

## СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЄРА ЗЕРНОМЕТАЛЬНОЇ МАШИНИ

- БУРДІЛЬНА Є.В.** старший викладач кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: evburdilnaya@gmail.com;
- СЕРГІЄНКО С.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри систем автоматичного управління та електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com;
- ЧОРНИЙ О. П.** д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматичного управління та електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна, e-mail: ochornyi@ukr.net,

**Мета роботи.** Синтез системи автоматичного керування асинхронним електроприводом конвеєра зернометальника на базі перетворювача частоти з векторним керуванням.

**Методи дослідження.** Дослідження проводились із застосуванням методів математичного моделювання електроприводу; з використанням методів оптимізації налаштувань і синтезу регуляторів. В основі методики синтезу систем векторного керування лежить уявлення нестационарного багатозв'язаного об'єкта, яким є машина змінного струму, у вигляді деякої сукупності стаціонарних підоб'єктів з лінійними ланками в основних каналах регулювання.

**Отримані результати.** Проведено дослідження роботи системи підпорядкованого регулювання, що реалізує принципи векторного управління, орієнтованого по вектору потокозчеплення ротора. Виконано моделювання процесів збудження АД, пуску АД на холостому ході, накиди номінального навантаження, зниження швидкості. Встановлено, що синтезована система характеризується гарними якісними показниками. Перерегулювання при пуску не перевищує 5%, час регулювання становить 0,4 с, обмеження моменту здійснюється на заданому рівні. Доведено, що коливальні процеси в перехідних режимах із значними кидками моменту при класичних налаштуваннях контурних регуляторів можна компенсувати за рахунок введення штучних перехресних зв'язків в керуючу частину ЕП.

**Наукова новизна.** Реалізовано систему підпорядкованого регулювання АД конвеєра тримера зернометальника для завдання швидкості руху зернового потоку з метою можливості кидання зерна на задану відстань за рахунок створення відповідної балістичної траєкторії польоту, що забезпечує зниження збитків від пошкодження зерна.

**Практична цінність.** Запропонована структура системи векторного керування частотно-регульованого асинхронного електропривода з додатковими компенсуючими перехресними зв'язками між каналами регулювання активної й реактивної енергії для покращення якісних показників системи.

**Ключові слова:** зернометальні машини; електропривод конвеєра; векторне керування; регулювання швидкості; показники якості.

### І. ВСТУП

Післязбиральна обробка – один з найважливіших етапів при заготівлі зерна. Саме післязбиральною обробкою досягається той комплекс умов, який потрібен в конкретному випадку, адже для різних цілей умови можуть бути різними: зерно може бути фуражним, на помол в борошно, на насіння або для інших завдань. В агропромисловому комплексі важливе значення має вирішення питань, пов'язаних з підвищенням якості та зниженням витрат на післязбиральну обробку і зберігання зерна [1] – [2].

Аналізуючи схеми післязбиральної обробки зерна, що застосовується в даний час в більшості господарств, легко помітити, що найбільшу кількість операцій з післязбиральної обробки зернового вороху так

чи інакше пов'язане з його переміщенням, перелопачування або метанням, здійснюваних за допомогою спеціальних машин – зернокидачів. З попереднього аналізу найбільш поширених зернометальних машин на сучасних підприємствах та тих, що пропонують комерційні організації на ринках України, було обрано зернометальник ЗМ-60, 90 (рис. 1) [3] – [6].

На рис. 1 показано загальний вид зернокидача, з наступними позначеннями: 1 – рама з ходовою частиною; 2 – транспортер скребковий з двома живильниками; 3 – тример (метальник); 4 – електрообладнання; 5 – рамка поворотна; 6 – механізм самопересування.

Зернокидач може перекидати зерно на відстань до 14 метрів і забезпечує висоту складування до 5 метрів або завантаження зерна в транспортні засоби. Кидання зерна у транспортний засіб забезпечується

тримером. Тример являє собою конвеєр розміщений у напрямній трубі.

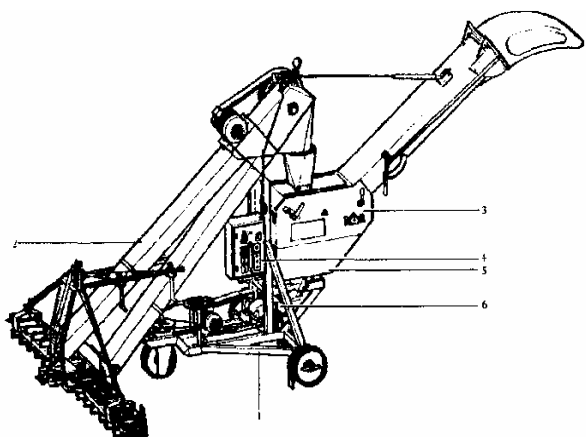


Рисунок 1. Загальний вид зернометальника

Можливість повороту тримера на  $180^\circ$  дає можливість забезпечувати безперервне навантаження зерна в транспортні засоби, формувати односторонній бурт після 2 проходів агрегату, рівномірно і тонким шаром розподіляти зерно на майданчику, швидко формувати зерно в бурти після просушування. Під час роботи скрепки зернокидача переміщують зерно до центру нижньої головки завантажувального транспортера, скрепки якого захоплюють його і подають в направляючий патрубков тримера. Переміщення зерна відбувається по конвеєрній стрічці, що розміщена у напрямній трубі. Спрямування руху потоку зерна здійснюється напрямним носиком, об який зерно вдаючись травмується та пошкоджується, що знижує його якість для подальшої переробки – з'являються сприятливі умови для розмноження мікроорганізмів, що вражають насіння і погіршують їх товарні та посівні якості.

Оскільки швидкість руху конвеєрної стрічки в існуючих моделях зернометальників є постійною, незалежно від відстані приземлення, зерно буде битися о носик з максимальною силою.

Очевидно, що зниження негативного впливу операцій післязбиральної обробки на зерно перспективніше всього домагатися модернізацією металевих машин чи принципів керування.

В [7] запропонована ідея кидання зерна на задану дальність за рахунок створення відповідної балістичної траєкторії польоту шляхом регулювання частоти обертання АД електроприводу конвеєра при живленні його від перетворювача частоти.

## II. МЕТА РОБОТИ

Синтез системи автоматичного керування асинхронним електроприводом конвеєра зернометальника на базі перетворювача частоти з векторним керуванням.

## III. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Рівняння траєкторії руху потоку зерна має вигляд [8]:

$$h = L \operatorname{tg}(\alpha) - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2(\alpha)} L^2,$$

де  $h, L$  – відповідно висота підйому і дальність польоту, м. З геометричних розмірів кут підйому напрямної труби тримера становить  $\alpha = 37,5^\circ$ .

Початкову швидкість польоту зерна знайдемо на підставі паспортних даних:

$$v_0 = \sqrt{\frac{Lg}{\sin(2\alpha)}} = \sqrt{\frac{14g}{\sin(2\alpha)}} = 11,9 \text{ м/с},$$

приймаючи, що така швидкість відповідає роботі АД при номінальній частоті й номінальній напрузі, розрахуємо залежності дальності при регулюванні частоти перетворювача.

З огляду на нелінійний характер залежності, визначено траєкторію польоту зерна залежно від різних значень частоти  $\nu$  (рис. 2).

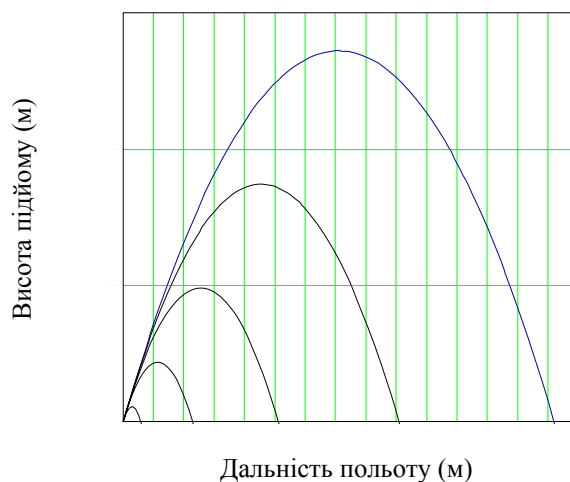


Рисунок 2. Траєкторії польоту зерна для ряду частот

Таким чином закон завдання на відносну частоту в залежності від відстані кидання зерна має вигляд:

$$L(\nu) = \frac{1}{g} \nu^2 \sin(2\alpha)$$

З вдосконаленням засобів регулювання і здешевленням перетворювальної техніки для механізмів з високими вимогами до динамічних і статичних характеристик намітилася тенденція до розширення сфери застосування електроприводів змінного струму на базі перетворювачів частоти з векторним керуванням [9] – [12].

В основі методики синтезу систем векторного керування лежить уявлення нестационарного багатозв'язаного об'єкта, яким є машина змінного струму, у вигляді деякої сукупності стаціонарних підоб'єктів з лінійними ланками в основних каналах регулювання [13] – [14].

Асинхронний двигун в осях координат, орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора  $\vec{\Psi}_r$ , може бути представлений в ортогональній системі координат системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \vec{U}_s = \vec{I}_s [R_s + (p + j\omega_k)L'_s] + (p + j\omega_k)K_r\vec{\Psi}_r, \\ \vec{U}_r = \vec{\Psi}_r \left[ \frac{K_r R_r}{L_m} + p + j(\omega_k - N\omega)L'_s \right] - K_r R_r \vec{I}_s, \end{cases} \quad (1)$$

де  $L'_s$  – перехідна індуктивність,  $K_r = \frac{L_m}{L_r}$ .

Розклавши рівняння (1) на дійсну і уявну частини і до визначивши їх рівняннями електромагнітного моменту і руху електроприводу, запишемо систему диференціальних рівнянь АД в координатах, орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора:

$$\begin{cases} U_{su} - K_r U_{ru} = I_{su} R' (1 + T_l' p) - \omega_k L'_s I_{sv} - \frac{K_r}{T_r} \Psi_{ru}, \\ U_{sv} - K_r U_{rv} = I_{sv} R' (1 + T_l' p) + \omega_k L'_s I_{su} + K_r N \omega \Psi_{ru}, \\ \Psi_{ru} = \frac{T_r U_{ru} + L_m I_{su}}{1 + T_r p}, \\ \omega_k = \frac{U_{rv} + R_r K_r I_{sv} + N \omega}{\Psi_{ru}}, \\ M = \frac{3}{2} N K_r \Psi_{ru} I_{sv}, \\ J p \omega = M - M_c, \end{cases} \quad (2)$$

де  $R' = R_s + K_r^2 R_r$ ;  $T_l' = \frac{L'_s}{R}$ ;  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ .

Для АД з короткозамкненим ротором приймаємо  $U_r = 0$ .

Така структура характеризується найменшим числом перехресних зв'язків, які підлягають компенсації, і простою реалізацією. Відповідна структурна схема АД представлена на рис. 3.

Виділимо з системи рівнянь (2) дві підсистеми, кожна з яких окремо описує канали передачі активної і реактивної енергії. Ці підсистеми містять внутрішні перехресні зв'язки, вплив яких рівносильно прикладенню координатних збурень до якихось фіктивних об'єктів, описуваних цими, умовно виділеними, групами рівнянь. У багатозв'язних системах прямі канали можна розглядати незалежно один від одного, якщо дію перехресних зв'язків вважати зовнішніми збуреннями, компенсувати системою управління.

Для реалізації векторного управління необхідно формувати багатофазну систему напруг (струмів), що подаються на статор асинхронної машини. Для цих цілей в даний час переважно застосовування в системах векторного керування АД отримали транзисторні перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією або стеженням за заданими значеннями фазних струмів, в яких використовуються релейні слідкуючі системи, що працюють в змінному режимі [15] – [18]. Такі перетворювачі можуть бути описані аперіодичною ланкою з малою сталою часу  $T_n$  і коефіцієнтом посилення  $K_n$ .

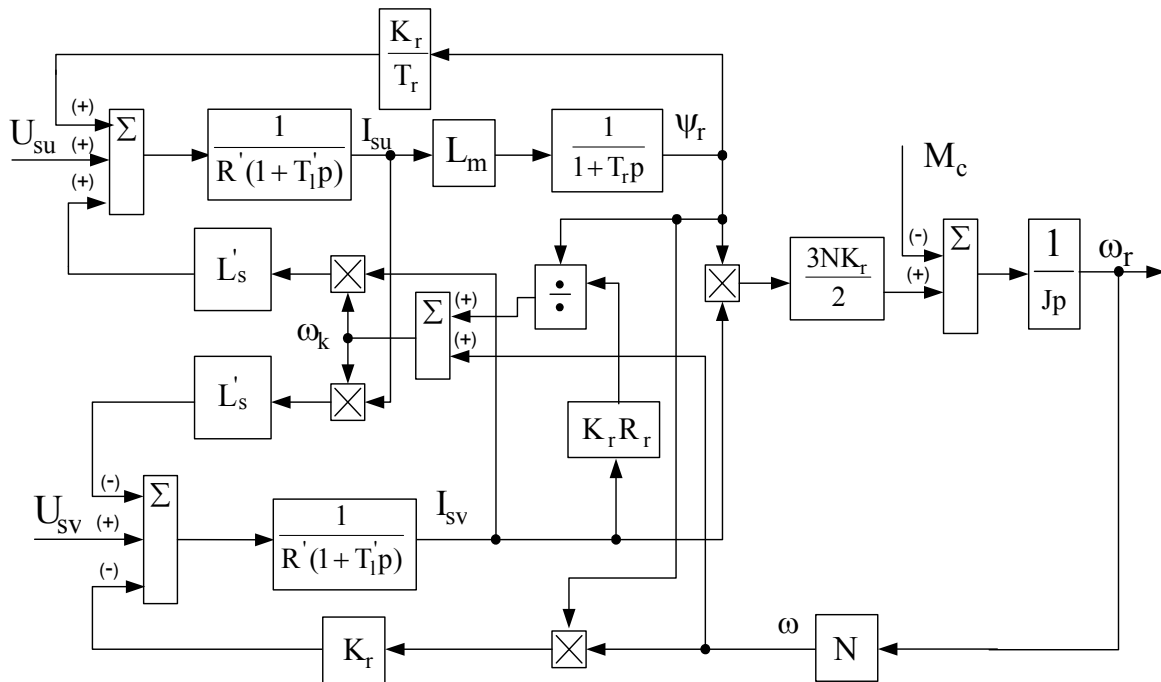


Рисунок 3. Структурна схема АД з короткозамкненим ротором в системі відліку, орієнтованої за вектором потокозчеплення ротора

З урахуванням вищесказаного перетворимо систему (2) до виду, вихідного для синтезу регуляторів. Доповнивши системи рівняннями перетворювача, отримаємо:

$$\begin{cases} p\Psi_{ru} = -\frac{\Psi_{ru}}{T_r} + \frac{L_m}{T_r} I_{su}, \\ pI_{su} = \frac{K_r}{T_r T_l' R'} \Psi_{ru} - \frac{I_{su}}{T_l'} + \frac{U_{su}}{R' T_l'}, \\ pU_{su} = -\frac{U_{su}}{T_n} + \frac{K_n}{T_n} u_y. \end{cases}$$

$$\begin{cases} p\omega = \frac{3NK_r}{2J} \Psi_{ru} I_{sv}, \\ pI_{sv} = -\frac{K_r \Psi_{ru}}{R' T_l'} \omega - \frac{I_{sv}}{T_l'} + \frac{U_{sv}}{R' T_l'}, \\ pU_{sv} = -\frac{U_{sv}}{T_n} + \frac{K_n}{T_n} u_y. \end{cases}$$

Зробимо розрахунок регуляторів і побудову системи підпорядкованого регулювання АД в осях координат орієнтованих по вектору потокозчеплення ротора.

Для контурів регулювання струмів і потокозчеплення використовується оптимізація по модулю. Контур швидкості налаштовується на симетричний оптимум.

ІІ регулятор реактивної складової струму статора має передавальну функцію:

$$W_{рег.с.р}(p) = \frac{T_l' R'}{2T_n K_n K_p} + \frac{R'}{2T_n K_n K_p p} \quad (3)$$

і забезпечує настройку внутрішнього контуру струму на модульний оптимум.

ІІ регулятор активної складової струму статора має таку ж передавальну функцію тільки з іншим коефіцієнтом зворотного зв'язку по струму.

$$W_{рег.с.а}(p) = \frac{T_l' R'}{2T_n K_n K_a} + \frac{R'}{2T_n K_n K_a p}, \quad (4)$$

де  $T_n$ ,  $K_n$  – стала часу і коефіцієнт підсилення перетворювача;

$K_p$ ,  $K_a$  – коефіцієнти зворотних зв'язків по реактивному і активному струмам відповідно.

Передавальна функція регулятора потокозчеплення буде:

$$W_{рег.пз}(p) = \frac{T_r K_p}{4T_n L_m K_\Psi} + \frac{K_p}{4T_n L_m K_\Psi p}, \quad (5)$$

де  $K_\Psi$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за потокозчепленням.

Всі інші параметри відомі з вищесказаного.

Передавальна функція регулятора швидкості має вигляд:

$$W_{рег.ш}(p) = \frac{JK_a}{4T_n K K_{ш}} + \frac{JK_a}{32T_n^2 K K_{ш} p}, \quad (6)$$

де  $J$  – момент інерції;

$K_{ш}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;

$K = \frac{3}{2} NK_r \Psi_{r\text{ин}}$  – коефіцієнт пропорційності між

активною складовою струму статора і електромагнітним моментом при постійному потоці.

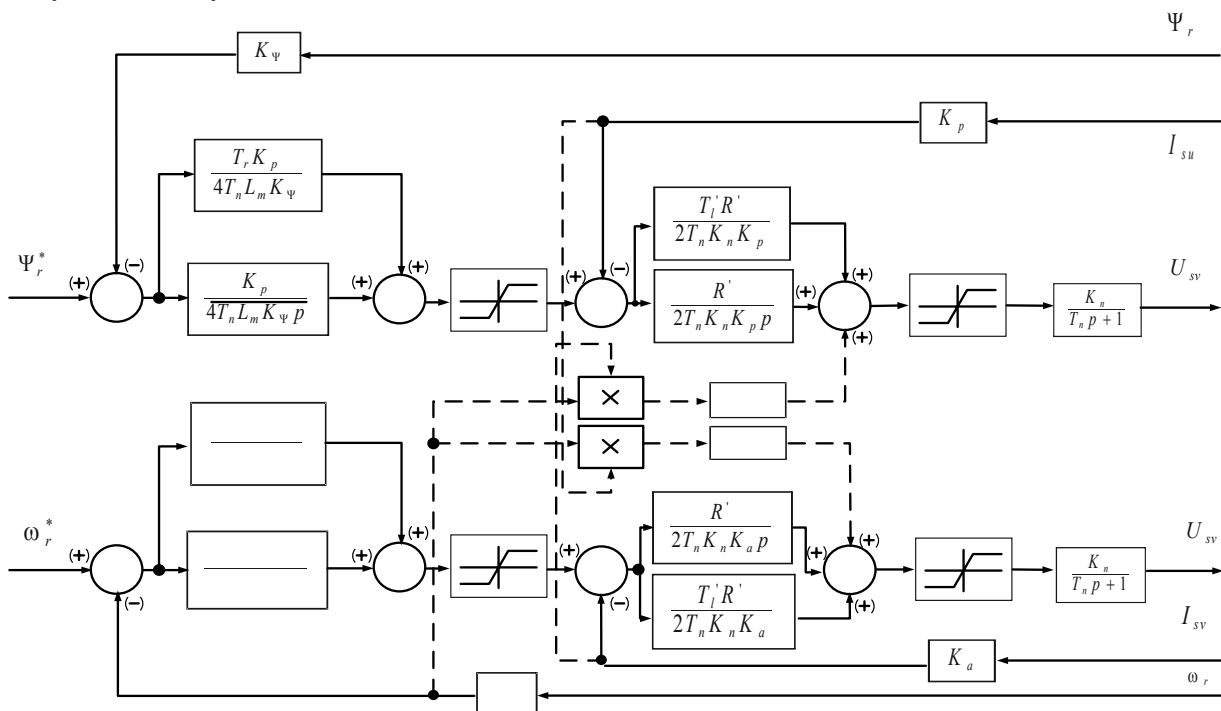


Рисунок 4. Структурна схема системи підпорядкованого регулювання

З рівнянь сталого режиму роботи АД знаходимо:

$$\Psi_{r_{\text{гун}}} \approx \frac{U_m}{\omega_0 \left( \frac{L'_s}{L_m} + K_r \right)},$$

$\omega_0$  – частота поля в зазорі машини,  $\omega_0 = 157 \text{ рад/с}$ ;

$U_m$  – амплітуда фазної напруги живлення.

У режимі ідеального холостого ходу стале значення реактивного струму статора визначимо як:

$$I_{r_{\text{гун}}} = \frac{\Psi_{r_{\text{гун}}}}{L_m}.$$

Знаходимо номінальний активний струм:

$$I_{svn} = \frac{2M_n}{3NK_r \Psi_{r_{\text{гун}}}}.$$

Розраховуємо коефіцієнти зворотних зв'язків за струмами, потокозчепленню і швидкості:

$$K_p = \frac{10}{2I_{svn}}; K_a = \frac{10}{2I_{svn}}; K_\psi = \frac{10}{\Psi_{r_{\text{гун}}}}; K_\omega = \frac{10N}{\omega_0}.$$

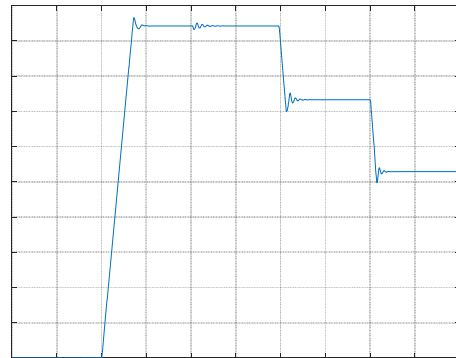
Структурна схема системи підпорядкованого регулювання, що реалізує принципи векторного управління, орієнтованого по вектору потокозчеплення ротора, приведена на рис. 4.

Дослідження якісних показників синтезованої системи з алгоритмами (3), (5) каналу управління потокозчепленням і (4), (6) каналу управління кутовою швидкістю ротора здійснювалося шляхом математичного моделювання для електроприводу з параметрами силової частини, наведеної в таблиці 1.

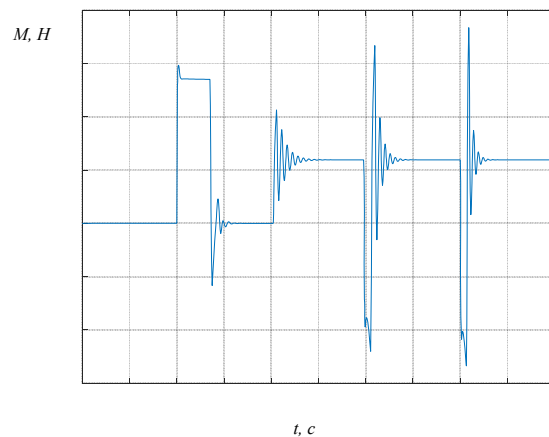
**Таблиця 1.** Параметри АД конвеєра тримера

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна потужність, кВт	$P_n$	5,5
Номінальна напруга, В	$U_n$	380
Синхронна швидкість, об/хв	$n_0$	1000
Номінальне ковзання, %	$s_n$	5,5
Номінальний ККД, %	$\eta_n$	80
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos(\phi_n)$	0,86
Перевантажувальна здатність	$\lambda_m$	2,2
Кратність пускового моменту	$\lambda_n$	2
Кратність мінімального моменту	$\lambda_{\text{min}}$	1,6
Кратність пускового струму	$k_i$	6,5
Активний опір статора, Ом	$R_s$	0,067
Активний опір ротора, Ом	$R_r$	0,11
Індуктивний опір статора, в.о.	$X_s$	0,072
Індуктивний опір ротора, в.о.	$X_r$	0,11
Індуктивний опір контуру намагнічування, в.о.	$X_\mu$	0,138

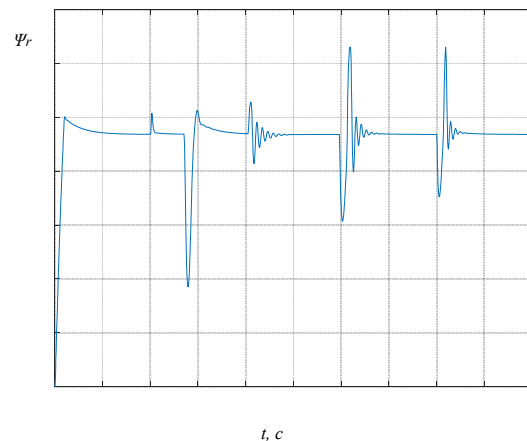
Моделювання проводилося для наступних процесів: збудження АД, пуск АД на холостому ході, накид номінального навантаження, зниження швидкості. Результати моделювання приведені на рис. 5–7.



**Рисунок 5.** Швидкість обертання ротора



**Рисунок 6.** Електромагнітний момент двигуна



**Рисунок 7.** Модуль потокозчеплення ротора

Як видно з графіків синтезована система володіє гарними якісними показниками. Перерегулювання при пуску не перевищує 5%, час регулювання становить 0,4 с, обмеження моменту здійснюється на заданому рівні. Однак в системі мають місце коливальні процеси в перехідних режимах із значними кидками моменту. Причому максимальна амплітуда моменту збільшується зі зменшенням швидкості. Це є наслідком впливу внутрішніх зворотних зв'язків.

Головними внутрішніми перехресними зв'язками є

$$\omega_k L'_s I_{sv}, \omega_k L'_s I_{su}, \omega_r N K_r \Psi_{r\text{ин}}$$

Вони зменшують запас стійкості системи при малих завданнях на швидкість і можуть привести до втрати стійкості в міру збільшення сигналу завдання на швидкість.

Перехресний зв'язок  $\omega_r N K_r \Psi_{r\text{ин}}$  при стабілізації потокозчеплення лінеаризується і його сигнал змінюється пропорційно швидкості двигуна, перетворюючись у зворотний зв'язок по ЕРС. При синтезі регуляторів швидкісного контуру нею нехтують аналогічно підходу, що застосовується в двигунах постійного струму.

Тому за допомогою штучних перехресних зв'язків, що вводяться в керуючу частину ЕП (пунктирні лінії на рис. 4), можна компенсувати дію природних перехресних зв'язків  $\omega_k L'_s I_{sv}$  та  $\omega_k L'_s I_{su}$  всередині об'єкта управління (АД). У такому випадку система стає стійкою, хоча сигнали компенсуючих зворотних зв'язків відхиляють настройки регуляторів від стандартних.

Коефіцієнти корегуючих зв'язків будуть такими:

$$K_{nua} = \frac{L'_s}{K_n K_u K_p}, K_{nup} = \frac{L'_s}{K_n K_u K_a}$$

Результати математичного моделювання такої системи наведено на рис. 8–10.

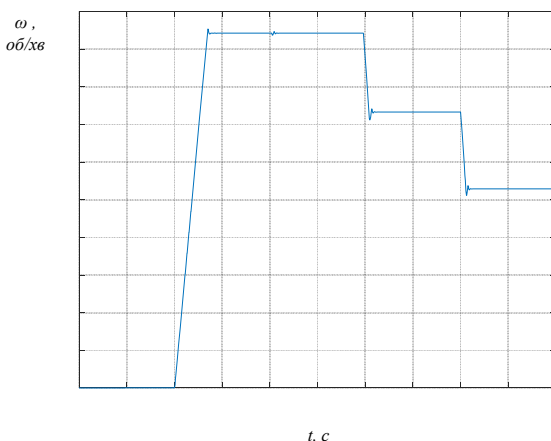


Рисунок 8. Швидкість обертання ротора

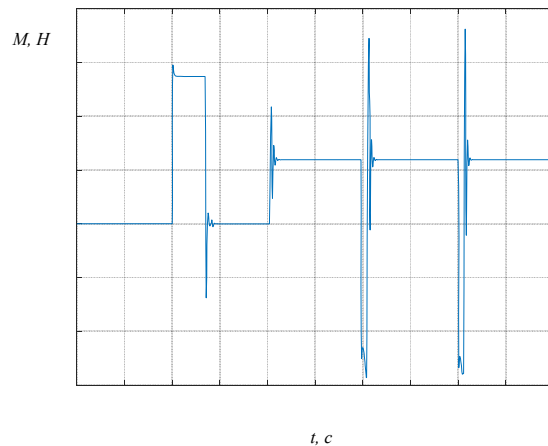


Рисунок 9. Електромагнітний момент двигуна

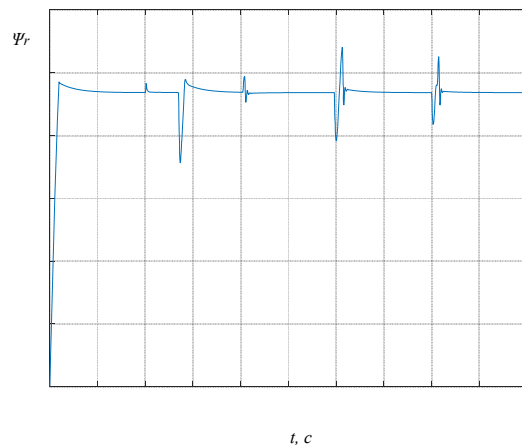


Рисунок 10. Модуль потокозчеплення ротора

#### IV. ВИСНОВКИ

Розрахунки дозволяють зробити висновок, що регулювання дальності закидання зерна можливо здійснювати зміною частоти напруги живлення на АД. При цьому пропорційно частоті знижується споживана потужність, що є більш ефективним способом регулювання ніж управління носиком напрямної труби тримера.

Використання системи векторного керування дозволяє отримати хороші регульовальні характеристики в широкому діапазоні регулювання швидкості, а модернізація систем підпорядкованого регулювання дозволяє при незначному ускладненні регуляторів (введення компенсуючих зворотних зв'язків) знизити коливальність перехідних процесів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Urbaniak Z. Wplyw mechanicznych uszkodzen na zdolnosc kielkowania ziarna i wschody pszenicy i jeczmenia / Z. Urbaniak // Biul. Inst. Hodowli Aklimat. Rosl. – 2004. – Т. 161. – PP. 23–34.

- [2] Скринник І. Ю. Механічне травмування зерна / І.Ю. Скринник, І.О. Пісарькова, М.М. Петренко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2008. – Вип. 48. – С. 143–153.
- [3] Шуханов С.Н. Обзор конструкций зернометательных машин / С.Н. Шуханов, А.Л. Токмакова // Вестник ИрГСХА. – 2013. – № 59. – С. 111–115.
- [4] Гольяпин В.Я. Машины и оборудование для послеуборочной обработки зерна: каталог / В.Я. Гольяпин, Э.В. Жалнин, В.Ф. Федоренко. – М.: ФГНУ Росинформагротех, 2003. – 202 с.
- [5] Ханхасаев Г.Ф. Классификация зернометательных машин / Г.Ф. Ханхасаев, С.Н. Шуханов // Техника в сельском хозяйстве: науч.-теорет. журн. – 2010. – № 4. – С. 42–44. – ISSN 0131-7105
- [6] <https://bim-agritech.com/uk/zernometalnyky-ta-zernonavantazhuvachi>
- [7] Бурдільна Є.В. Підвищення ефективності транспортування і перевантаження зерна металевими машинами сільськогосподарської техніки / Є.В. Бурдільна, С.А. Сергієнко // Priority directions of science and technology development. Proceedings of X International Scientific and Practical Conference Kyiv, Ukraine, 13-15 June 2021. – 2021. – С. 206–212.
- [8] Бурдільна Є.В. Синтез закону керування електроприводом вентилятора зернокидача для фокусування зернового потоку / Є.В. Бурдільна, О.П. Чорний, В.К. Титюк, С.А. Сергієнко // World Science journal. – 2021. – № 5 (66). – С. 4–13. doi: 10.31435/rsglobal\_ws/30052021/7584
- [9] Bin Wu. Other Multilevel Voltage Source Inverters / Wu Bin, Narimani Mehdi. – Wiley-IEEE Press. – 2017. – PP. 185–223.
- [10] Bouchiker S. Vector control of a permanent-magnet synchronous motor using AC-AC matrix converter / S. Bouchiker, G.-A. Capolino, M. Poloujadoff // IEEE Transactions on Power Electronics. – 1998. – Vol. 13. – Iss. 6. – PP. 1089–1099. DOI: 10.1109/63.728336.
- [11] Kumar Yerraguntla Shasi. Medium-Voltage Vector Control Induction Motor Drive at Zero Frequency Using Modular Multilevel Converter / Yerraguntla Shasi Kumar, Gautam Poddar // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65. – Iss. 1. – PP. 125–132. DOI: 10.1109/TIE.2017.2721927.
- [12] Vijayagopal M. Direct Predictive Current-Error Vector Control for a Direct Matrix Converter / M. Vijayagopal, C. Silva, L. Empringham, L. de Lillo // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34. – Iss. 2. – PP. 1925–1935. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2833495.
- [13] Слежановский О.В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
- [14] Рудаков В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением / В.В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Даргау. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1987. – 136 с.
- [15] Astrom K.J. Advanced PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund // ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society. – 2006. – 460 p.
- [16] Li Y. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art / Y. Li, K. Ang, G. Chong // Control Systems. – 2006. – Vol. 26. – PP. 41–54.
- [17] Vilanova R. Robust PI/PID controllers for load disturbance based on direct synthesis / R. Vilanova, O. Arrieta, P. Ponsa // ISA Transactions. – 2018. – Vol. 81. – PP. 177–196. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.07.040.
- [18] Errouissi R. Experimental Validation of a Novel PI Speed Controller for AC Motor Drives With Improved Transient Performances / R. Errouissi, A. Al-Durra, S.M. Muyeen // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2018. – Vol. 26. – Iss. 4. – PP. 1414–1421. DOI: 10.1109/TCST.2017.2707404.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2021

## СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ КОНВЕЙЕРА ЗЕРНОМЕТАЛЬНОЙ МАШИНЫ

- БУРДИЛЬНАЯ Е.В.** старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных систем Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: [evburdilnaya@gmail.com](mailto:evburdilnaya@gmail.com);
- СЕРГИЕНКО С.А.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: [serhiy.serhiyenko@gmail.com](mailto:serhiy.serhiyenko@gmail.com);
- ЧЕРНЫЙ А.П.** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета

имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина, e-mail: ochornyi@ukr.net,

**Цель работы.** Синтез системы автоматического управления асинхронным электроприводом конвейера зернометателя на базе преобразователя частоты с векторным управлением.

**Методы исследования.** Исследования проводились с применением методов математического моделирования электропривода; с использованием методов оптимизации настроек и синтеза регуляторов. В основе методики синтеза систем векторного управления лежит представление нестационарного многосвязного объекта, которым является машина переменного тока, в виде некоторой совокупности стационарных подобъектов с линейными звеньями в основных каналах регулирования.

**Полученные результаты.** Проведено исследование работы системы подчиненного регулирования, которая реализует принципы векторного управления, ориентированного по вектору потокосцепления ротора. Выполнено моделирование процессов возбуждения АД, пуска АД на холостом ходу, набросе номинальной нагрузки, снижения скорости. Установлено, что синтезированная система характеризуется хорошими качественными показателями. Перерегулирование при пуске не превышает 5%, время регулирования составляет 0,4 с, ограничение момента осуществляется на заданном уровне. Доказано, что колебательные процессы в переходных режимах со значительными бросками момента при классических настройках контурных регуляторов можно компенсировать за счет введения искусственных перекрестных связей в управляющую часть электропривода.

**Научна новизна.** Реализована система подчиненного регулирования АД конвейера триммера зернометателя для задания скорости движения зернового потока с целью возможности бросания зерна на заданное расстояние за счет создания соответствующей баллистической траектории полета, что обеспечивает снижение убытков от повреждения зерна.

**Практическая ценность.** Предложена структура системы векторного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода с дополнительными компенсирующими перекрестными связями между каналами регулирования активной и реактивной энергии для улучшения качественных показателей системы.

**Ключевые слова:** зернометальные машины; электропривод конвейера; векторное управление; регулирование скорости; показатели качества.

## VECTOR CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE OF GRAIN MACHINE CONVEYOR

BURDILNA E.V. Sen. Lect. of the Department of Automation and Information Systems of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: evburdilnaya@gmail.com;

SERHIYENKO S.A. Ph.D, Associate professor, Associate professor of the Department Systems of Automatic Control and Electric Drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: serhiy.serhiyenko@gmail.com;

CHORNYI O.P. Sci.D, Professor, Professor of the Department Systems of Automatic Control and Electric Drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine, e-mail: ochornyi@ukr.net,

**Purpose.** Synthesis of an automatic control system for an asynchronous electric drive of a grain thrower conveyor based on a frequency converter with vector control.

**Methodology.** The research was carried out using methods of mathematical modeling of an electric drive; using methods of tuning optimization and regulator synthesis. The technique of synthesis of vector control systems is based on the representation of a non-stationary multi-connected object, which is an AC machine, in the form of a set of stationary subobjects with linear links in the main control channels.

**Findings.** The study of the work of the subordinate regulation system, which implements the principles of vector control, oriented along the vector of the rotor flux linkage, was carried out. The modeling of the processes as AM excitation, AM start-up at idle speed, nominal load surge, speed reduction was performed. It was found that the synthesized system was characterized by good quality indicators. The overshoot at start does not exceed 5%, the regulation time is 0.4 s, the torque limitation is carried out at a predetermined level. It is proved that oscillatory processes in transient modes with significant torque surges with classical settings of loop regulators can be compensated by introducing artificial cross-links into the control part of the electric drive.

**Originality.** A system of subordinate regulation of the speed of the grain flow of the grain thrower trimmer conveyor was implemented to set the speed of the grain flow with the aim of throwing grain at a given distance by creating an appropriate ballistic flight trajectory, which ensures a reduction in losses from damage to grain.



**Practical value.** The structure of the vector control system of a frequency-controlled asynchronous electric drive with additional compensating cross-connections between active and reactive energy control channels is proposed to improve the quality indicators of the system.

**Keywords:** grain-throwing machines; conveyor electric drive; vector control; speed regulation; quality indicators.

## REFERENCES

- [1] Urbaniak, Z. (2004). Wplyw mechanicznych uszkodzen na zdolnosc kielkowania ziarna i wschody pszenicy i jeczmenia. *Biul. Inst. Hodowli Aklimat. Rosl.*, 161, 23–34. (in Polish).
- [2] Skrinnik, I.Yu., Pissar'kova, I.O., Petrenko, M.M. (2008). Mekhanichne travmuвання зерна [Mechanical injury of grain]. *Design, manufacture and operation of agricultural machinery*, 48, 143–153. (in Ukrainian).
- [3] Shuhanov, S.N., Tokmakova, A.L. (2013). Obzor konstruksiy zernometatel'nykh mashin [Overview of grain throwing machine designs]. *Bulletin of IrG-SKhA*, 59, 111–115. (in Russian).
- [4] Gol'tyapin, V.Ja., Zhalnin, Je.V., Fedorenko, V.F. (2003). Mashiny i oborudovanie dlya posleuborochnoy obrabotki zerna: katalog [Machines and equipment for post-harvest grain processing: catalog]. M.: FGUN Rosinformagroteh, 202. (in Russian).
- [5] Khankhasaev, G.F., Shukhanov, S.N. (2010). Klassifikatsiya zernometatel'nykh mashin [Grain throwing machine classification]. *Agricultural machinery*, 4, 42–44. (in Russian).
- [6] <https://bim-agritech.com/uk/zernometalnyky-ta-zernonavantazhuvachi>
- [7] Burdilna, E.V., Serhiienko, S.A. (2021). Pidvishchennya efektyvnosti transportuvannya i perevantazhennya zerna metal'nymi mashinami sil'skogospodars'koi tekhniki [Improving the efficiency of transportation and reloading of grain with metal machines of agricultural machinery]. *Priority directions of science and technology development. Proceedings of X International Scientific and Practical Conference Kyiv, Ukraine, 13-15 June 2021*, 206–212. (in Ukrainian).
- [8] Burdilna, E.V., Chornyi, O.P., Tytiuk, V.K., Serhiienko, S.A. (2021). Sintez zakonu keruvannya elektropivodom ventilyatora zernokidacha dlya fokusuвання zernovogo potoku [Synthesis of the law of control of the electric drive of the fan of the grain thrower for focusing of a grain stream]. *World Science journal*, 5, 66, 4–13. DOI: 10.31435/rsglobal\_ws/30052021/7584. (in Ukrainian).
- [9] Wu, B., Mehdi, N. (2017). *Other Multilevel Voltage Source Inverters*. Wiley-IEEE Press, 185–223.
- [10] Bouchiker, S., Capolino, G.-A., Poloujadoff, M. (1998). Vector control of a permanent-magnet synchronous motor using AC-AC matrix converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13, 6, 1089–1099. DOI: 10.1109/63.728336.
- [11] Yerraguntla, Shasi Kumar, Gautam, Poddar (2018). Medium-Voltage Vector Control Induction Motor Drive at Zero Frequency Using Modular Multilevel Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65, 1, 125–132. DOI: 10.1109/TIE.2017.2721927.
- [12] Vijayagopal, M., Silva, C., Empringham, L., Lillo, L. (2019). Direct Predictive Current-Error Vector Control for a Direct Matrix Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34, 2, 1925–1935. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2833495.
- [13] Slezhanovskij, O.V., Dackovskij, L.H., Kuznetsov, I.S. et al. (1983). Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektropivodov peremennogo toka s ventil'nymi preobrazovatelyami [Slave control systems for AC drives with valve converters]. M.: Energoatomizdat, 256. (in Russian).
- [14] Rudakov, V.V., Stolyarov, I.M., Dartau, V.A. (1987). Asinkhronnye elektropivody s vektornym upravlenim [Asynchronous electric drives with vector control]. L.: Energoatomizdat, 136. (in Russian).
- [15] Astrom, K.J., Hagglund, T. (2006). Advanced PID control. *ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society*, 460.
- [16] Li Y., Ang, K., Chong, G. (2006). Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. *Control Systems*, 26, 41–54.
- [17] Vilanova, R., Arrieta, O., Ponsa, P. (2018). Robust PI/PID controllers for load disturbance based on direct synthesis. *ISA Transactions*, 81, 177–196. DOI: 10.1016/j.isatra.2018.07.040.
- [18] Errouissi, R., Al-Durra, A., Muyeen, S.M. (2018). Experimental Validation of a Novel PI Speed Controller for AC Motor Drives With Improved Transient Performances. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26, 4, 1414–1421. DOI: 10.1109/TCST.2017.2707404.