

УДК 621.3.072.85

## АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВИКОНАННЯ РУШАННЯ ТА ПУСКУ ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

**ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: 34092@ukr.net;

**ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедри системи автоматичного керування і електроприводу Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Мета роботи.** Виконати аналіз чинних систем автоматизованого керування електропривода і методів формування моменту пуску для визначення відповідності обраної системи і метода до вимог щодо виконання безаварійного режиму рушання та пуску технологічного механізму в важких умовах або рушання та пуску під навантаженням.

**Методи дослідження.** Порівняння енергетичних показників і можливостей систем і методів керування щодо формування пускового моменту, математичні розрахунки, аналіз властивостей систем і методів відповідно до вимоги виконання технологічних операцій під час рушання.

**Отримані результати.** Для отримання результатів аналізу чинних способів пуску асинхронних двигунів було розглянуто автотрансформаторний пуск, що дозволяє значно знизити пусковий струм, також застосовується підключення конденсатора з реактивним опором для зниження струму й підвищення пускового моменту. Застосування плавного пуску з амплітудно-фазовим управлінням дозволяє зменшити пусковий струм і досягти відсутності його імпульсів. Векторно-імпульсний спосіб управління перетворюючи пристроєм збільшує пусковий момент при відсутності збільшення пускового струму, такі переваги має квазічастотний режим пуску, але застосування обмежене спеціальним технологічним обладнанням. Тиристорний регулятор напруги зі застосуванням фазового методу керування, незважаючи на поширене застосування в системах курування, має низьке значення пускового моменту. Для виконання рушання у важких умовах, за результатами виконаного аналізу наявних систем керованого пуску, встановлено, що раціональною системою електропривода для підіймально-транспортних механізмів є система частотно-регульованого електропривода, за схемою «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ – АД).

**Наукова новизна.** Вперше пропонується вдосконалення чинних систем керування підіймально-транспортних механізмів, що виконують пуск у важких умовах при застосуванні режимів рушання з формування пускового моменту, що перевищує паспортне значення в 3-4 рази. Збільшення енергоефективності на основі підвищення їх ефективності, інформативності та вірогідності даних. Вперше проаналізовані причини недоліків чинних систем керування під час пуску під навантаженням в сучасному виробництві.

**Практична цінність.** Обґрунтовано вибір раціональної системи електропривода для підіймально-транспортних механізмів при виконанні рушання у важких умовах, що забезпечить максимальні зусилля в трансмісії технологічного механізму з допустимими струмовими і тепловими перевантаженнями асинхронних машин.

**Ключові слова:** автотрансформаторний пуск; амплітудно- фазове управління; векторно-імпульсне управління; квазічастотний режим; тиристорний регулятор .

### I. ВСТУП

Від сучасних підприємств вимагається застосування нових підходів для впровадження і забезпечення виконання програм енергоресурсозбереження. Водночас актуальною проблема високої аварійності електроустановок, що визначає одну зі складових витрат під час реалізації конкретних енергетичних програм. Однією з причин аварійності є відмова електротехнічного обладнання в процесі пуску, яка пояснюється відсутністю керованості процесом рушання як складової пуску.

Значна частина загальнопромислових і сільсько-

господарських механізмів має початковий момент опору технологічного агрегату під час переходу електромеханічної системи з нерухомого стану у стан руху (момент рушання), такий, що перевершує паспортне значення пускового моменту. Цей процес супроводжується зміною сил і моментів опорів за певними фізико-механічними законами, що обумовлені роботою сил тертя в кінематичних парах технологічного механізму, в ущільненнях, а також у зоні взаємодії робочого органа з технологічним середовищем [1], [2].

У науковій літературі питання пуску технологічних механізмів розглядається з позиції, коли електропривод і кінематичний ланцюг уже прийшли в рух.

Існує ряд технологічних механізмів, які за певних умов експлуатації мають нелінійну залежність моменту тертя і характеризуються рушенням електропривода у важких умовах [3]. До них належать підйомально-транспортні механізми, які виконують підйомання габаритних вантажів, такі як перевантажувачі на залізо транспортних об'єктах, підйомачі, на поромках, у порту та ін.

## II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Формування моменту опору в процесі рушення і руху – специфічне і складне явище. Момент опору складається із сил, які формуються під час переходу електромеханічної системи від нерухомого стану до стану руху, за певними законами враховують нерівномірне формування сил тертя в підшипниках, ущільненнях, ходовій частині механізму і передачах, у тому числі зміни властивостей робочого органа під впливом технологічного середовища.

Сучасні системи управління не враховують усього комплексу чинників, які є джерелом аварійності обладнання в процесі рушення, пуску та гальмування:

- збільшення моменту опору під час рушення та пуску сприяє збільшенню динамічної складової зусилля в кінематичних вузлах системи «електродвигун–трансмсія– технологічний механізм» і, унаслідок цього, механічному зношуванню обладнання;

- режими стопоріння під час пуску та руху робочого органа двигунів змінного струму, унаслідок цього, призводить до зношування ізоляційних матеріалів, теплового і механічного перенапруження в пускових і демпферних обмотках, порушення балансування ротора та ін.;

- зниження напруги на шинах підстанції під час пуску потужних двигунів призводить до нестандартних умов пуску та перегрівання електричних машин, неприпустимих умов експлуатації інших споживачів;

- важкі умови рушення та пуску призводять до перевантажень і зменшення працездатності ліній живлення.

В умовах експлуатації технологічного обладнання з порушенням режимів роботи систем використовують трудомісткі небезпечні технологічні операції (ручний пуск робочих машин з незначними часом роботи, формуючи таким чином крок за кроком режим руху, неодноразові спроби пуску та реверсу робочого органа та ін.), що призводить до підвищення аварійності та до додаткового зношування технологічного й електричного обладнання [4].

На сьогодні інтенсивний розвиток мікросхемотехніки і унаслідок цього широкий вибір різноманітних елементів контролю технологічного процесу (датчики зусиль, датчики моменту та ін.) дозволяють побудувати автоматизовану систему з миттєвим контролем параметрів усього технологічного комплексу, з розрахунком параметрів джерела живлення електропривода і формування таких режимів роботи, які забезпечили

б необхідні вимоги виконання якісного технологічного процесу.

Застосовувані технічні рішення повинні забезпечувати необхідну якість технологічного процесу з мінімальним споживанням електроенергії та зниженням експлуатаційних витрат завдяки застосуванню сучасних методів і засобів автоматизації.

Майже всі провідні теоретики електромеханіки розглянули та запропонували способи виконання пуску електроприводів під навантаженням і без нього, з обмеженням пускових струмів і достатнім пусковим моментом.

Тому актуальним питанням є визначення відповідної системи електропривода для виконання безаварійного і ефективного режиму рушення та пуску підйомально-транспортних механізмів.

## III. МЕТА РОБОТИ

Порівняння енергетичних показників і можливостей систем і методів керування щодо формування пускового моменту, математичні розрахунки, аналіз властивостей систем і методів відповідно до вимоги виконання технологічних операцій під час рушення.

## IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Способи пуску з обмеженням пускових струмів з використанням додаткових активних, реактивних та індуктивних опорів, зі зміною або ускладнення кін комутації може призвести до зниження пускового моменту [5]. Схема автотрансформаторного пуску АД надає можливість збільшити пусковий момент, однак підвищує складність пускових операцій, підвищує вартість і зменшує надійність пускової апаратури [6].

Симетричне або однофазне послідовне підключення до обмоток статора конденсатора з реактивним опором  $X_c = 1/(\omega C)$  дозволяє підвищити пусковий момент, який визначається зі співвідношення:

$$\frac{M'_n}{M_n} = \frac{1 - 2b \sin \phi_k}{1 - 4b \sin \phi_k + 4b^2}, \quad (1)$$

де  $b = -1/3 \cdot X_c / Z_k$ ;  $Z_k$  – опір короткого замикання;  $\phi_k$  – фазовий кут у разі короткого замикання.

Недоліком способу є ступінчастий характер регулювання пускового моменту і необхідність додаткового комутаційного обладнання. Окрім того, зі збільшенням потужності двигуна збільшується необхідна потужність конденсаторних елементів [7].

У роботах [8], [9] запропонований спосіб пуску АД у важких пускових умовах із заздалегідь включеними конденсаторами в колах статора. Конденсатори збільшують коефіцієнт потужності системи, знижують струми лінії та посадку напруги під час пуску, надають можливість підвищувати пусковий момент і формувати необхідні характеристики АД. До недоліків способу слід віднести дискретний характер фор-

мування пускових характеристик, необхідність використання додаткового комутаційного обладнання. Удосконалення систем керованого плавного пуску здійснюється за допомогою розробки тиристорних схем, які поступово збільшують ефективне значення напруги на статорі в процесі пуску. Недоліком таких схем є неможливість формування пускових характеристик електропривода під час значних моментів рушання [10]-[12].

За даними фірми Schneider Electric, пристрої плавного запуску цієї фірми забезпечують формування пускових характеристик і плавний запуск електропривода в режим «повновольтажного байпасного старту» зі значним моментом рушання. Недоліком такого способу запуску є неможливість отримання пускового моменту двигуна, вищого за його номінальне значення [13].

Деякі системи тиристорного плавного пуску для підвищення пускового моменту двигуна забезпечують поетапне підвищення напруги (і моменту) на самому початку рушання з подальшим переходом на звичайний плавний пуск з експоненціальним характером зростання напруги живлення [14]. Недолік способу, як і в попередньому випадку, полягає в неможливості отримання пускового моменту АД, що перевищує каталожні значення.

У роботі [15] розглянуто векторно-імпульсний спосіб пуску АД із застосуванням повністю керованих силових елементів, коли підключення обмоток статора відбувається за певних початкових умов, які забезпечують появу першої напівхвилі перехідного моменту позитивного знаку. Відключення статора від мережі повинно відбуватися до того, як перехідний момент буде негативний. При цьому перехідний момент поєднується з основним і збільшує середній момент АД без збільшення струму статора. Недоліком способу є складність його реалізації, яка передбачає визначення початкових електромагнітних умов, тобто визначення кута між векторами напруги статора і потікозчеплення ротора для підключення обмоток статора за певного значення цього кута [15].

Для спрощення схеми і зменшення собівартості пускового пристрою в роботі [16] запропонований векторно-імпульсний спосіб керування з включенням обмоток статора в зірку через трифазний випрямний міст і один силовий ключ IGBT, що комутує обмотки статора на стороні постійного струму. Недоліками способу є неможливість застосування двигунів, обмотки яких з'єднані в трикутник, необхідність наявності на затискачах двигуна всіх початків і кінців фазних обмоток, що рідко виконується у АД середньої та великої потужності.

У роботі [17] запропонований квазічастотний режим пуску АД, у якому в системі «тиристорний перетворювач напруги-асинхронний двигун» з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю в процесі розгону здійснюється модуляція струму статора АД за частотою і амплітудою напруги живлення так, щоб

забезпечити зміну кута відкриття тиристора залежно від значень частоти струму ротора, що дозволяє зменшити пускові витрати на сучасному силовому обладнанні з незначними капітальними витратами. Недоліком способу є вузька сфера застосування, яка обумовлена орієнтованістю методу на механізми з незначним моментом статичного опору, який не перевищує допустимого.

Використання для керованого пуску різних схем симетричних і несиметричних напівпровідникових перетворювачів як для фазового, так і для імпульсного керування в роторних колах описано [7], [12]. Основним недоліком способів пуску з використанням роторних кіл АД, а також способів пуску, які передбачають комбіноване управління статорними та роторними колами, є необхідність застосування асинхронної машини спеціальної конструкції, яка дорожча і складніша в експлуатації.

Для початку руху та пуску некерованим електроприводом технологічних механізмів застосовують пристрої плавного пуску, принцип дії яких ґрунтується на тому, що механічний момент, що розвивається електродвигуном, пропорційний квадрату прикладеної до нього напруги. Підвищуючи напругу від початкового зниженого рівня (опорної напруги) до максимально можливого, необхідно плавно запустити та розігнати електродвигун до його номінальних оборотів. Традиційні пристрої плавного пуску (ППП) використовують амплітудні-фазові методи керування і тому здійснюють запуск обладнання в холостому або слабко навантаженому режимі.

На відміну від ППП контролери ЕнерджіСейвер використовують фазові методи керування і тому здатні запускати електроприводи, що характеризуються важкими та дуже важкими пусковими режимами «номінал у номінал». Контролери ЕнерджіСейвер дозволяють робити запуски частіше, ніж традиційні ППП, а також мають убудований режим енергозбереження і корекції коефіцієнта потужності [17].

Цей пристрій за принципом роботи є тиристорним регулятором напруги. Для керованого пуску та гальмування використовують три основні способи:

– керування напругою. Система задає початкову напругу та необхідну тривалість пуску. Система ТПН-АД при цьому не контролює струм або момент двигуна, тому цей спосіб непридатний для електроприводів з важким пуском;

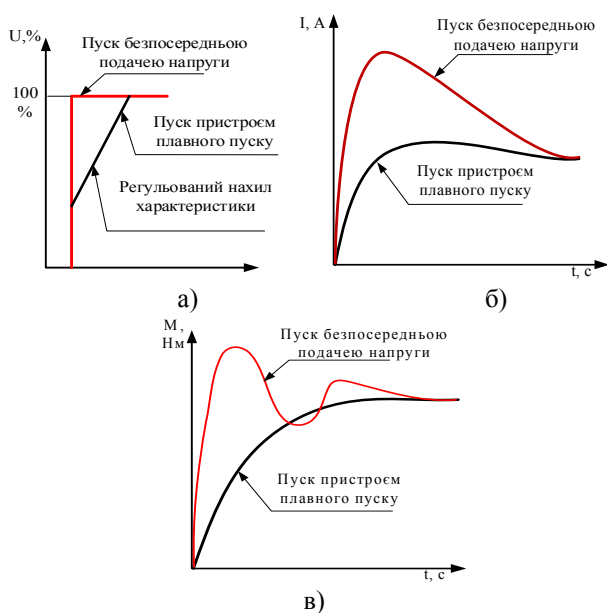
– керування струмом. Цей спосіб заснований на збільшенні напруги, припиняється з досягненням струмом заданої межі, і далі струм утримується на цьому значенні до закінчення розгону двигуна. Недоліком способу є зміна прискорення в процесі розгону так само, як із застосуванням способу керування напругою;

– керування моментом. Це найбільш складний і досконалий спосіб. Він використовує замкнуту за моментом систему регулювання, що дозволяє отримати лінійний графік зміни швидкості двигуна. При цьому

способи керування прискорення та уповільнення електропривода може залишатися постійним навіть зі зміною навантаження в широких межах [17].

Тому можливо реалізувати лінійний характер збільшення швидкості для широкого класу механізмів. Необхідно зазначити, що пристрій дозволяє також реалізувати контрольований процес гальмування (зупинки) механізму.

На рис. 1. показані головні відмінності між пуском безпосередньою подачею напруги і пуском пристроєм плавного пуску щодо напруги на двигуні, струму двигуна та його моменту. Основним недоліком пристроїв плавного пуску на основі тиристорних регуляторів напруги є мале значення початкового пускового моменту двигуна ( $0,1-1,0 M_{ном}$ ). Це може створити проблеми для забезпечення пуску механізмів зі значним моментом опору під час рушання з місця. Незважаючи на широкий спектр можливості системи ТПН-АД, вона не здатна забезпечити виконання передпускової підготовки та можливість рушання електропривода у важких умовах пуску [1].



**Рисунок 1.** Часові залежності напруги (а), струму статора (б) і моменту двигуна в різних видах пуску (в)

Усі названі способи забезпечують пуск з можливістю створення достатнього пускового моменту. Однак жоден зі способів не передбачає варіант виконання передпускової підготовки, коли рушання та пуск технологічного механізму здійснюється у важких умовах або під навантаженням.

Однак на базі системи ТПН-АД з використанням спеціально розробленого алгоритму визначення параметрів роботи ТПН для створення досить великого пускового моменту асинхронного двигуна можна забезпечити виконання передпускової підготовки, рушання та пуску у важких умовах електропривода тех-

нологічної установки.

Квазічастотне керування (КЧК) асинхронним двигуном поєднує в собі принципи частотного та параметричного способів керування, дозволяє ефективно використовувати його для формування необхідних режимів під час рушання і на початковому етапі запуску. Необхідна форма механічних характеристик електропривода під час керованого рушання забезпечується можливістю використання КЧК завдяки завданню двох параметрів: частоти основної гармоніки напруги живлення і кута відкривання тиристорів. Виконання передстартової підготовки [14] електромеханічної системи починається з тестування та визначає наявність можливості пуску двигуна.

Запропонований алгоритм квазічастотного керування рушанням використовується тільки на період виконання рушання та пуску для нерегульованого електропривода. Виконується також обчислення параметрів формування пускового моменту  $M(t, a, f')$ .

У цій ситуації можливі два альтернативні варіанти модернізації нерегульованих електроприводів піддільно-транспортних механізмів:

- використання традиційних систем «soft-start» з розширеними функціональними можливостями передстартової підготовки внаслідок забезпечення підвищеного пускового моменту двигуна із частотою обертання  $\omega \approx (0,05-0,1)\omega_{ном}$  або формування крокового режиму з імпульсним характером моменту двигуна;

- упровадження частотно-регульованих електроприводів, що дозволяють реалізувати не тільки передстартову підготовку, а і забезпечити необхідні динамічні характеристики електроприводів під час розгону та гальмування, мінімізувати коливання підвищеного вантажу, підвищити точність позиціонування механізмів підймання і пересування, енергетичну ефективність електромеханічної системи.

Регулювання напруги та частоти для забезпечення необхідного в пусковому режимі закону зміни параметрів електроенергії дозволяє формувати характеристики АД для широкого кола технологічних механізмів з різноманітними механічними характеристиками. Основний недолік частотного пуску полягає в тому, що для нерегульованих електроприводів використання перетворювачів частоти недоцільне внаслідок значних капітальних витрат.

Сучасний перетворювач частоти виконується з ланкою постійного струму і вихідним інвертором на базі IGBT транзисторів. Вони є завершеним комплексним пристроєм, призначеним для створення регульованого асинхронного електропривода і вирішення завдань плавного пуску та гальмування, регулювання моменту, швидкості двигуна і технологічних параметрів. Поряд із завданнями регулювання, пристрій вирішує завдання захисту, блокування та діагностики електропривода. Застосування сучасних силових модулів, мікропроцесорної техніки та складного програ-

много забезпечення робить пристрій досить дорогим продуктом. Основна перевага – це високий пусковий момент (1,5–1,8  $M_n$ ) і можливість формування плавного збільшення і зниження швидкості за попередньо заданим законом.

Як зазначено вище, система керування електроприводом, повинна виконувати не тільки передпускову підготовку для приведення технологічної установки до руху, рушання та пуску, а також і керуваність усієї технологічної операції [18].

Організація передпускової підготовки із застосуванням простих законів частотного керування дозволяє не тільки підвищувати пускове значення моменту АД, а й забезпечувати необхідну інтенсивність його збільшення. Унаслідок зміни співвідношення амплітуди та частоти напруги живлення  $k_U = (k_f)I/\beta$ , де  $k_f = f/f_{1nom}$  – коефіцієнт, що враховує зниження частоти  $f_1$  основної гармоніки напруги відносно до номінальної частоти напруги живлення  $f_{1nom}$ ;  $k_U = U_1/U_{1nom}$  – напруга на статорі, подана в частках до номінальної;  $\beta$  – коефіцієнт, що визначає величину моменту АД і змінюється в діапазоні  $\beta = 1 \dots k$  за законом  $\beta_n = \beta + 0,1n$ , де  $n$  – номер спроби рушання;  $k$  – кількість спроб рушання.

Отже, пусковий момент  $M_{п}$  збільшується на значення  $\Delta M_{п}$  й інтенсивність збільшується формується за законом  $M_{пi} = M_{пi-1} + \Delta M_{п}$ .

Однак не всі можливості системи керованого рушання на базі ПЧ–АД застосовуються для деяких технологічних механізмів (конвеєрних ліній, підйомно-транспортних механізмів).

Для основних законів частотного керування характерні такі припущення: напруга симетрична та синусоїдальна; характеристика намагнічування двигуна лінійна або шматково-лінійна ( $X_c = const$  з регулюванням  $\Psi$  у невеликих межах); ефект витіснення струму відсутній; активний опір ланцюга намагнічування приймається рівним нулю  $R_{ин} = 0$ . Отже, отримані закони не враховують зміни електромагнітних параметрів асинхронної машини зі зниженням частоти напруги живлення і, унаслідок цього, вибрані параметри керування під час роботи на зниженій частоті неефективні, що призводить до збільшення втрат, перегрівання та зношування устаткування.

Іншим недоліком наведеного вище методу виконання рушання та пуску є наявність значних пускових струмів, хоч і обмежених частотними засобами керування, але істотних у разі зниження частоти напруги живлення під час досить тривалого часу рушання та пуску. Результати аналізу систем пуску асинхронного привода зведено до табл. 1

Отже, на сьогодні завдання виконання передпускової підготовки з можливістю створення пускового моменту, що перевищує паспортне номінальне значення в кілька разів, з визначенням реальних параметрів асинхронної машини, що забезпечують вибір адекватних параметрів напруги живлення з контролем

режимів роботи електропривода і завдання підвищення керованості виконання рушання та пуску, досить актуальні для підйомально-транспортних машин.

Таблиця 1. Характеристики способів пуску АД

Спосіб пуску	Переваги	Недоліки
Автотрансформаторний пуск	Зменшення пускового струму на $u^2$ , де $u$ – зниження напруги, напруга $60\% = 0,60$	Стрибки струму з переходом від зниженої до номінальної напруги. Знижений пусковий момент
Підключення конденсатора з реактивним опором	Збільшення коефіцієнта потужності системи, зниження струму й осідання напруги під час пуску, підвищення пускового моменту	Дискретний характер регулювання пускового моменту, додаткове комутаційне обладнання
Плавний пуск. Амплітудно-фазове керування	Плавний пуск. Імпульси струму відсутні. Менший гідравлічний удар під час пуску насоса. Зменшення пускового струму на необхідну величину, зазвичай у 2–3 рази	Знижений пусковий момент
Векторно-імпульсний	Збільшення моменту без збільшення струму статора завдяки додатковій першій напівхвилі перехідного моменту позитивного знаку	Складність його реалізації
Квазічастотний режим	Збільшення моменту, зменшення пускових втрат	Вузька сфера застосування
Тиристорний регулятор напруги зі застосуванням фазовому методі керування	Важкий і дуже важкий пусковий режим, корекція коефіцієнта потужності, режим енергозбереження	Низьке значення початкового пускового моменту двигуна (0,1–1,0 $M_n$ )
Частотний пуск	Імпульси струму відсутні. Менший гідравлічний удар під час пуску насоса. Зменшення пускового струму, зазвичай, до рівня струму повного навантаження. Можна використовувати для безперервної подачі живлення до електродвигуна	Висока вартість. (є джерелом вищих гармонік). Наявні методи управління не досить точно відображають реальні перехідні процеси

## V. ВИСНОВКИ

Виконано аналіз існуючих систем керованого пуску. Для отримання результатів аналізу існуючих способів пуску асинхронних двигунів було розглянуто автотрансформаторний пуск що дозволяє значно знизити пусковий струм, також застосовується підключення конденсатора з реактивним опором для зниження струму й підвищення пускового моменту. застосування плавного пуску з амплітудно-фазовим керуванням дозволяє зменшити пусковий струм і досягти відсутності його імпульсів. Векторно-імпульсний спосіб керування перетворюючим пристроєм збільшує пусковий момент при відсутності збільшення пускового струму, такі переваги має квазічастотний режим пуску але застосування обмежене спеціальним технологічним обладнанням. Система ТРН-АД за наявності істотних переваг нездатна виконати передпускову підготовку рушання та пуск технологічного механізму під навантаженням. Під час модернізації системи ТРН-АД алгоритмом керування ТРН для отримання достатнього пускового моменту асинхронного двигуна можливе здійснення квазічастотного пуску та рушання. Однак ця система має низку недоліків, які не дозволяють отримати допустимо можливий пусковий момент під час рушання та пуску в важких умовах.

З важкими умовами рушання необхідно застосувати такі технічні рішення, які б забезпечили максимальні зусилля в трансмісії технологічного механізму з допустимими струмовими і тепловими перевантаженнями асинхронних машин електропривода підіймально-транспортних механізмів. Для цього необхідно реалізуватися таку систему електропривода, яка б забезпечувала зазначені вимоги.

Для виконання рушання у важких умовах, що розглянуті в статті, після виконання аналізу наявних систем керованого пуску, встановлено, що раціональною системою електропривода для підіймально-транспортних механізмів є система частотно-регульованого електропривода, за схемою «перетворювач частоти-асинхронний двигун» (ПЧ-АД).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. - М. : Энергия. 1974. - 328 с.
- [2] Клепиков В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. - Х. : Изд-во «Підручники НТУ «ХП». 2014. - 408 с.
- [3] Benglsu n. t. , AKay A. stability of friction-induced vibrations in roudty-degree-of-freedom systems. Journ. of Sound and Vi.br. 1994. Но 4, Р. 557–570.
- [4] Balik J., Lukac P. On the kinetics of dynamic strain ageing. Kovove Mater. 1998. V. 36. No. 1. P. 3–9.
- [5] Справочник по автоматизированному электроприводу под ред. Е. А. Елисеева, А. В. Шинянско-го. - М. : Вища школа, 1983. - 616 с.
- [6] Кацман М. М. Электрические машины : [учебник для студ. учреждений сред. проф. образования (12-е изд., стер)]. - М. : Издательский центр «Академия», 2013. - 496 с.
- [7] Петров И. И., Мейстель А. М.и Специальные режимы работы асинхронного электропривода. - М. : Энергия, 1968. - 264 с.
- [8] Войтех А. А. Попович А. Н., Бибик Е. В. Математическая модель оптимального проектирования асинхронного двигателя с предвключенными конденсаторами для тяжелых условий пуска. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. - 2002. - № 1. С. 361–363.
- [9] Попович Н. Г., Печник Н. В. Электромеханические системы автоматизации и задача энергосбережения. Вісник ХДПУ. Збірка наукових праць. - 2000. - №113. С. 297–300.
- [10]Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. - М. : Энергоиздат, 1981. - 184 с.
- [11]Герасимьяк Р. П., Лещев В. А., Путилин Н. С. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением. - К. : Техніка, 1984. - 150 с.
- [12]Браславский А. Я. Асинхронный полупроводниковый электропривод с параметрическим управлением. - М. : Энергоатомиздат, 1988. - 224 с.
- [13]Krecek, T., Brandstetter, P., Korbelt, P. Nonmodel Based Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor. In ISIE, Cambridge, 2008, p. 618–623.
- [14]Петрушин В. С., Якимец А. М., Груша А. В., Каленик О. В. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственно временных гармоник. Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб. - 2008. - № 70. С. 68 – 71.
- [15]Simulation of induction motor startup. MotorAnalysis Example1. N.p., n.d. Web. 29 June 2017.
- [16]Басков С. Н., Усатый Д. Ю., Радионов А. А. Пуск асинхронного двигателя в электроприводах с повышенным пусковым моментом. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2004. - № 2. С. 47–49.
- [17]Принцип действия устройств плавного пуска. Режим доступа : URL : [http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip\\_dejstviya/](http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip_dejstviya/)
- [18]Черный А. П., Гладырь А. И., Осадчук Ю. Г. и др. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов [Текст]. - Кременчуг : ЧП Щербатых А. В. : 2006. - 280 с.

Стаття надійшла до редакції 01.12.2020

## АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРОГАНИИ И ПУСКА ПОД НАГРУЗКОЙ

- ХРЕБТОВА О.А.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: 34092@ukr.net;
- ЗАЧЕПА Н.В.** канд. техн. наук, доцент кафедры системы автоматического управления и электропривода Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского, Кременчуг, Украина. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Цель работы.** Выполнить анализ действующих систем управления электропривода и методов формирования момента пуска для определения соответствия выбранной системы и метода с требованиями по выполнению безаварийного режима трогания и пуска технологического механизма в тяжелых условиях или трогания и пуска под нагрузкой.

**Методы исследования.** Сравнение энергетических показателей и возможностей систем и методов управления по формированию пускового момента, математические расчеты, анализ свойств систем и методов в соответствии с требованием выполнения технологических операций при трогании.

**Полученные результаты.** Для получения результатов анализа действующих способов пуска асинхронных двигателей были рассмотрены автотрансформаторный пуск что позволяет значительно снизить пусковой ток, также применяется подключения конденсатора с реактивным сопротивлением для снижения тока и повышения пускового момента. применение плавного пуска с амплитудно-фазовым управлением позволяет уменьшить пусковой ток и достигли отсутствия его импульсов. Векторно-импульсной способ управления пре-вращая устройство увеличивает пусковой момент при отсутствии увеличения пускового тока, такие преимущества имеет квазичастотного режим пуска, но применение ограничено специальным технологическим оборудованием. Тиристорный регулятор напряжения с применением фазового методе управления несмотря на распространенное применение в системах управления имеет низкое значение пускового момента. Для выполнения трогания в тяжелых условиях, по результатам выполненного анализа существующих систем управляемого пуска, установлено, что рациональной системой электропривода для подъемно-транспортных механизмов является система частотно-регулируемого электропривода по схеме «преобразователь частоты - асинхронный двигатель» (ПЧ - АД).

**Научная новизна.** Впервые предлагается совершенствование действующих систем управления подъемно-транспортных механизмов выполняющих пуск в тяжелых условиях при применении режимов трогания с формированием пускового момента превышающей паспортное значение в 3-4 раза. Увеличение энергоэффективности на основе повышения их эффективности, информативности и достоверности данных. Впервые проанализированы причины недостатков действующих систем управления при пуске под нагрузкой в современном производстве.

**Практическая ценность.** Обоснован выбор рациональной системы электропривода для подъемно-транспортных механизмов при выполнении трогания в тяжелых условиях, что обеспечит максимальные усилия в трансмиссии технологического механизма с допустимыми токовыми и тепловыми перегрузками асинхронных машин.

**Ключевые слова:** автотрансформаторный пуск; амплитудно фазовый управления; векторно-импульсное управление; квазичастотного режим; тиристорный регулятор.

## ANALYSIS OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS FOR PERFORMANCE OF DRIVING AND STARTING UNDER LOAD

- KHREBTOVA O.A.** Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: 34092@ukr.net;
- ZACHEPA N.V.** Ph.D, Associate professor of the departments of automatic control system and electric drive of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, Kremenchuk, Ukraine. e-mail: zachepa.nataliia@ukr.net.

**Purpose.** Perform an analysis of existing automated control systems of the electric drive and methods of forming the starting torque to determine the compliance of the selected system and method to the requirements for trouble-free mode of start and start of the technological mechanism in difficult conditions or breakaway and start under load..



**Methodology.** Comparison of energy performance and capabilities of control systems and methods for the formation of starting torque, mathematical calculations, analysis of the properties of systems and methods in accordance with the requirements of technological operations during the start.

**Findings.** To obtain the results of the analysis of the current methods of starting induction motors, autotransformer start was considered, which can significantly reduce the starting current, and also connect a capacitor with a reactance to reduce the current and increase the starting torque; the use of soft start with amplitude-phase control allows you to reduce the starting current and reached the absence of its impulses. The vector-pulse method of controlling the converting device increases the starting torque in the absence of an increase in starting current, such advantages have a quasi-frequency starting mode, but the application is limited by special technological equipment. Thyristor voltage regulator using the phase control method, despite its widespread use in control systems, has a low value of the starting torque. To carry out starting in difficult conditions, according to the results of the analysis of existing systems of controlled starting, it was found that a rational electric drive system for hoisting-and-transport mechanisms is a frequency-controlled electric drive system according to the "frequency converter - asynchronous motor" (FC - IM) scheme.

**Originality.** For the first time it is proposed to improve the existing control systems of hoisting and transport mechanisms that perform start-up in difficult conditions when using the modes of movement to form the starting torque that exceeds the passport value by 3-4 times. Increasing energy efficiency based on increasing their efficiency, information content and data reliability. For the first time, the reasons for the shortcomings of existing control systems during start-up under load in modern production are analyzed.

**Practical value.** The choice of a rational electric drive system for lifting and transport mechanisms is substantiated when starting in difficult conditions, which will provide maximum efforts in the transmission of a technological mechanism with permissible current and thermal overloads of asynchronous machines.

**Keywords:** autotransformer start; amplitude - phase control; vector-pulse control; quasi-frequency mode; thyristor regulator.

## REFERENCES

- [1] Sandler A.S., Sarbatov R.S. (1974) Automatic frequency control of induction motors. M.: Energy. 328.
- [2] Klepikov V.B. (2014) Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: a monograph. H.: Publishing house "Textbooks of NTU" KhPI ". 408 p.
- [3] Benglsu n. t., AKay A. stability of friction-induced vibrations in roudly-degree-of-freedom systems. *Jorn. of Sound and Vi.br.* 1994. Ho 4, R. 557–570.
- [4] Balik J., Lukac P. On the kinetics of dynamic strain aging // *Kovove Mater.* 1998. V. 36. No. 1. P. 3–9.
- [5] Eliseeva E.A., Shinyansky A.V. (1983) Handbook of automated electric drive. M.: Higher school. 616.
- [6] Katsman M.M. (2013) Electric machines: [textbook for students. institutions environments. prof. education (12th ed., erased)]. M.: Publishing Center "Academy". 496.
- [7] Petrov I.I., Meistel A.M. (1968) Special modes of operation of asynchronous electric drive. M.: Energiya. 264.
- [8] Voitek A.A., Popovich A.N., Bibik E.V. (2002) Mathematical model of optimal design of an induction motor with pre-connected capacitors for heavy start-up conditions *Visnyk of Kremenchug State Polytechnic University.* 1. 361–363.
- [9] Popovich N.G., Pechnik N.V. (2000) Electromechanical automation systems and the problem of energy saving *Bulletin of the KhDPU. Collection of scientific works.* 113. 297–300.
- [10] Petrov L.P. (1981) Control of starting and braking of induction motors. M.: Energoizdat. 184.
- [11] Gerasimyak R.P., Leshchev V.A., Putilin N.S. (1984) Asynchronous electric drive with thyristor control. K.: Machinery. 150.
- [12] Braslavsky A. Ya. (1988) Asynchronous semiconductor electric drive with parametric control. M.: Energoatomizdat. 224.
- [13] Krecek, T., Brandstetter, P., Korbel, P. Nonmodel Based Sensorless Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor. In *ISIE, Cambridge, 2008*, p. 618–623
- [14] Petrushin B. C., Yakimets A. M., Grusha A.V., Kalenik O.V. (2008) Energeticheskie i teplovye pokazateli reguliruemyykh asynkhronnykh dvigateliv u taking into account higher spatial-temporal harmonics *Elektromashinostroyuvanie ta elektroobladnannya: Mizhvid. scientific and technical zb.* 70. 68 - 71.
- [15] Simulation of induction motor startup. MotorAnalysis Example1. N.p., n.d. Web. 29 June 2017.
- [16] Baskov S.N., Usaty D. Yu., Radionov A.A. (2004) Start of asynchronous motor in electric drives with increased starting torque *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Electromechanics.* 2. 47–49.
- [17] The principle of operation of soft-start devices. Access mode: URL: [http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk / upp / princip\\_dejstviya /](http://www.softstarter.ru/plavnij-pusk / upp / princip_dejstviya /)
- [18] Cherny A.P., Gladyr A.I., Osadchuk Yu.G. et al. (2006) Starting systems of unregulated electric drives [Text] Kremenchug: PE Shcherbatykh AV: 280.