому порушенні сталого режиму виникає електромеханічний перехідний процес, під час якого змінюються всі три види енергії. Під час проходження електромеханічного перехідного процесу мають місце два пов'язаних окремих процеси. Механічний, який пов'язаний зі зміною кінетичної енергії приводу, і електромагнітний, який обумовлений зміною енергії магнітного поля. Як тривалість кожного з цих процесів, так

і межі зміни відповідних їм енергій можуть суттєво відрізнятися друг від друга. Електромагнітні перехідні процеси можуть проходити як при постійній, так і при змінній кутовій швидкості і відповідно кінетичній енергії. В загальному випадку будь-який перехідний режим асинхронного електроприводу, пов'язаний зі зміною кутової швидкості, є електромеханічним, який характеризується як електромагнітними, так і механічними процесами.

Динамічні механічні характеристики відображають дійсний зв'язок між миттєвими значеннями моменту і швидкості в процесі переходу двигуна із одного врівноваженого стану в інший і дозволяють аналізувати вплив електромагнітних перехідних явищ.

Суттєвий вплив електромагнітних перехідних моментів на динамічні якості приводу визначає необхідність не тільки врахування їх дії при аналізі перехідних процесів, а й керування ними з метою формування необхідних динамічних характеристик.

Миттєве значення електромагнітного моменту електродвигуна залежить не тільки від кутової швидкості, опору двигуна і прикладеної напруги, але і від похідних цих значень. Варіація багатьох змінних значно розширює можливості керування динамічними процесами і режимами асинхронних електроприводів.

Одним із способів керування електромагнітними процесами є обмеження швидкості зростання прикладеної напруги.

Обмеження швидкості зростання прикладеної напруги призводить до зменшення перехідної складової струму намагнічування, що, в свою чергу, може привести до зменшення середнього пускового моменту двигуна. Тому межі змінення швидкості живлячої напруги повинні бути обмежені таким чином, щоб зниження знакозмінних перехідних моментів не призводило до зниження швидкодії приводу.

Швидкість зростання прикладеної до двигуна напруги може залишатися постійною або змінюватися за будь-яким законом. Практично найбільш просто реалізується експоненціальний закон зміни керованої величини. До експоненціального закону змінення прикладеної напруги можна легко привести і інші режими, в

яких швидкість зміни напруги в початковій стадії процесу може вважатися постійною.

Тому, для створення моделі керованого джерела живлення приймаємо, що напруга буде змінюватися за законом [7, 8]

$$U_s = U_{s0} \cdot (1 - e^{-t/T}), \quad (3.39)$$

де U_{s0} – стале значення прикладеної напруги.

Аналітично можна приблизно визначити кінцеве значення швидкості зміни напруги, необхідне для повного подавлення знакозмінних перехідних моментів. Для цього необхідно рішення рівняння лінійної моделі нерухомого двигуна та знайти вираз електромагнітного моменту.

Після проведення перетворень, при прийнятих допущеннях:

1) $\omega_R = 0$ і $\omega_K = 1$;

2) параметри статора і ротора приведені і однакові,

та при припущенні, що відносне значення $T > 0,03$ с, отримуємо вираз для електромагнітного моменту [7, 8]

$$M = M_{II} [1 + e^{-2t/T} - 2e^{-t/T}], \quad (3.40)$$

і також не містить періодичних складових, що свідчить про відсутність знакозмінних перехідних моментів.

Але таке повне виключення періодичних складових за рахунок уповільненого зростання прикладеної напруги може призвести до повільного росту пускового моменту, а отже, й до значного збільшення часу розгону. Оптимальне значення T повинно знаходитися між значеннями $0,003 < T < 3,3$ с, з тим щоб досягалося значне зменшення періодичних складових без суттєвого зменшення усталеного значення пускового моменту.

Визначення оптимального значення T зручно провести шляхом моделювання рівнянь лінійної математичної моделі асинхронної машини з короткозамкненим ротором в системі координат, яка синхронно обертається, доповнених рівнянням (3.39).

Найбільш зручне керування швидкістю змінення прикладеної напруги здійснюється за допомогою тиристорних комутаторів з керованим кутом α_T включення тиристорів. В таких комутаторах просто реалізувати експоненціальний закон зміни кута α_T за виразом

$$\alpha_T = \alpha_T(0)e^{-t/T_\alpha}. \quad (3.41)$$

Змінюючи постійну часу T_α і початкове значення α_T кута включення, можна отримати велике різноманіття пускових динамічних характеристик. Наведені дослідження показали, що пускові характеристики приводу при зміні кута α_T за рівнянням (3.40) практично не відрізняються від характеристик, отриманих при зміні прикладеної напруги за (3.39) у випадку рівності постійних часу T і T_α . Тому наведені міркування про вплив на характер пуску постійної часу справедливі і для тиристорного фазового керування.

Найбільш простіша форма реалізації фазового керування можлива при використанні тиристорних комутаторів, які використовуються як тиристорні пускачі. Тиристорний комутатор складається з наступних частин:

- силової частини, яка складається з трьох тиристорних ключів;
- блоку формування сигналу керування, який безпосередньо формує сигнал керування на основі сигналу таймера та сигналу задавача постійної часу;
- керуючої схеми, яка створює розподілений трьохфазний сигнал керування для блоків керування силовими тиристорними ключами;
- блоки керування силовими тиристорними ключами створюють електричний сигнал, необхідний для відкривання зустрічно-паралельно включених тиристорів тиристорних ключів.

В блоці формування сигналу керування проходять розрахунки та перетворення вхідних сигналів в сигнал зміни кута керування тиристорами на основі реалізації закону зміни напруги.

Схемна реалізація блоків тиристорного комутатора може бути виконана на базі пристроїв плавного пуску з блоком формування сигналу керування (розрахунку швидкості зміни кута відкриття тиристорів) на базі стандартних напівпровідникових приладів.

3.3.6 Аналіз одержаних результатів та висновки

Моделювання енергетичних і динамічних показників електроприводу дробарки концентрованих кормів ДБ-5 з використанням програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0 проводилося для двох електродвигунів: встановленого АИР180М2УПУ3 потужністю 30 кВт і рекомендованого АИР180S2УПУ3 потужністю 22 кВт. За результатами моделювання були отримані залежності, які наведені на аркуші графічної частини роботи 21ЕМД.11260573.02.25.320000РР.

На підставі представлених залежностей, отриманих під час проведення моделювання, можна зробити наступні висновки про доцільність заміни приводного електродвигуна дробарки:

- на основі аналізу кривих кутової швидкості, при заміні приводного електродвигуна, час розгону системи електродвигун-робоча машина на холостому ході збільшився з 8 с до 12,5 с;

- значно зменшилися амплітудні коливання пускового струму з 320 А до 260 А, що пов'язане зі зменшенням потужності електродвигуна, однак час дії пускових струмів збільшився при збільшенні часу розгону;

- амплітуда знакозмінних коливань електромагнітного моменту і значення максимального моменту також зменшилися і складають: для електродвигуна АИР180М2УПУ3: максимальне значення – 280 Н·м, мінімальне – (–160 Н·м), максимальний момент – 258 Н·м; для електродвигуна АИР180S2УПУ3: максимальне значення – 167 Н·м, мінімальне – (–80 Н·м), максимальний момент – 168 Н·м;

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		49

– температура електродвигунів при прийнятій початковій 20 °С збільшилася для встановленого електродвигуна до 22,7 °С, для рекомендованого електродвигуна до 24,3°С;

– витрати енергії на здійснення технологічного процесу мають однаковий характер і, хоча визначаються різними максимальними значеннями, площі обмежені наведеними кривими мають однакове значення;

– електричні втрати в електродвигуні мають такий же характер зміни як і витрати енергії на виконання технологічного процесу.

Таким чином, спираючись на проведені розрахунки необхідної потужності приводного електродвигуна дробарки ДБ-5 та приймаючи до уваги результати моделювання динамічних показників, можна зробити висновок про можливість та необхідність заміни встановленого приводного електродвигуна АІР180М2УПУЗ на рекомендований АІР180S2УПУЗ.

Результати моделювання динамічних показників електродвигуна АІР180S2УПУЗ потужністю 22 кВт приводу дробарки ДБ-5 при керуванні з обмеженням швидкості зростання напруги наведені на аркуші графічної частини 21ЕМД.11260573.02.25.330000РР.

На основі наведених залежностей можна зробити висновки:

- при збільшенні постійної часу T від 0,01 с до 1 с зменшується величина пускових струмів, відсутні коливання струму в початковій зоні – від 0 с до 0,5 с, значення струму при подальшому моделюванні майже рівні і не відрізняють за характером зміни;

- при збільшенні постійної часу T значення електромагнітного моменту суттєво змінюються в початковій зоні. При збільшенні постійної часу знакозмінні складові моменту зникають і значення моменту в початковій зоні (до 1 с) значно зменшуються. В середині процесу пуску значення моменту при різних T несуттєво відрізняються. Однак зменшення знакозмінних моментів в початковій зоні призводить до збільшення часу пуску, що можна спостерігати при зміні моменту при максимальній T . Таким чином, подальше збільшення $T > 1,0$ с буде призводити до

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		50

суттєвого збільшення часу пуску і зменшення знакозмінних моментів в початковій зоні;

- кутова швидкість змінюється однотипово і майже не відрізняється при зміні швидкості зростання напруги. Розглядаючи характер зміни кутової швидкості можна зробити висновок про значне збільшення часу розгону систему електродвигун - робоча машина при збільшенні постійної часу;

- зміна температури двигуна проходить однотипово з подальшим перегином в кінці розгону системи електродвигун - робоча машина. Загальне збільшення температури за період пуску складає $4,5^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, ґрунтуючись на приведеному аналізі динамічних показників можна зробити загальні висновки: значне усунення знакозмінних моментів з великою амплітудою та коливань пускового струму досягається при обмеженні швидкості зростання напруги з постійною часу, яка змінюється в діапазоні $0,1\text{ с} < T < 0,5\text{ с}$, подальше збільшення постійної часу призводить до незначних змін моментів в початковий період і до суттєвого збільшення часу розгону. Оскільки під час збільшення постійної часу значення струму практично не відрізняються, а час розгону збільшується, то можна казати про збільшення витрат енергії на виконання технологічного процесу.

3.4 Достовірність отриманих результатів

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів, висновків і рекомендацій підтверджується: використанням фундаментальних положень теоретичних основ електротехніки і математики, електричних машин і асинхронного електроприводу, математичного і комп'ютерного моделювання електричних машин і асинхронного електроприводу, а також розрахунками і моделюванням в середовищі Matlab-Simulink.

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДРОБАРКОЮ КОНЦЕНТРОВАНИХ КОРМІВ

4.1 Вимоги до системи керування дробаркою концентрованих кормів

Система автоматизованого керування дробаркою концентрованих кормів повинна забезпечувати:

- автоматизований електропривод робочих органів і механізмів дробарки;
- автоматизований і налагоджувальний режими роботи системи керування;
- запуск електродвигунів приводу робочих органів дробарки в послідовності, яка передбачена технологічним процесом подрібнення концентрованих кормів;
- захист електрообладнання від струмів коротких замикань та струмів перевантажень;
- світлову сигналізацію стану силового електрообладнання;
- контроль рівня продукту в бункері зерна дробарки за допомогою перетворювачів рівня;
- контроль положення засувки в бункері зерна дробарки за допомогою кінцевого вимикача;
- електричне блокування включення електродвигуна приводу молоткового барабана дробарки при відкритій кришці дробильної камери за допомогою кінцевого вимикача;
- підтримування встановленого режиму роботи електродвигуна приводу молоткового барабана дробарки за допомогою автоматичного регулятора завантаження;
- контроль ступеню завантаження електродвигуна приводу молоткового барабана під час роботи дробарки за допомогою амперметра.

4.2 Розробка функційної схеми автоматизації дробарки концентрованих кормів

Функційну схему автоматизації виконуємо у вигляді креслення, на якому схематично, умовними позначеннями показуємо технологічне обладнання, приводні електродвигуни і засоби автоматизації – вимірювальні перетворювачі і виконавчі пристрої. Функційна схема визначає структуру і функціональні зв'язки між технологічним обладнанням і засобами контролю і керування.

Схема функційна автоматизації дробарки концентрованих кормів наведена на аркуші графічної частини 21ЕМД.11260573.02.25.210000Э2.

4.3 Розробка схеми електричної принципової керування електроприводом дробарки концентрованих кормів

Схема керування дробаркою концентрованих кормів складається з силових кіл та кіл керування. Напруга на схему подається за допомогою триполюсного автоматичного вимикача QF1, на кола керування за допомогою однополюсного автоматичного вимикача SF1.

Схема забезпечує роботу дробарки в двох режимах: «Налагоджування» та «Робота». Вибір режиму роботи схеми керування здійснюється за допомогою перемикача SA1.

Для дистанційного вмикання та вимикання електродвигунів приводу робочих механізмів дробарки призначені електромагнітні пускачі KM1 - KM3, для захисту електродвигунів приводу робочих машин від струмів короткого замикання – автоматичні вимикачі QF1 - QF3, для захисту електродвигунів від перевантаження – теплові реле KK1, KK2.

У режимі «Налагоджування» кожний механізм дробарки вмикається і вимикається незалежно від інших за допомогою кнопок SB1 - SB6.

У режимі «Робота» після натискання кнопки SB2 послідовно запускаються двигуни вивантажувального шнека M1 і дробарки M2. Після запуску електродви-

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		53

гуна М1 замикається контакт електромагнітного пускача КМ1 в колі котушки електромагнітного реле КV3 керування електродвигуном М2 приводу дробарки. Відбувається запуск електродвигуна М2 приводу дробарки.

При цьому запуск електродвигуна М2 можливий тільки при закритій кришці дробильної камери. Контакт кінцевого вимикача SQ1 запобігає запуску електродвигуна М2 при відкритій кришці дробарки.

Для плавного пуску електродвигуна М2 приводу дробарки в схемі застосовується пристрій плавного пуску електродвигуна А1 Prostar PRS2. Пуск електродвигуна відбувається при пониженій напрузі при поступовому її збільшенні до номінального значення. При досягненні напруги номінального значення, після запуску електродвигуна М2 пристроєм плавного пуску, вмикається шунтуючий електромагнітний пускач КМ2, через силові контакти якого отримує живлення електродвигун М2. Одночасно за допомогою допоміжного контакту пускача КМ2 напруга подається на автоматичний регулятор завантаження (АРЗ) А2 та електромагнітну муфту YА1.

Електродвигун завантажувального шнека М3 запускається після натискання кнопки SB6 при незаповненому бункері дробарки. Коли зерно в бункері досягне датчика верхнього рівня SL1.1, замикається контакт КV4.1 сигналізатора рівня А3 і шунтує коло керуючого електрода симістора VS1. Останній закривається і розриває коло живлення котушки пускача КМ3. Завантажувальний шнек зупиняється. Повторно шнек запускається після звільнення зерном датчиків рівня SL1.1 і SL1.2.

Для стабілізації струму, що споживається електродвигуном дробарки М2, передбачений автоматичний регулятор завантаження (АРЗ). Керуючий сигнал на регулятор завантаження знімається з трансформатора струму ТА1. Залежно від завантаження двигуна М2 регулятор АРЗ подає команди на привод засувки М4, який, відкриваючи або закриваючи засувку, змінює подачу зерна у дробильну камеру. Так підтримується номінальне завантаження двигуна М2. При стрибкоподібних перевантаженнях двигуна дробарки регулятор через реле КV2 вимикає муфту YА1 і засувка перекриває доступ зерна в дробильну камеру. Якщо зерно в дро-

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		54

більшу камеру не надходить, засувка відкривається повністю, замикається контакт кінцевого вимикача SQ2 і вмикається сирена HA1.

Регулятор AP3 подає команди на вмикання двигуна M4 імпульсами з певного заданою шпаруватістю. Якщо двигун недовантажений або перевантажений більше 15 % від номінального струму, паузи між імпульсами скорочуються у 5 - 15 разів, завдяки чому прискорюється відпрацювання сигналу неузгодженості між опорним і контрольованим сигналами.

Для перевірки роботи регулятора завантаження перемикач SA2 встановлюють в положення «Регулятор».

Схема електрична принципова системи керування електроприводом дробарки концентрованих кормів наведена на аркуші графічної частини роботи 21ЕМД.11260573.02.25.410000ЭЗ.

4.4 Аналіз надійності елементів системи керування

Аналіз надійності елементів системи автоматизованого керування проводимо за методикою, яка наведена в [27].

Інтенсивність потоку відмов визначається за формулою

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i n_i, \quad (4.1)$$

де λ_s – сумарна інтенсивність відмов, год.⁻¹;

λ_i – інтенсивність відмов окремих елементів, год.⁻¹;

n_i – кількість однотипових елементів.

Результати розрахунків інтенсивності відмов елементів системи автоматизованого керування електроприводом дробарки концентрованих кормів наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Інтенсивність відмов елементів системи керування

Найменування елементів	Кількість n_i , шт.	Інтенсивність відмов	
		$\lambda_i \cdot 10^{-6}$, год ⁻¹	$n_i \cdot \lambda_i \cdot 10^{-6}$, год ⁻¹
Автоматичний вимикач	4	0,22	0,88
Електромагнітний пускач	3	1,0	3,0
Електротеплове реле	2	2,2	4,4
Реле проміжне	5	0,7	3,5
Напівпровідниковий діод	10	0,05	0,5
Кнопка керування	6	0,9	5,4
Перетворювач рівня	2	2,5	5,0
Перетворювач положення	2	2,5	5,0
Перемикач	3	0,9	2,7
Резистор	2	0,06	0,12
Конденсатор	1	0,02	0,02
Трансформатор струму	1	0,12	0,12
Електронний блок	3	9,0	27,0
Всього	—	—	57,64

Час напрацювання на відмову

$$T = \frac{1}{\lambda_s \cdot k}, \quad (4.2)$$

де k – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив навколишнього середовища на інтенсивність відмов. Приймаємо $k = 10$ [27].

Враховуючи, що розподіл довговічності елементів системи керування підпорядковується експоненціальному закону, ймовірність безвідмовної роботи визначається за формулою

$$P(t) = \exp(-kt\lambda_s), \quad (4.3)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи системи;

t – час роботи системи, год.

Час напрацювання на відмову системи керування складає

$$T = \frac{1}{10 \cdot 57,64 \cdot 10^{-6}} = 1735 \text{ год.}$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи керування складає

$$P(t) = \exp(-10 \cdot 100 \cdot 57,64 \cdot 10^{-6}) = 0,94.$$

За результатами розрахунків отримані наступні показники надійності роботи системи автоматизованого керування електроприводом дробарки концентрованих кормів:

- інтенсивність відмов $\lambda_s = 57,64 \cdot 10^{-6}$ год.;
- час напрацювання на відмову $T = 1735$ год.;
- ймовірність безвідмовної роботи $P(t) = 0,94$,

що відповідає середньостатистичним показникам надійності промислових засобів автоматизації.

4.5 Специфікація матеріалів і обладнання

Специфікація матеріалів і обладнання наведена в таблиці 5.

Таблиця 5 – Специфікація матеріалів і обладнання

Позиц. позн.	Найменування	Кіл.	Примітка
	Електродвигуни		
M2	АИР180М2УПУЗ, ТУ У27.1-37788607-001:2012	1	$P_H = 30$ кВт
M1, M3	АИР80В6УПУЗ, ТУ У27.1-37788607-001:2012	2	$P_H = 1,1$ кВт
	Автоматичні вимикачі		
QF1	AB2000/3-C80 400 УЗ, ТУ У 31.2-25019584-001:2006	1	$I_H = 80$ А
QF2	AB2000/3-C63 400 УЗ, ТУ У 31.2-25019584-001:2006	1	$I_H = 63$ А
QF3	AB2000/3-C10 400 УЗ, ТУ У 31.2-25019584-001:2006	1	$I_H = 10$ А
	Електромагнітні пускачі		
KM1, KM3	ПМЛ-1220. 220 В. УХЛЗБ, ТУ 3427-042-05758109-2008	2	$I_{HMP} = 10$ А
KM2	ПМЛ-4220. 220 В. УХЛЗБ, ТУ 3427-042-05758109-2008	1	$I_{HMP} = 63$ А
	Електротеплові струмові реле		
KK1, KK2	РТЛ-1008-2 УХЛ4, ТУ 3425-041-05758109-2008	2	$I_{HTP} = 25$ А
SA1	Перемикач ПКУЗ-31Д0014УЗ, ТУ У31.2-25019584-031-2003	1	
SB1-SB6	Пост кнопочний ПК222-2УЗ, ТУ У31.2-25019584-003-2003	3	
KV1-KV4	Реле проміжне ПЭ40-20-22УЗ, 220 В, 50 Гц, ТУ У3.11-14309600-060-96	5	$U_H = 220$ В
VD1-VD4	Світлосигнальна арматура АД22С-10АС УЗ, ТУ 3400-006-72453807-07	4	
SA2, SA3	Перемикач ВК 021-ПРЧ-3УЗ, ТУ У31.2-25019584-003-2003	2	
SL1.1,SL1.2	Перетворювач рівня СУ-1Ф	2	
SQ1, SQ2	Вимикач шляховий ВП15М4211-54У2, ТУ У31.2-25019584-005-2004	2	
TA1	Трансформатор струму Т-0,66 100/5 А, ДСТУ 7746-2003	1	
A1	Пристрій плавного пуску Prostar PRS2 030	1	$P_H = 30$ кВт
A3	Сигналізатор рівня сипких середовищ ОВЕН САУ-М7Е, ТУ 4214-001-46526536-00	1	

Продовження таблиці 5

Позиц. позн.	Найменування	Кіл.	Примітка
VD5-VD9	Діод КД105А	5	
R1, R2	Резистор МЛТ-2,0-220 Ом $\pm$ 5%	2	
C1	Конденсатор К73-24 - МПО - 0,5 мкФ $\pm$ 5%	1	
VS1	Симистор КУ208В	1	

4.6 Охорона праці при експлуатації електрообладнання дробарки концентрованих кормів

Інструкція з охорони праці при експлуатації електроустановок до 1000 В [23-25].

1 Загальні вимоги безпеки

1.1 До робіт з експлуатації електроустановок до 1000 В допускаються особи, які пройшли медичний огляд та інструктаж з охорони праці. Неелектротехнічному персоналу, що експлуатує електроустановки до 1000 В, що пройшов інструктаж та перевірку знань з електробезпеки, присвоюється І кваліфікаційна група допуску з оформленням у журналі встановленої форми з обов'язковими підписами перевіряючого та того, хто перевіряється.

1.2 Особи, які допущені до експлуатації електроустановок до 1000 В, повинні дотримуватись правил внутрішнього трудового розпорядку, встановлених режимів праці та відпочинку.

1.3 При експлуатації електроустановок до 1000 В можлива дія наступних небезпечних виробничих факторів:

- ураження електричним струмом при дотику до струмоведучих частин;
- несправності ізоляції або заземлення.

1.4 При експлуатації електроустановок до 1000 В повинні використовуватися такі засоби індивідуального захисту: діелектричні рукавички, діелектричний килимок, показчик напруги, інструмент із ізольованими ручками.

1.5 Особи, що експлуатують електроустановки до 1000 В, зобов'язані суворо дотримуватися правил пожежної безпеки, знати місця розташування первинних засобів пожежогасіння, а також пристроїв, що відключають (рубильників) для зняття напруги.

1.6 Про кожен нещасний випадок постраждалий або очевидець нещасного випадку зобов'язаний негайно повідомити адміністрацію підприємства. У разі несправності електроустановки припинити роботу, зняти з неї напругу та повідомити адміністрацію підприємства.

1.7 У процесі експлуатації електроустановок персонал повинен дотримуватись правил використання засобів індивідуального захисту, дотримуватись правил особистої гігієни, утримувати в чистоті робоче місце.

1.8 Особи, які допустили невиконання або порушення інструкції з охорони праці, притягуються до дисциплінарної відповідальності відповідно до правил внутрішнього трудового розпорядку та, за необхідності, піддаються позачерговій перевірці знань і правил охорони праці.

2 Вимоги безпеки перед початком роботи

2.1 Перевірити відсутність зовнішніх пошкоджень електроустановки, наявність та справність контрольних, вимірювальних та сигнальних приладів, тумблерів, перемикачів тощо.

2.2 Переконатися в цілісності кришок вимикачів, електрокабелю тощо.

2.3 Переконатися у наявності та цілісності заземлювального провідника корпусу електроустановки.

2.4 Перевірити наявність та справність засобів індивідуального захисту, відсутність їх зовнішніх пошкоджень.

3 Вимоги безпеки під час роботи

3.1 Перед включенням електроустановки в електричну мережу, при необхідності, стати на діелектричний килимок (якщо покриття підлоги виконане з струмопровідного матеріалу).

3.2 Не включати електроустановку в електричну мережу мокрими та вологими руками.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		60

3.3 Дотримуватись правил експлуатації електроустановки, не піддавати її механічним ударам, не допускати падінь.

3.4 Не торкатися проводів та інших струмопровідних частин, що знаходяться під напругою, без засобів індивідуального захисту.

3.5 Наявність напруги в мережі перевіряти лише вказівником напруги.

3.6 Стежити за справною роботою електроустановки, цілісністю ізоляції та заземлення.

3.7 Не дозволяється працювати на електроустановках у разі їх несправності, іскріння, порушення ізоляції та заземлення.

4 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

4.1 У разі несправності в роботі електроустановки, іскріння, порушення ізоляції проводів або обрив заземлення, припинити роботу та повідомити адміністрацію підприємства. Роботу продовжувати лише після усунення несправності електриком.

4.2 При виявленні обірваного електричного дроту, не наближатися до нього, негайно повідомити адміністрацію підприємства, самому залишатися на місці і попереджати інших людей про небезпеку.

4.3 У разі загоряння електроустановки, негайно відключити її від електричної мережі, а полум'я гасити тільки піском, вуглекислотним або порошковим вогнегасником.

4.4 При ураженні електричним струмом негайно відключити напругу та за відсутності дихання та пульсу у потерпілого зробити йому штучне дихання або провести непрямий (закритий) масаж серця до відновлення дихання та пульсу, повідомити про нещасний випадок адміністрації підприємства, за необхідності відправити потерпілого до найближчої лікувальної установи.

4.7 Техніко-економічні розрахунки ефективності системи керування електроприводом дробарки концентрованих кормів

4.7.1 Загальні положення оцінки економічної ефективності капітальних вкладень

Оптимальний варіант прийнятих в проекті інженерних рішень визначається системою економічних показників [26].

Енергоозброєність праці – це кількість енергетичних потужностей в розрахунку на одного середньорічного працівника

$$E_{озб} = \frac{P_e}{N_{роб.}}, \quad (4.4)$$

де P_e – сумарні енергетичні потужності, кВт;

$N_{роб.}$ – середньорічна чисельність робітників, люд.

Для оцінки рівня використання електроенергії використовують наступні показники.

Електроозброєність – це відношення кількості електроенергії (кВт·год), спожитої на виробничі потреби, до середньорічної чисельності працівників.

$$E_{ел.озб.} = \frac{E_{витр}}{N_{роб.}}, \quad (4.5)$$

де $E_{ел.озб.}$ – електроозброєність праці, кВт·год/люд;

$E_{витр}$ – кількість спожитої електроенергії, кВт·год;

$N_{роб.}$ – середньорічна чисельність робітників, люд.

Енергоємність виробництва продукції характеризує витрати енергії на одиницю виробленої продукції. Визначають енергоємність виробництва продукції за формулою

$$E_{\text{емн.}} = \frac{E_{\text{витр.}}}{Q}, \quad (4.6)$$

де $E_{\text{емн.}}$ – енергоємність виробництва;

$E_{\text{витр.}}$ – енерговитрати на виробництво продукції;

Q – обсяг виробленої продукції.

Важливим є показник, що характеризує ефективність загальної праці, тобто її продуктивність. Він визначається відношенням виробленої продукції до кількості працівників, зайнятих у сфері виробництв

$$П_n = \frac{ВП}{N_{\text{роб.}}}, \quad (4.7)$$

де $ВП$ – валова продукція за рік, грн.

$N_{\text{роб.}}$ – середньорічна кількість робітників, люд.

Трудомісткість – це обернений показник продуктивності праці і його визначають діленням прямих затрат людино-годин, що виникають у процесі виконання технологічних операцій, на обсяг виробленої продукції

$$T_p = \frac{З_{\text{в.п.}}}{Q}, \quad (4.8)$$

де T_p – трудомісткість праці, люд.-год./т;

$З_{\text{в.п.}}$ – загальні витрати праці, люд.-год.;

Q – кількість виробленої продукції, т.

Собівартість одиниці продукції визначають діленням собівартості всієї продукції на її обсяг у натуральному вигляді

$$C_B = \frac{B_B}{Q}, \quad (4.9)$$

де C_v – собівартість одиниці продукції, грн/т;

B_v – витрати виробництва, тис.грн.;

Q – обсяг виробленої продукції, ц.

Витрати електроенергії визначаємо за формулою

$$E_{вир.} = T_{см} \cdot H_{см} \cdot K_o \cdot K_n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{ni} \cdot K_{zi}}{\eta_{ni}}, \quad (4.10)$$

де $T_{см}$ – тривалість зміни, год; $T_{см} = 8$ годин;

$H_{см}$ – кількість робочих змін обладнання за рік, $H_{см} = 252$ зміни;

K_o – коефіцієнт одночасності роботи обладнання, приймаємо $K_o = 1,0$;

K_n – коефіцієнт втрат електроенергії, $K_n = 1,05$;

K_{zi} – коефіцієнт завантаження i -го обладнання, $K_{zi} = 1$;

P_{ni} – номінальна встановлена потужність i -го обладнання.

Витрати електроенергії в грошових одиницях

$$E_{гр} = E_n \cdot T_{\phi}, \quad (4.11)$$

де $E_{гр}$ – витрати електроенергії в гривнях;

E_n – витрати електроенергії в кВт·год.

T_{ϕ} – тариф на 1 кВт·год, грн.

Додатковий прибуток від якості продукції (підвищення продуктивності обладнання або інших чинників):

- підвищення ціни за рахунок поліпшення якості продукції

$$\Delta \Pi = \Pi_1 - \Pi_o;$$

- збільшення обсягу випуску продукції за рахунок підвищення продуктивності обладнання

$$\Delta BП = BП_n - BП_б;$$

- додаткова виручка

$$\Delta B_p = \Delta Ц \cdot \Delta BП;$$

- додатковий прибуток від реалізації більш якісної продукції або від підвищення продуктивності обладнання

$$П_{дод.} = П_{пр.} - П_{баз.}$$

4.7.2 Показники і критерії економічної ефективності

Капітальні вкладення – це кошти, які використовуються на придбання і будівництво нових, а також реконструкцію діючих основних фондів.

Коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень розраховують за формулою

$$E_{к.в.} = \frac{\Delta П}{K}, \quad (4.12)$$

де $\Delta П$ – приріст прибутку підприємства у випадку вкладення капіталу в реконструкцію, модернізацію, технічне переоснащення;

K – загальна сума капіталовкладень.

Якщо капітальні вкладення витрачені вперше і немає потреби порівнювати їх з попередніми, то термін окупності розраховують за початковими вкладеннями

$$T_{о.п.в.} = \frac{K_n}{B_1 - B_2}, \quad (4.13)$$

де $T_{о.п.в.}$ – строк окупності початкових капітальних вкладень, роки;

K_n – початкові капітальні вкладення на виробництво;

B_1, B_2 – виробничі витрати.

Термін окупності додаткових капітальних вкладень визначаємо за формулою

$$T_{o.d.k.v.} = \frac{K_2 - K_1}{B_1 - B_2}, \quad (4.14)$$

де $T_{o.d.k.v.}$ – термін окупності додаткових капітальних вкладень, років;

K_1, K_2 – капітальні вкладення у типовому та проектному варіантах;

B_1, B_2 – виробничі витрати.

Рівень абсолютної ефективності капітальних вкладень характеризує також строк їх окупності. Цей показник обернений до коефіцієнта ефективності інвестицій. Його визначають з відношення обсягу здійснюваних капіталовкладень до середньорічного приросту прибутку

$$T = \frac{K}{\Delta\P}, \quad (4.15)$$

де K – загальна сума капіталовкладень

$\Delta\P$ – приріст прибутку.

Приведені витрати – це сума річних виробничих витрат і капітальних вкладень, приведених до річної розмірності за допомогою нормативного коефіцієнта їх ефективності. Розмір приведених витрат визначають за формулою

$$B_n = B_v + E_n \cdot K, \quad (4.16)$$

де B_n – приведені витрати;

B_v – виробничі витрати;

K – капітальні вкладення;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень – це обернений показник до показника строку їх окупності. (Наприклад, якщо строк окупності капітальних вкладень становить 5 років, то нормативний коефіцієнт їх ефективності складає 0,20).

4.7.3 Розрахунок економічної ефективності

Для визначення економічних показників при проведенні автоматизації дробарки концентрованих кормів ДБ-5 використовуємо основні дані, які представлені у попередніх розділах роботи.

Визначаємо енергоозброєність праці за виразом (4.4) для базового та проектного варіантів дробарки, кількість працівників лінії складає 2 люд., сумарні потужності виробничого обладнання складають: для базового варіанту 32,2 кВт, для проектного – 24,2 кВт.

Визначаємо енергоозброєність праці за виразом (4.4) для базового та проектного варіантів

$$\text{- базовий} \quad E_{озб} = \frac{32,2}{2} = 16,1 \text{ кВт / люд.},$$

$$\text{- проектний} \quad E_{озб} = \frac{24,2}{2} = 12,1 \text{ кВт / люд.}$$

Для визначення наступних енергетичних показників необхідно розрахувати енерговитрати при виробництві продукції. Розрахунки проводимо за формулою (4.10), при цьому, цех працює на протязі всього року, то тривалість зміни складає вісім годин, кількість робочих змін за рік – 252, коефіцієнт одночасності роботи обладнання – 1,0, коефіцієнт втрат електроенергії – 1,05.

$$\text{- базовий} \quad E_{випр.} = 8 \cdot 252 \cdot 1,0 \cdot 1,05 \cdot 32,2 = 68160,96 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$\text{- проектний} \quad E_{випр.} = 8 \cdot 252 \cdot 1,0 \cdot 1,05 \cdot 24,2 = 51226,56 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

Електроозброєність праці розраховуємо за виразом (4.5)

- базовий $E_{ел.озб.} = \frac{68160,96}{2} = 34080,48 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{люд.},$

- проектний $E_{ел.озб.} = \frac{51226,56}{2} = 25613,28 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{люд.},$

Енергоємність виробництва розраховуємо за виразом (4.6)

- базовий $E_{емн.} = \frac{68160,96}{7500} = 9,09 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т},$

- проектний $E_{емн.} = \frac{51226,56}{7500} = 6,83 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т},$

При визначенні трудомісткості праці, необхідно визначити загальні витрати праці, які складають

- базовий $З_{в.л.} = 8 \cdot 252 \cdot 2 = 4032 \text{ люд.} \cdot \text{год},$

- проектний $З_{в.л.} = 8 \cdot 252 \cdot 2 = 4032 \text{ люд.} \cdot \text{год},$

Тоді, трудомісткість дорівнює

- базовий $T_p = \frac{4032}{7500} = 0,54 \text{ люд.} \cdot \text{год} / \text{т},$

- проектний $T_p = \frac{4032}{7500} = 0,54 \text{ люд.} \cdot \text{год} / \text{т},$

Економія електроенергії за рік склала

$$E = 68160,96 - 51226,56 = 16934,4 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

За даними АТ «Миколаївобленерго» вартість 1 кВт·год з урахуванням ПДВ на 01 грудня 2024 р. складає 9,82 грн/кВт·год.

Економія електроенергії в грошовому еквіваленті склала

$$E = 16934,4 \cdot 9,82 = 166295,81 \text{ грн.}$$

Додаткові капітальні вкладення складаються з вартості системи керування та електросилового обладнання. Вартість комплексу обладнання з урахуванням вартості монтажних-налагоджувальних робіт складає 103880 грн. за даними аналізу прайс-листів станом на 01 грудня 2024 року.

Коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень розраховуємо за формулою (4.12)

$$E_{к.в.} = \frac{166295,81}{103880} = 1,6.$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень визначаємо за рівнянням (4.15)

$$T = \frac{103880}{166295,81} = 0,62.$$

Основні техніко-економічні показники представлені в таблиці 6.

Таблиця 6 – Техніко-економічні показники

Показники	Базовий варіант	Проектний варіант
Встановлена потужність електрообладнання, кВт	32,2	24,2
Кількість працівників, люд	2	2
Енергоозброєність праці, кВт/люд	16,1	12,1
Енерговитрати при виробництві продукції, кВт·год	68160,96	51226,56
Електроозброєність, кВт·год/люд	34080,48	25613,28
Енергоемність виробництва, кВт·год/т	9,09	6,83
Додаткові капітальні вкладення, тис. грн	-	103,880
Приріст прибутку, тис. грн	-	166,295
Строк окупності додаткових капітальних вкладень, років	-	0,62

ВИСНОВКИ

1 На основі проведеного аналізу був зроблений висновок про необхідність удосконалення існуючої системи керування електроприводом дробарки концентрованих кормів з метою зниження енерговитрат в процесі виробництва та покращення енергетичних і динамічних показників електроприводу.

2 На основі проведеного аналізу встановлено наступне: способами покращення енергетичних і динамічних показників електроприводу є збільшення економічності нерегульованого електроприводу, тобто перехід на енергозберігаючі двигуни з меншими втратами; перехід від нерегульованого електроприводу до регульованого; застосування спеціальних технічних засобів, які забезпечують мінімізацію впливу на енергетичні і динамічні показники електроприводу.

3 Проведені розрахунки потужності для електроприводу дробарки концентрованих кормів дозволили зробити висновок про необхідність заміни приводного двигуна потужністю 30 кВт двигуном меншої потужності 22 кВт.

4 На основі проведеного моделювання енергетичних і динамічних показників з використанням програми Matlab 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0 для двох електродвигунів: встановленого АИР180М4УПУ3 потужністю 30 кВт і рекомендованого АИР180S4УПУ3 потужністю 22 кВт отримані наступні кількісні показники:

– час розгону системи електродвигун-робоча машина на холостому ході збільшився з 8 с до 12,5 с;

– значно зменшилися амплітудні коливання пускового струму з 320 А до 260 А, що пов'язане зі зменшенням потужності електродвигуна, однак час дії пускових струмів збільшився при збільшенні часу розгону;

– амплітуда знакозмінних коливань електромагнітного моменту і значення максимального моменту також зменшилися і складають: для електродвигуна АИР180М2УПУ3: максимальне значення – 280 Н·м, мінімальне – (–160 Н·м), максимальний момент – 258 Н·м; для електродвигуна АИР180S2УПУ3: максимальне значення – 167 Н·м, мінімальне – (–80 Н·м), максимальний момент – 168 Н·м;

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		70

– температура електродвигунів при прийнятій початковій $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ збільшилася для встановленого електродвигуна до $22,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, для рекомендованого електродвигуна до $24,3\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– витрати енергії на здійснення технологічного процесу мають однаковий характер і, хоча визначаються різними максимальними значеннями, площі обмежені наведеними кривими мають однакове значення;

– електричні втрати в електродвигуні мають такий же характер зміни як і витрати енергії на виконання технологічного процесу.

Таким чином, спираючись на проведені розрахунки необхідної потужності приводного електродвигуна дробарки та приймаючи до уваги результати моделювання динамічних показників, можна зробити висновок про можливість та необхідність заміни встановленого приводного електродвигуна АІР180М2УПУЗ на рекомендований АІР180S2УПУЗ.

5 На основі проведеного моделювання динамічних показників приводного електродвигуна АІР180S2УПУЗ дробарки концентрованих кормів при керуванні з обмеженням швидкості зростання напруги з використанням програми MATLAB 6.12 і пакету прикладних програм Simulink 5.0 отримані наступні кількісні показники:

– при збільшенні постійної часу T від $0,01\text{ с}$ до 1 с зменшується величина пускових струмів, відсутні коливання струму в початковій зоні – від 0 с до $0,5\text{ с}$;

– при збільшенні постійної часу T значення електромагнітного моменту суттєво змінюються в початковій зоні. При збільшенні постійної часу знакозмінні складові моменту зникають і значення моменту в початковій зоні (до 1 с) значно зменшуються. В середині процесу пуску значення моменту при різних T несуттєво відрізняються. Однак зменшення знакозмінних моментів в початковій зоні призводить до збільшення часу пуску, що можна спостерігати при зміні моменту при максимальній T . Таким чином, подальше збільшення $T > 1,0\text{ с}$ буде призводити до суттєвого збільшення часу пуску і зменшення знакозмінних моментів в початковій зоні;

– кутова швидкість змінюється однотипово і майже не відрізняється при зміні швидкості зростання напруги. Розглядаючи характер зміни кутової швидкості можна зробити висновок про значне збільшення часу розгону систему ЕД-РМ при збільшенні постійної часу;

– температура електродвигуна змінюється однотипово з подальшим перетином в кінці розгону системи електродвигун - робоча машина. Загальне збільшення температури за період пуску складає 4,5 °С.

– значне усунення знакозмінних моментів з великою амплітудою та коливань пускового струму досягається при обмеженні швидкості зростання напруги з постійною часу, яка змінюється в діапазоні $0,1 \text{ с} < T < 0,5 \text{ с}$, подальше збільшення постійної часу призводить до незначних змін моментів в початковий період і до суттєвого збільшення часу розгону. Оскільки під час збільшення постійної часу значення струму практично не відрізняються, а час розгону збільшується, то можна казати про збільшення витрат енергії на виконання технологічного процесу.

6 Проведений аналіз надійності системи автоматизованого керування електроприводом дробарки концентрованих кормів дозволив отримати наступні показники надійності роботи системи: час напрацювання на відмову складає 1735 год., ймовірність безвідмовної роботи – 0,94.

7 Розрахунок техніко-економічних показників показав, що удосконалення системи керування електроприводом дробарки концентрованих кормів дозволило отримати приріст прибутку 166,295 тис. грн., а термін окупності додаткових капітальних вкладень складає 0,62 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: підручник / Є. Л. Жулай [та ін.]; За ред. Є. Л. Жулая. К. : Вища освіта, 2001. 288 с.
2. Механізація та автоматизація у тваринництві і птахівництві / О. С. Марченко, О. В. Дацішин, Ю. М. Лавріненко [та ін.] ; за ред. О. С. Марченка. К. : Урожай, 1995. 416 с.
3. Електропривод виробничих машин і механізмів: Навчальний посібник / О. Ю. Синявський, В. В. Савченко, В. Я. Бунько, В. Ю. Рамш; За ред. О. Ю. Синявського. К.: ФОП Ямчинський О.В., 2020. 444 с.
4. Регульований електропривод: Підручник / І. М. Голодний, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Л. С. Червінський, Д. А. Абдураманов, А. В. Торопов, О. В. Санченко; За ред. І. М. Голодного. К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. 509 с.
5. Чорний О. П., Толочко О. І., Титюк В. К., Родькін Д. Й., Чекавський Г. С. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2016. 302 с.
6. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник. Київ, НТУУ «КПІ», 2016. 150 с.
7. Голодний І. М., Червінський Л. С., Жильцов А. В., Санченко О. В. Романенко О. І. Моделювання регульованого електропривода: підручник. К.: Аграр Медіа Груп, 2019. 266 с.
8. Терёхин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. 292 с.
9. Квітка С.О. Поліпшування енергетичних і динамічних показників електроприводів сільськогосподарських машин з важкими умовами пуску / Проблеми та перспективи сталого розвитку АПК: зб. матер. міжнар. наук.-практ. конф. Мелітополь: ТДАТУ, 2015, Т.1, ч.4. С 3-5.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		73

10. Шебуняєв О. В., Квітка С. О. Моделювання енергетичних і динамічних показників асинхронних електроприводів сільськогосподарських машин / Матеріали III Міжнародної Інтернет-конференції студентів та магістрантів за підсумками наукових досліджень 2015 року «Проблеми механізації та електрифікації технологічних процесів». Мелітополь: ТДАТУ, 2016. Випуск III. С. 183-185.
11. Квітка С. О., Вовк О. Ю., Безменнікова Л. М., Квітка О. С. Методи управління та апаратна реалізація сучасних перетворювачів частоти. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Мелітополь: ТДАТУ, 2013. Вип. 13, Т. 2. С. 164-171.
12. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: підручник / Ладанюк А. П., Трегуб В. Г., Ельпірін І. В., Цюцюра В. Д. К.: Аграрна освіта, 2001. 224 с.
13. Квітка С. О. Силові електронні пристрої в системах керування: навчальний посібник для здобувачів вищої освіти. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. 180 с.
14. Квітка С. О., Постнікова М. В., Речина О. М. Основи електроприводу : лабораторний практикум, Ч.1. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. 165 с.
15. Постнікова М. В., Квітка С. О., Нестерчук Д. М. Основи електропривода : практикум, ч. 1. Мелітополь : Люкс, 2020. 259 с.
16. Корпорація АСКО-УКРЕМ 2024. Каталог. URL: https://www.acko.ua/e-store/xml_catalog/.
17. Компания "Электрострум". Автоматические выключатели. URL: <http://elektrostrum.com.ua/Avtomaticheskie-vyklyu-chateli>.
18. Компания "Электрострум". Пускатели магнитные ПМЛ. URL: <http://elektrostrum.com.ua/puskateli-PML>.
19. Компания "Электрострум". Электротепловые реле РТЛ. URL: <http://elektrostrum.com.ua/rele-RTL>.
20. Компания "Промфактор". Выключатели и переключатели концевые. URL: http://www.promfactor.com/?mode=vp_pp.

					21ЕМД.11260573.02.25.000000ПЗ	Арк
Зм	Аркцш	№ докум	Підпис	Дата		74

21. Компания "Промфактор". Выключатели и посты управления кнопочные. URL: <http://www.promfactor.com/?mode=button>.
22. Компания ООО "Завод Электротехнического Оборудования". Электродвигатели серии АИР. URL: <http://zeo.net.ua/Produkciya/Obschepromyshlennye/>.
23. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. Україна. Видання офіційне. Міненерговугілля України. Х.: Форт, 2017. 760 с.
24. НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок». Зі змінами 2000 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0011-98/ed20120213#Text>
25. ДНАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>
26. Плотніченко С. Р., Квітка С. О. Методичні вказівки для виконання розділу «Техніко-економічні розрахунки» дипломних проектів студентами енергетичного факультету за напрямом 6.100101 «Енергетика та електротехнічні системи в АПК» ОКР «Бакалавр» денної та заочної форми навчання. Мелітополь : ТДАТУ, 2018. 16 с.
27. Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК: підручник / Мартиненко І. І. [та ін.]. К., 2008. 330 с.