

ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**Лисюк Константин Васильович**

УДК 621.359.4

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Підвищення ефективності роботи асинхронного електроприводу за рахунок  
використання пристроїв плавного пуску  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Лисюк К. В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Журавльов Валерій Пилипович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.ф-м.н., професор кафедри вищої

та прикладної математики

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

Лисюк К. В. Підвищення ефективності роботи асинхронного електроприводу за рахунок використання пристроїв плавного пуску. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності роботи асинхронного електроприводу за рахунок використання пристроїв плавного пуску.

На основі аналізу існуючих систем плавного пуску асинхронних двигунів, розроблена модель прямого пуску при фазовому і ШІМ – регулюванні асинхронних двигунів з використанням прикладних пакетів Matlab, теорії електричних та магнітних кіл.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, прямий пуск, теорія кіл.

## ABSTRACT

Lysyuk K. V. Increasing the efficiency of asynchronous electric drive due to the use of soft start devices. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The purpose of the qualification work is to increase the efficiency of the asynchronous electric drive due to the use of soft start devices.

Based on the analysis of existing systems of soft start of asynchronous motors, a model of direct start with phase and PWM control of asynchronous motors was developed using Matlab application packages, the theory of electric and magnetic circuits.

**Key words:** asynchronous motor, direct start, circle theory.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ПЛАВНОГО ПУСКУ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ	6
1.1 Необхідність використання плавного пуску для асинхронного двигуна	6
1.2 Пристрої плавного запуску та їх принцип роботи	10
1.3 Види ППЗ регулюванням напруги	17
Висновки по розділу 1	22
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ДИНАМІКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ШІМ-НАПРУГОЮ	23
2.1 Динаміка процесів пуску асинхронного двигуна з ШІМ-напругою	23
2.2 Моделювання прямого пуску при фазовому і ШІМ – регулюванні АД	24
Висновки по розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПУСКУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	34
Висновки по розділу 3	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

## ВСТУП

Асинхронні електродвигуни є найбільш часто застосовуваними пристроями для приводу промислових і побутових машин і механізмів. Це обумовлено їх щодо низькою вартістю, щодо високим ККД, простотою конструкції і, отже, їх надійністю.

Основні проблеми, що виникають під час експлуатації таких двигунів, зводяться до неможливості узгодження створюваного ними моменту з моментом навантаження, як під час пуску, так і під час роботи, а також високий пусковий струм.

У час пуску крутний момент зазвичай досягає 150-200%, він прискорює навантаження до досягнення повної швидкості обертання за частки секунди, що може призвести до виходу з ладу кінематичного ланцюга приводу. В теж саме час стартовий струм може бути в 8-10 раз більше номінального, породжуючи проблеми зі стабільністю живлення і підвищеним зносом електричної частини обладнання.

Коли двигун працює з зниженою навантаженням, його ККД падає внаслідок того, що створюваний магнітний потік занадто великий по відношенню до магнітному потоку, достатньому для створення обертаючого моменту, необхідного для подолання моменту навантаження.

У тих випадках, коли немає можливості або необхідності змінювати швидкість обертання двигуна, пристрої плавного пуску дозволяють економити електроенергію, споживану двигунами при їх роботі на знижених навантаженнях.

**Метою роботи** є аналіз динаміки процесів пуску асинхронних електродвигунів та моделювання їх прямого пуску при фазовому і ШІМ – регулюванні

**Об'єкт дослідження:** регульований електропривод асинхронних електродвигунів.

**Методи дослідження:** аналіз існуючих систем плавного пуску асинхронних двигунів, моделювання прямого пуску при фазовому і ШІМ –

регулюванні АД з використанням прикладних пакетів Matlab, теорія електричних та магнітних кіл.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

Новосвіт О. В., Лисюк К. В. **МОЖЛИВОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНО-ТИРИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ ЯК ПУСКОВОГО ПРИСТРОЮ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

Матеріали VII Міжнародна науково-практичної конференції «Біоенергетичні системи» 15-17 листопада 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-49.

Журавльов В. П., Лисюк К. В. **МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПУСКУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ**

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023». 25 жовтня 2023 р. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 106-108.

Лисюк К. В. **ПРИСТРОЇ ПЛАВНОГО ЗАПУСКУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ТА ЇХ ПРИНЦИП РОБОТИ**

Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інженерні процеси та системи» 14-15 червня 2023 року. Житомир: Поліський національний університет, 2023.- С 47-51.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СИСТЕМ ПЛАВНОГО ПУСКУ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

#### 1.1 Необхідність використання плавного пуску для асинхронного двигуна

Асинхронні електричні машини з короткозамкненим ротором мають досить низьку вартість, оптимальне співвідношення "потужність-маса". Їх також відрізняє простота обслуговування та ремонту, надійність. Один із основних недоліків двигунів цієї конструкції – збільшення струму в 5-10 разів при пуску. При цьому величина напруги в мережі зменшується. Для усунення небажаних явищ застосовують різні пристрої та схеми підключення електродвигунів.

##### Необхідність плавного запуску

При плавному запуску асинхронного двигуна можна знизити недоліки таких електричних машин і забезпечити [3]:

- Зниження витрат за ремонт. Пускові струми викликають перегрів обмотки, що значно знижує експлуатаційний ресурс машин.
- Відсутність ривків. Різкий старт двигуна призводить до збільшення зносу шестерних передавальних механізмів, гідроударів у мережі подачі рідини, інших небажаних наслідків.
- Зниження споживаної електроенергії. Прямий запуск викликає додаткові енерговитрати. Крім того, просідання напруги в умовах обмеженої потужності мережі негативно впливають на всі підключені пристрої.
- Зменшення витрат на обладнання комутації. Електротехнічні пристрої для асинхронного приводу вибирають із великим запасом потужності. Плавний пуск дозволяє підключати дешевші апарати комутації та захисту.

Плавний старт та розгін суттєво розширює сфери застосування асинхронних електродвигунів.

## Способи пуску асинхронних електродвигунів

Для запуску асинхронних двигунів використовують різні методи. Насправді сьогодні найбільшого поширення отримали такі методи:

- Зміна конструкції електродвигунів (ротори з глибокими пазами, типу "подвійна білизна клітина").
- Прямий пуск.
- Запуск на зниженій напрузі.
- Частотний пуск.

Слід відмітити, що двигуни спеціальної конструкції істотно дорожчі за звичайні електричні машини, що сильно обмежує їх застосування.

### Прямий запуск

Найпростіша схема пуску асинхронних електричних машин із короткозамкненим ротором – безпосереднє підключення до мережі. Подача напруги на обмотки статора здійснюється замиканням силових контактів магнітного пускача або контактора (рис.1.1, а).

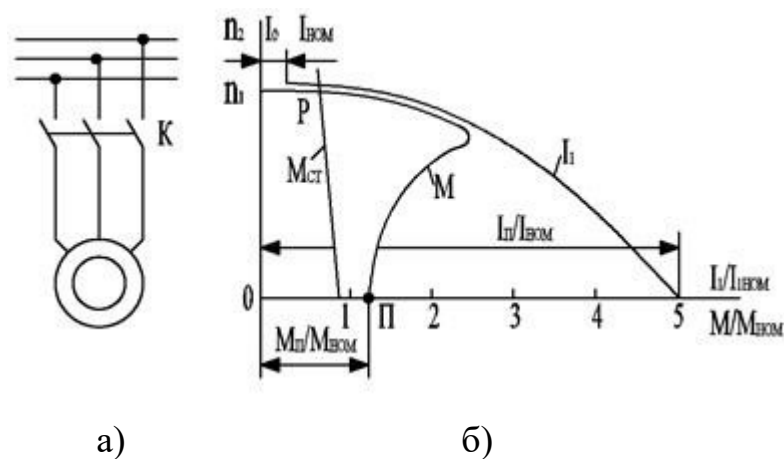


Рисунок 1.1-Прямий пуск асинхронного двигуна

При прямому пуску електричної машини момент сили на валу значно менший за номінальний. Крім того, запуск на повній напрузі викликає кидки струму та зниження напруги, що зображено на рис.1.1,б. Прямий запуск застосовується:

- При низькій потужності електричної машини.
- Для технологічного обладнання, яке не потребує плавного розгону.

- Для механізмів із запуском без навантаження.

Але, даний спосіб непридатний для приводів інерційного обладнання, невибагливих пристроїв до величини пускового моменту, при обмеженій потужності електромережі.

### Пуск на зниженій напрузі

Запуск асинхронних електричних машин на зниженій напрузі реалізується за допомогою кількох схем:

- Перемиканням обмоток статора "зірка-трикутник".
- Підключенням через трансформатор.
- Включенням у ланцюг обмоток статора пускових резисторів або реакторів.

Принцип дії першої схеми (рис.1.2) ґрунтується на пуску електричної машини при підключенні обмоток "зіркою". Після розгону двигуна комутаційні апарати перемикають їх на трикутник. Цим досягається 3-кратне зниження пускового струму [9].

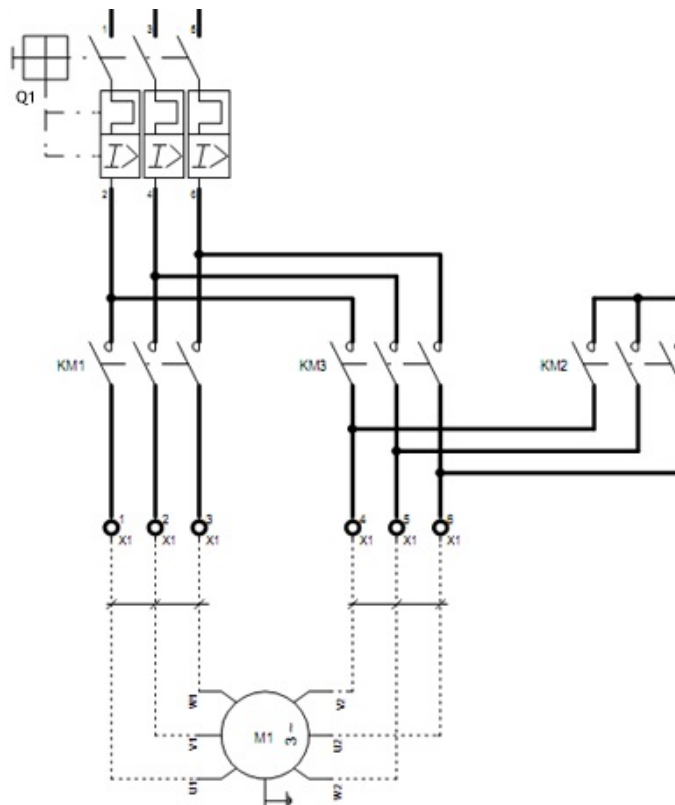




Рисунок 1.2 – Схема пуску електричної машини при підключенні обмоток «зіркою»

При цьому пусковий момент на валу також знижується на понад 30%. Крім того, передчасне перемикання також викликає стрибки струму до величин, що виникають під час прямого запуску. Такий спосіб також непридатний для інерційного обладнання та установок, які запускаються під навантаженням.

Для усунення недоліків електродвигунів із короткозамкненим ротором також застосовують автотрансформаторні схеми пуску (рис.1.3).

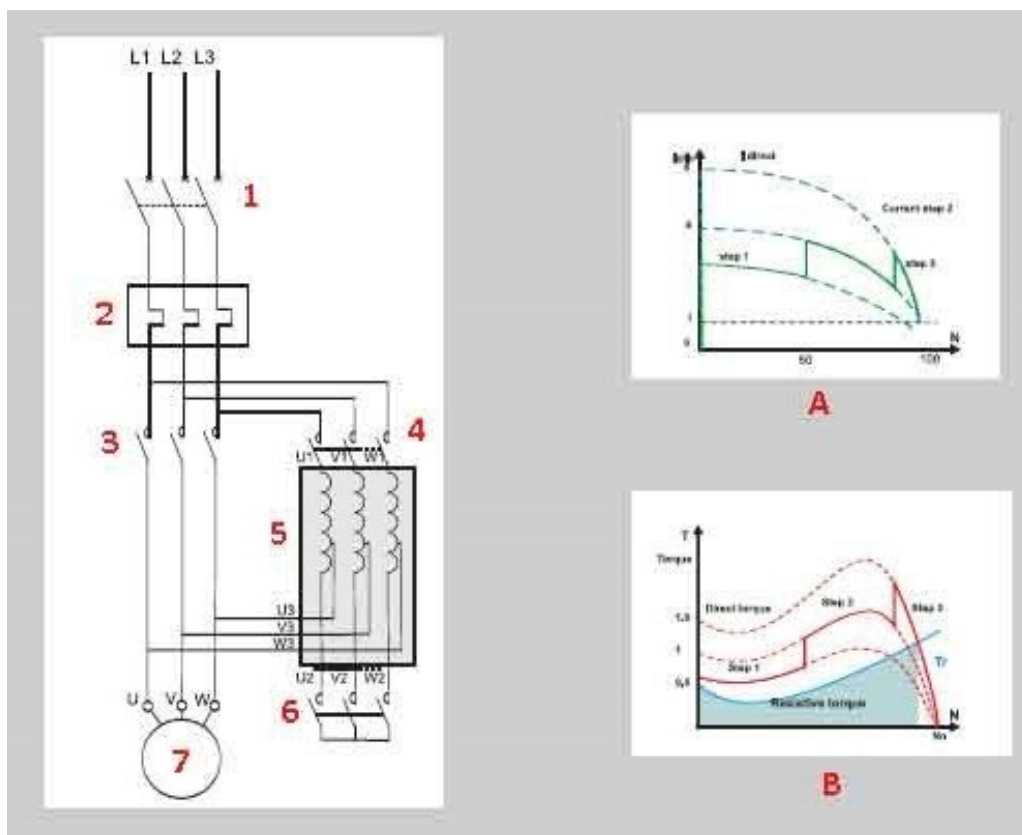


Рисунок 1.3 - Автотрансформаторна схема пуску в асинхронному двигуні

При цьому пристрій для перетворення напруги 4 послідовно включають в ланцюг обмоток електричної машини 7. Ця схема забезпечує плавний розгін та зменшення пускового струму (рис.1.3, B). Через автотрансформатори 5 підключають приводи потужних установок 2 та обладнання із значним моментом опору.

Висока вартість елементів схеми, стрибок струму при переході на повну напругу обмежують її застосування.

Широко застосовуються також реакторні та резистивні схеми пуску (рис.1.4). Для зниження напруги до обмоток двигуна *10* послідовно за допомогою перемикачів *7,8,9* підключають резистори *4,5,6* або котушки, що мають реактивний опір. Запуск здійснюється при включенні до ланцюга послідовно включених елементів з активним чи індуктивним опором.

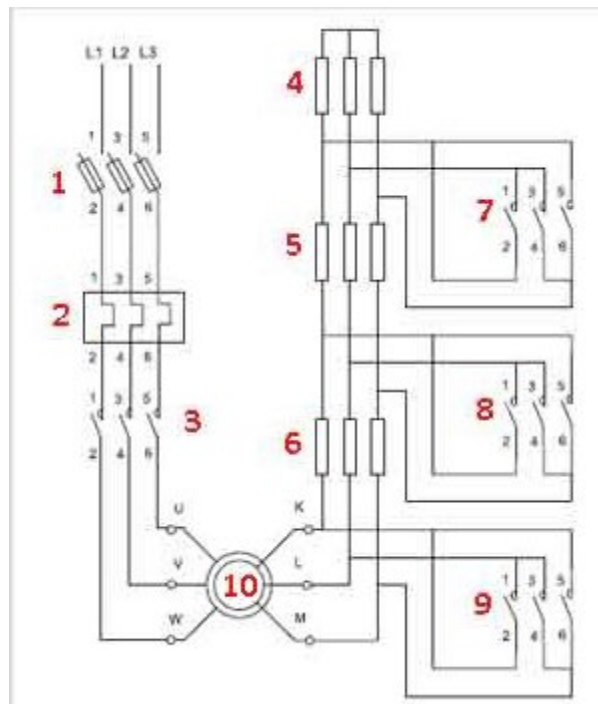


Рисунок 1.4 – Резистивна схема пуску асинхронного двигуна

При розгоні двигунів реактори та пускові опори поступово шунтуються та вимикаються з ланцюга. Недоліком цього є висока вартість устаткування, значно знижений пусковий момент.

### Частотний запуск

Такий спосіб старту і розгону заснований на залежності моменту і швидкості обертання валу електродвигуна від частоти напруги на обмотках. Для зміни цієї характеристики застосовують частотні перетворювачі [11]. Запуск через ПЧ вирішує всі проблеми старту та розгону асинхронного електродвигуна. Однак ці пристрої мають високу ціну, великі габарити, а також являються джерелом найвищих гармонік.

### 1.2 Пристрої плавного запуску та їх принцип роботи

Типовий трифазний асинхронний електродвигун, працюючий з повним

навантаженням, має відносно високий ККД, що досягає 80-96%. Однак, як показано на рисунку 1.5, ККД двигуна різко падає, якщо навантаження знижується. Падіння ККД особливо відчутно, коли навантаження знижується до значень менше ніж 50% від номінальної [9]. Насправді електродвигуни досить рідко працюють на повну потужність. Переважна більшість двигунів працюють з навантаженням, значно нижчим за номінальне внаслідок того, що при проектуванні електроприводу вони були обрані з так званим «конструктивним запасом», а так ж через природних вагань навантаження в умовах конкретного технологічного процесу.



Рисунок 1.5. ККД асинхронного двигуна

Для забезпечення старту та розгону двигуна та узгодження пускового моменту на валу з навантаженням служить електротехнічне обладнання яка називають пристроями плавного пуску (запуску) (ППЗ), або софт-стартерами.

Не настільки сучасні, як ЕС, пристрої плавного пуску після закінчення програми розгону зберігають повну електропровідність, внаслідок чого двигун веде себе так ж, як якщо б він був підключений безпосередньо до живильною мережі, або шунтуються контакторами, комутуючими електродвигун безпосередньо до живильною мережі для уникнення втрат електроенергії на внутрішньому опір відкритих тиристорів. Однак при знижених навантаженнях і повної подачі напруги асинхронні електродвигуни завжди отримують надлишковий струм намагнічування, витрачається в том

числі на перемагнічування створеного їм ж в попередній момент часу надлишкового магнітного поля. Шляхом безперервного контролю навантаження і зміни напруги на контактах двигуна по певному алгоритму, ППЗ економить частина енергії збудження і знижує втрати (пропорційні квадрату струму, котрий знижується при зниженні напруги), а також покращує коефіцієнт потужності в тих випадках, коли електродвигун використовується неефективно зниженою навантаженням.

У чому фізичний зміст таких маніпуляцій? Момент, що створюється двигуном, залежить як від прикладеного напруги, так і від ковзання (показник «запізнення» обертання ротора щодо поля статора). Чим менший момент навантаження прикладений до ротору, тим більше ротор «наздоганяє» поле статора (ковзання зменшується), тим далі двигун переходить в менше економічний режим. Якщо відповідним чином знизити напругу живлення, що подається на двигун, ковзання повернеться до номінальному значенню. Рисунок 1.6 ілюструє описаний процес на прикладі механічних характеристик двигуна при різних значеннях напруги, що додається до обмоток. При цьому знизяться струм, що протікає через обмотки двигуна, і споживана потужність, пропорційна добутку напруги і струму, втрати зменшаться, ККД двигуна зросте [3].

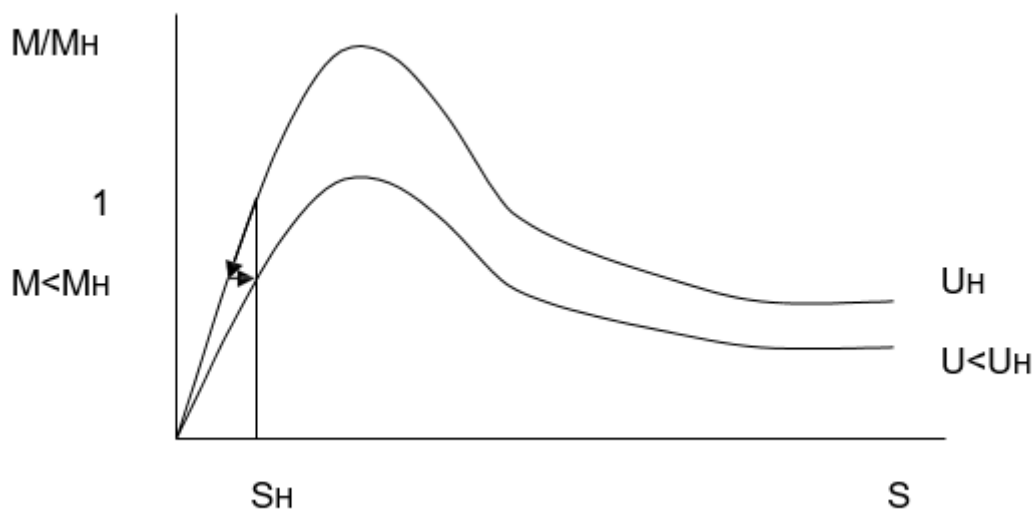


Рисунок 1.6 - Механічні характеристики двигуна при різних напругах живлення

Яким чином ППЗ знижує напруга? Схема ППЗ побудована з урахуванням силових тиристорів чи симісторів. ППЗ використовує традиційну для пристроїв плавного пуску схему зустрічно-паралельно включених тиристорів (Див. рисунок 1.7). Тиристор - електронний прилад, репрезентуючий собою керований діод. Він відкривається при подачі керуючого імпульсу і закривається при переході через нього струму через нуль. Відкриваючи тиристор з більшою чи меншою затримкою по часу, можливо «вирізати» відповідну частину синусоїди живлячого напруги. Епюри напруги на виході тиристорного блоку представлені на рисунку 1.8. Таким чином, середня напруга на виході пристрої буде змінюватися пропорційно зміни часу затримки відкриття тиристора. Оскільки подібний принцип регулювання напруги припускає, що в ті інтервали часу, коли тиристири залишаються закритими, струм через обмотки двигуна не протікає, відбору потужності з живильною мережі в ці моменти не відбувається. Ротор двигуна в ці інтервали часу обертається по інерції.

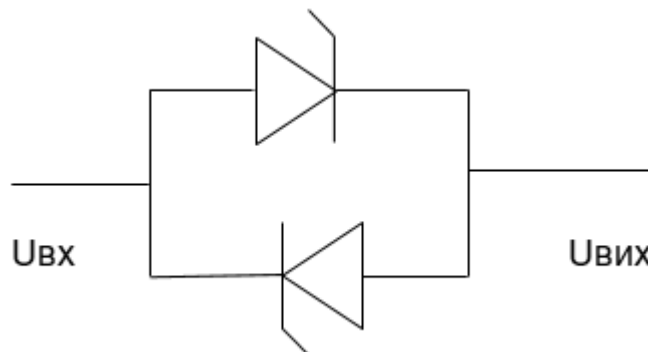


Рисунок 1.7 - Зустрічно-паралельно увімкнені тиристири



Рисунок 1.8 - Напруга на виході зустрічно-паралельної тиристорної пари

Яким чином здійснюється визначення оптимального моменту відкриття тиристорів? Обмотки двигуна представляють собою активно- індуктивне навантаження. Активна частина опору залежить тільки від температури обмотки. Реактивний (індуктивний) опір залежить від моменту навантаження, прикладеного до ротору двигуна. Його величина тим більше, чим менший доданий момент навантаження. Величина реактивного опору впливає на фазовий зсув між напругою та струмом у ланцюгу (Див. рисунок 1.9). Таким чином, вимірюючи фазовий зсув, можливо однозначно судити про величину навантаження по відношенню до номінального. Зниження напруги відповідно зменшення величини навантаження наводить до зменшення індуктивної частини опору. Внаслідок цього, крім вже згаданого зниження споживання активною потужності при зниженні напруги, зниження активною частини струму зменшує втрати, які дорівнюють добутку квадрата струму на активний опір обмоток. Оскільки реактивний струм, як і активний, гріє провідники, його зниження також призводить до зменшення активного опору обмоток двигуна, що забезпечує додаткову економію енергії, яка виділяється у вигляді тепла. Крім того, зменшення реактивною частини опору знижує негативне вплив реактивною навантаження на живлячу мережа, зменшуючи фазові зрушення між струмом і напругою, а так ж реактивну потужність

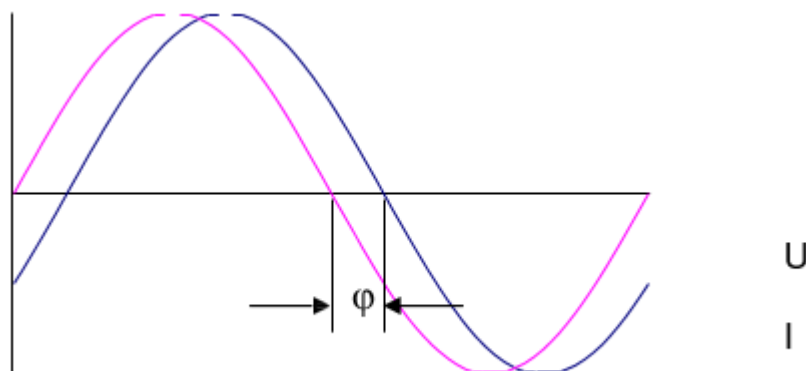


Рисунок 1.9 - Фазовий сдвиг между напряжением и током

Використовуючи потужний мікроконтролер, ППЗ миттєво оцінює навантаження на валу двигуна, порівнює її з конструктивної потужністю

двигуна та у випадку зниженого навантаження знижує напруга, що подається на двигун, домагаючись того, щоб двигун працював на своєму розрахунковому ковзанні і, як слідство, з максимальним ККД. При цьому частота обертання двигуна не змінюється. Час реакції УВП на зміна навантаження становить соту частку секунди, що дозволяє навіть за динамічно мінливих навантаженнях відстежувати режим максимального ККД.

Пристрій є безтрансформаторним безступінчастим перетворювачем напруги. Пристрої плавного пуску застосовують [1]:

- Для включення потужних асинхронних електродвигунів до мережі малої потужності.
- Для плавного запуску, розгону та зупинки електричних машин.
- При необхідності пуск двигуна під навантаженням.
- Для зниження пускових струмів.

УПП дозволяють відмовитися від дорогих та недосконалих схем запуску електродвигунів, а також значно розширити сфери застосування недорогих та функціональних асинхронних машин із короткозамкненим ротором. Вони використовуються у приводі технологічного обладнання :

- Легкого запуску. Пускові струми за таких умов не перевищують триразового номінального значення.
- Важкий запуск. При старті електродвигуна струм зростає в 4-5 разів, перехідні процеси в ланцюгах тривають понад 30 секунд.
- Особливо важкий запуск. При цьому пусковий струм перевищує номінальний у 7-10 разів [6]. Перехідний процес займає значний час.

Пристрої плавного пуску мають відносно низьку вартість, невеликі габарити та масу порівняно з перетворювачами частоти.

Силова частина пристрою плавного пуску складається з силових тиристорів, включених зустрічно-паралельно та обхідних контакторів. Зміна напруги досягається регулюванням провідності напівпровідникових пристроїв шляхом подачі відпираючих імпульсів на контакти, що управляють.

До складу ППЗ також входить:

- Генератор імпульсів, що управляють. Цей блок виробляє сигнали, що змінюють кут провідності напівпровідникових пристроїв під час пуску та зупинки електродвигуна.

- Керуючий пристрій з урахуванням контролера чи мікропроцесора. Його основні функції - подача команд на генератор імпульсів, забезпечення зв'язку з іншими пристроями, прийом сигналів від датчиків, забезпечення захисного відключення електричної машини при аварійних та ненормальних режимах роботи.

Старт електричної машини складає напругу, що становить 30-60% від номінального. При цьому відбувається плавне зачеплення шестерень передавального механізму, поступовий натяг ременів приводу. Далі керуючий блок поступово збільшує провідність тиристорів до повного розгону електродвигуна. При досягненні номінальної частоти обертання валу замикаються контакти шунтуючих комутаційних пристроїв. Струм починає текти в обхід тиристорів. Це необхідно для зниження нагріву напівпровідникових пристроїв, збільшення терміну служби ППЗ, зниження енергоспоживання.

При зупинці електродвигуна контактор включає в ланцюг тиристори. З генератора імпульсів надходять сигнали, що плавно зменшують провідність тиристорів до зупинки електричної машини.

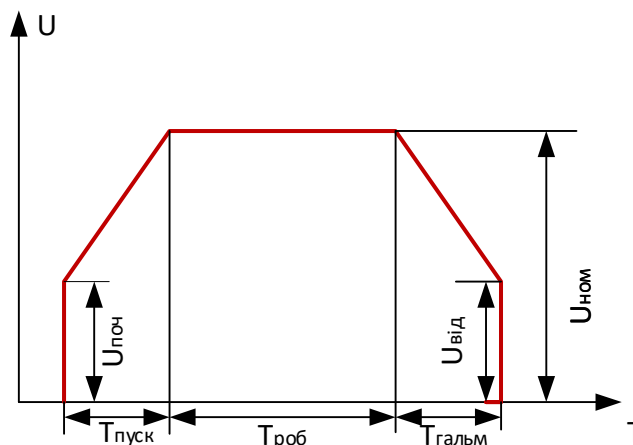


Рисунок 1.10- Діаграма роботи ППЗ



### 1.3 Види ППЗ регулюванням напруги

За способом регулювання напруги розрізняють одно-, дво-, трифазні пристрої:

**Влаштування плавного пуску з регулюванням напруги по одній фазі.** Застосовуються у електроприводі обладнання потужністю 11 кВт. Такі ППЗ (рис.1.11). забезпечують зниження динамічних ударів та відсутність ривків при старті приводу. Недоліками таких пристроїв є несиметричне навантаження при запуску, великі пускові струми.

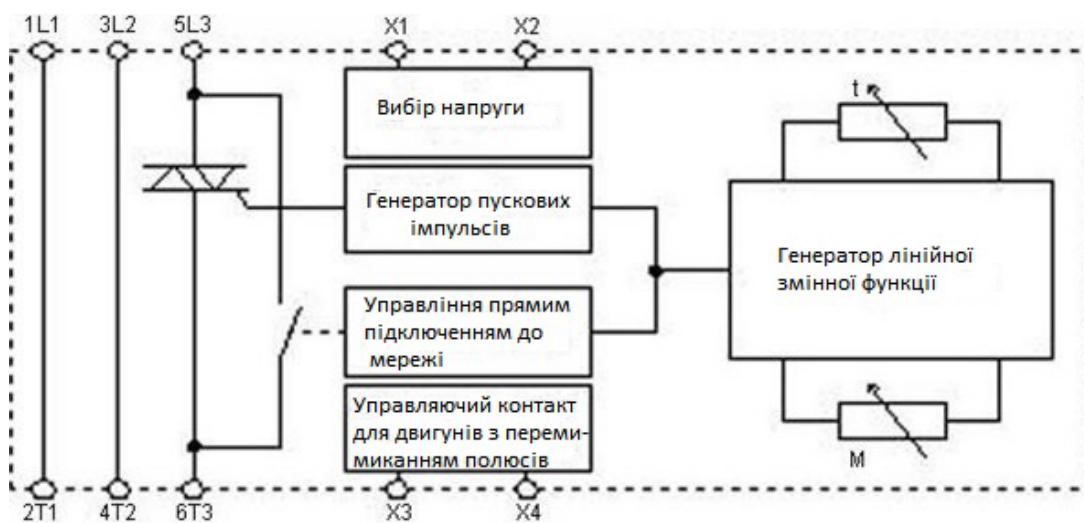


Рисунок 1.11 – Схема плавного пуску з регулюванням напруги по одній фазі

**Двофазні ППЗ** (рис. 1.12) . Застосовуються в приводах потужністю до 250 кВт шляхом зниження динамічних навантажень при пуску. Забезпечують деяке зниження пускових струмів, нагрівання двигуна. Використовується в устаткуванні із середньоважкими умовами пуску за відсутності жорстких вимог до обмеження струму.

**Трифазні софт-стартери** (рис.1.13). ППЗ такого типу знижують пускові струми до 3-кратного значення від номіналу, що дозволяє здійснювати плавну зупинку, забезпечують аварійне відключення приводу. Регулювання напруги здійснюється за всіма трьома фазами, що виключає появу асиметрії.

Номінальна потужність приводу обмежена лише характеристиками напівпровідникових силових елементів. Такі ППЗ використовують у приводі з особливо важкими умовами пуску, з частими включеннями та зупинками.

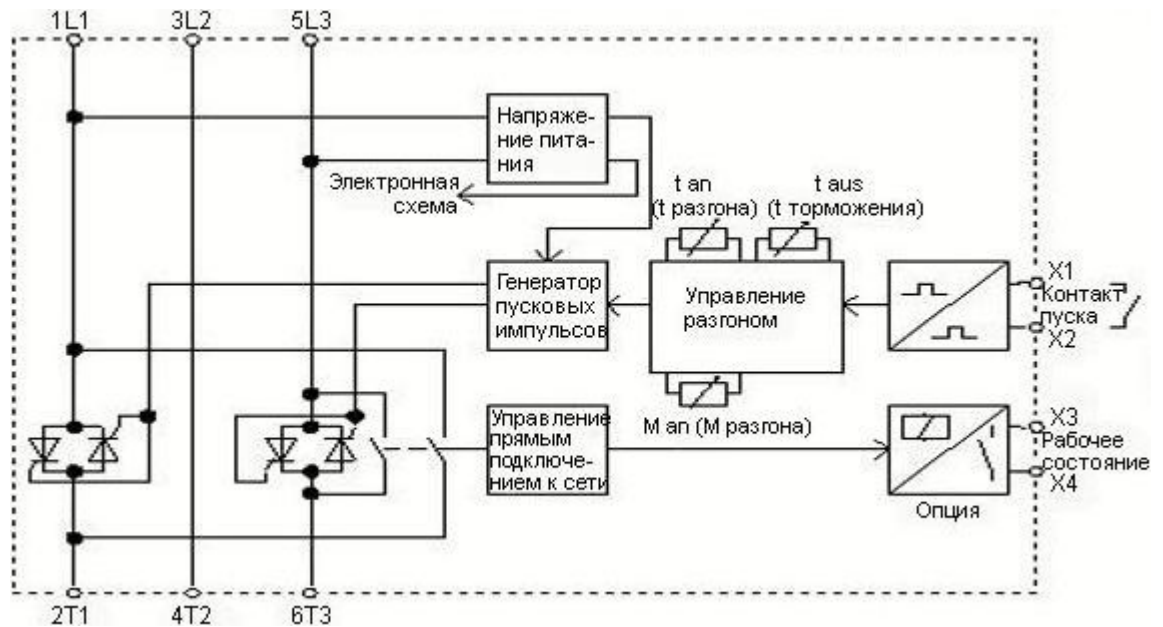


Рисунок 1.12 – Схема плавного пуска с регулированием напряжением по двум фазам

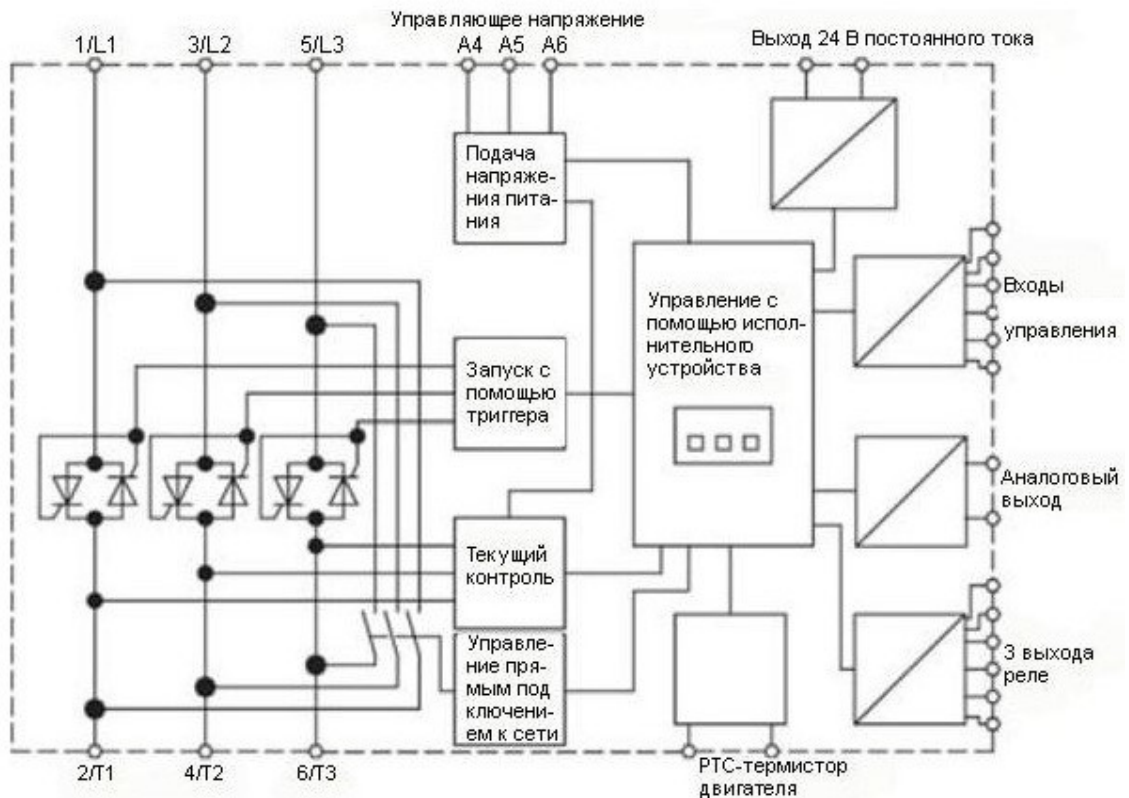


Рисунок 1.13 – Схема плавного пуска с регулированием напряжения по трем фазам

### Основні та додаткові функції ППЗ

Сучасні софт-стартери – функціональні електротехнічні пристрої. Основне їх призначення – зниження пускових струмів та пом'якшення динамічних ударів при старті двигуна. Крім того, ППЗ забезпечують:

- Пуск із номінальним моментом. При цьому при старті на електродвигун подається максимальна напруга, після чого включаються тиристри. Розгін до номінальної частоти здійснюється плавно. Софт-стартери такої конструкції застосовують для механізмів із значним пусковим навантаженням.
- Динамічне гальмування. ППЗ з цією функцією забезпечують зупинку приводу без вибігу. Їх встановлюють у приводі інерційного технологічного обладнання: тягових вентиляторів, підйомників тощо.
- Пуск у функції струму та напруги. ППЗ такої конструкції дозволяють ставити граничне значення пускового струму. Пристрої застосовуються за

низької потужності мережі, а також у приводі обладнання з низьким стартовим моментом.

- **Захист електродвигуна.** Софт-стартери забезпечують зупинку приводу при обриві фаз, перевантаження, перевищення часу розгону, а також при виникненні інших аномальних та аварійних режимів. ППЗ не мають захисту від коротких замикань та включаються через запобіжники чи автомати.

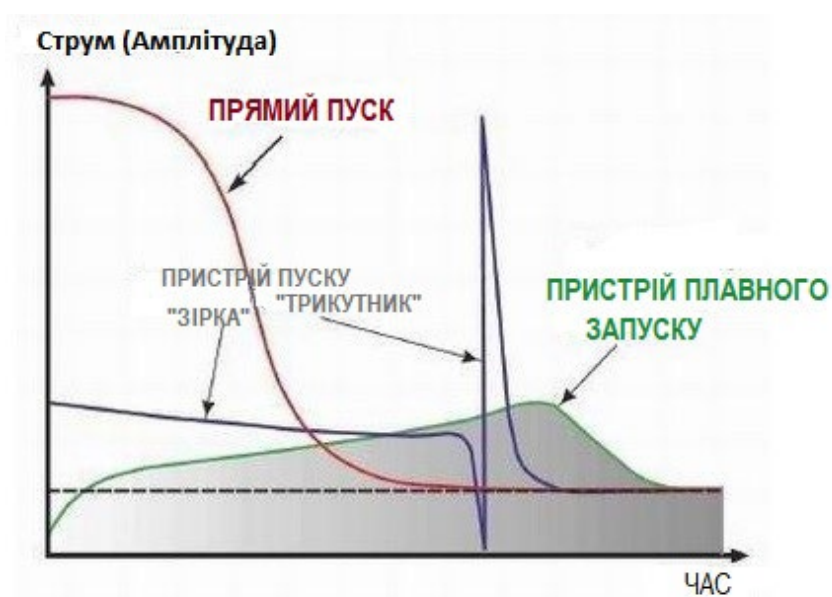
- **Інтеграцію в САР та системи телемеханіки.** Софт-стартери з процесорними блоками управління та пристроями підтримки протоколів зв'язку з віддаленим обладнанням контролю легко вбудовуються у багаторівневі системи автоматизації технічних процесів.

- **Регулювання частоти обертання валу.** ППЗ з такою функцією не замінюють частотні перетворювачі. Такий режим є допустимим при нетривалому налаштуванні обладнання.

Вибір функціоналу софт-стартера залежить від вимог до електроприводу та здійснюється на підставі техніко-економічної доцільності.

### Переваги ППЗ

У порівнянні з іншими схемами пуску асинхронних електродвигунів, ППЗ забезпечує найбільше зниження амплітуди пускового струму.



### Рисунок 1.14- Порівнянні з іншими схемами пуску асинхронних електродвигунів з ППЗ

Крім того, такі пристрої мають такі переваги:

- Продовження терміну служби двигуна та технологічного обладнання. ППЗ знижує нагрівання обмоток, контактів, а також виключає динамічні удари.

- Значне зниження витрат на апаратну частину електроприводу. Установка софт-стартерів дозволяє заощадити на схемах захисту, встановлювати менш потужні пристрої, що комутують.

- Зниження навантаження на мережу. ППЗ знижують кидки струму і запобігають падінню напруги в електромережах. Це особливо актуально при обмеженій потужності трансформаторів та використання автономних джерел електроживлення.

- Підвищення безпеки виробництва. Плавний старт та розгін знижує травматизм при поломках обладнання, пов'язаних з ривками при запуску, ймовірність гідравлічних ударів та інших аварійних ситуацій.

- Зменшення перешкод, що наводяться при старті. Софт-стартери знижують інтенсивність магнітного поля під час пуску електродвигуна. ППЗ дозволяють відмовитись від фільтрів для контрольних кабелів.

- Низька вартість. Пристрої плавного пуску коштують у кілька разів дешевше за перетворювачі частоти тієї ж потужності. Софт-стартери вигідно використовувати при постійному навантаженні обладнання в умовах, де обмеження пускових струмів та стартового моменту є основними вимогами.

ППЗ також замінюють механічні гальма та кінематичні пристрої для зупинки. Крім того, софт-стартери дозволяють застосовувати асинхронні двигуни з ротором типу "білизна клітина" замість дорогих електричних машин з покращеними пусковими характеристиками або фазним ротором.

Вибір схеми пуску здійснюється на підставі аналізу вимог до обладнання та характеристик електричної мережі.

### **Висновки по першому розділу**

Завдяки тому, що пристрої плавного пуску розраховані на важкі теплові режими, а у програмному забезпеченні використовуються ефективні ноу-хау, ППЗ забезпечує пуск обладнання, що характеризується важкими пусковими режимами «номінал в номінал».

В умовах, коли не потрібно регулювати кількість обертів двигуна, ППЗ ідеально підходить для цілей енергозбереження та вирішення проблеми плавного пуску. на сьогоднішній день по сукупності споживчих якостей і ціни аналогів даному обладнання на ринку немає .

## РОЗДІД 2

### АНАЛІЗ ДИНАМІКА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ШІМ- НАПРУГОЮ

Енергозберігаюче обладнання, таке як перетворювач частоти, стабілізатор напруги, регулятори напруги, спрямовано на зниження витрат ресурсів, що, у свою чергу, дозволяє заощадити кошти. Згідно з останніми дослідженнями, електродвигуни використовують 45% від світового енергоспоживання та 2/3 від промислового споживання [1]. При пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором струм статора більше від номінального в 5–7 разів. Такі великі струми в статорі неприпустимі за умов динамічних зусиль в обмотках та нагрівання обмоток. В асинхронних двигунах можуть виникати перехідні режими з великими кидками струму не лише при підключенні двигуна до мережі, але і при його реверсі та гальмуванні.

У зв'язку з цим велике значення має раціональний вибір пускорегулюючої апаратури [2]. З одного боку, бажано, щоб процеси пуску, гальмування реверсу та регулювання частоти обертання не супроводжувалися значними втратами електроенергії, оскільки це веде до подорожчання експлуатації електроприводу. Але, з іншого боку, бажано, щоб вартість пускорегулюючих пристроїв не була надзвичайно високою, що призвело б до зростання капітальних вкладень. Зазвичай ці вимоги суперечать. Наприклад, застосування тиристорних пускорегулюючих пристроїв забезпечує найбільш економічне перебіг процесів пуску та регулювання двигуна, але вартість цих пристроїв поки що залишається досить високою. Тому при вирішенні питання про доцільність застосування регуляторів напруги слід звернутися до графіка роботи електроприводу, що проектується. Якщо електропривод не схильний до частих пусків, то підвищені витрати на регулятори напруги або інше дороге обладнання можуть виявитися невиправданими, а витрати, пов'язані з втратами енергії, незначними. І, навпаки, при інтенсивній експлуатації електроприводу в перехідних режимах, тобто проводиться велика кількість

включень на годину (механізм подачі кришки в машині кришку, механізм різання в одноножевій різальній машині в автоматичному режимі), застосування регуляторів напруги стає доцільним.

Енергозберігаючі технології зараз є найактуальнішими. Важливе питання енергозбереження – оцінка та дослідження перехідних процесів, зокрема моделювання електромеханічних систем, використовуючи програмне забезпечення Matlab 6.5 та його середовище імітаційного моделювання Simulink, що буде проведено в даній роботі.

## **2.1 Динаміка процесів пуску асинхронного двигуна з ШІМ- напругою**

Керований пуск з певною інтенсивністю наростання керуючого впливу (напруги живлення) дозволяє організувати енергозберігаючий режим пускових процесів. Основними способами отримання якісних пускових, регулювальних та гальмівних властивостей регульованого електроприводу змінного струму, порівнянних з аналогічними властивостями регульованого електроприводу постійного струму, є частотний та параметричний способи управління. Частотний спосіб керування дозволяє отримати високоякісне регулювання, різні функціональні властивості асинхронного електроприводу. Але це супроводжується складними системами управління з використанням інтелектуальних напівпровідникових перетворювачів. Параметричний спосіб управління має певні обмеження діапазону отримання регулювальних характеристик, розширення якого призводить до збільшення габаритної потужності електродвигуна і, як правило, недовикористання цієї потужності. Але в питаннях організації процесів пуску він є альтернативним частотному управлінню. Відомо, що одним із можливих способів регулювання координат асинхронного двигуна є зміна напруги на статорних обмотках. Керуюча дія у вигляді напруги живлення, що прикладається до обмоток статора, здійснюється зміною кута (фази) включення силових ключів у ланцюгах приєднання обмоток статора до фаз мережі живлення. Такий спосіб управління асинхронним електродвигуном являє собою один з різновидів



параметричного (амплітудного) регулювання. Він отримав назву фазового управління [3].

Формування регульованого напруги на обмотках статора можливе різними прийомами, зокрема і широтно-імпульсним модулюванням [4]. Розглянемо варіант формування напруги в кожному напівперіоді з пульсів, центри яких відстоять друг від друга на відстані  $\pi/m$ , де  $m = 3, 6, 9, 12, \dots$  – ціле число імпульсів у напівперіоді. Центр першого імпульсу розташовується в точці  $\pi/2m$  від початку напівперіоду, положення фронтів кожного імпульсу змінюється в той і інший бік від центру імпульсу. Крім того, кількість пульсів на кожному напівперіоді трифазної системи напруги вибирається зі співвідношення  $n = 2mk \pm 1$ , де  $k = 1, 2, 3, 4 \dots$ , а  $n$  - номер обраної гармоніки, яка повинна бути в промодульованій напрузі. Запропонований спосіб широтно-імпульсної модуляції змінної напруги здійснює придушення певних гармонік, чим покращує гармонійний склад напруги живлення і тим самим енергетичні показники, а також дозволяє сформувати симетричну трифазну систему як для фазних, так і для лінійних напруг. Його застосування розширює функції асинхронного електроприводу за рахунок зміни параметрів енергії, що підводиться до двигуна в і перехідних режимах. Це підвищує керованість режимів електроприводу за необхідних, заданих показників якості регулювання.

## **2.2 Моделювання прямого пуску при фазовому і ШІМ – регулюванні АД**

Розроблена універсальна модель для прямого пуску, фазового регулювання і ШІМ-регулювання, яка показана на рис. 1.

Модель є сукупністю двох моделей: до початку руху і після його. Моделювання асинхронної машини виконується при вирішенні диференціальних рівнянь, що описують поведінку двигуна на основі теорії узагальненої машини [3].

У зазначеній літературі та в іншій науково-технічній літературі було виявлено, що при несинусоїдальній і несиметричній напрузі, що живить

обмотки статора асинхронного двигуна, найбільш раціональним є уявлення його режимів роботи рівняннями, записаними у нерухомій системі координат  $\alpha - \beta$ . Потокосцеплення обмоток статора та ротора у зазначеній системі координат визначається за такими виразами [3]:

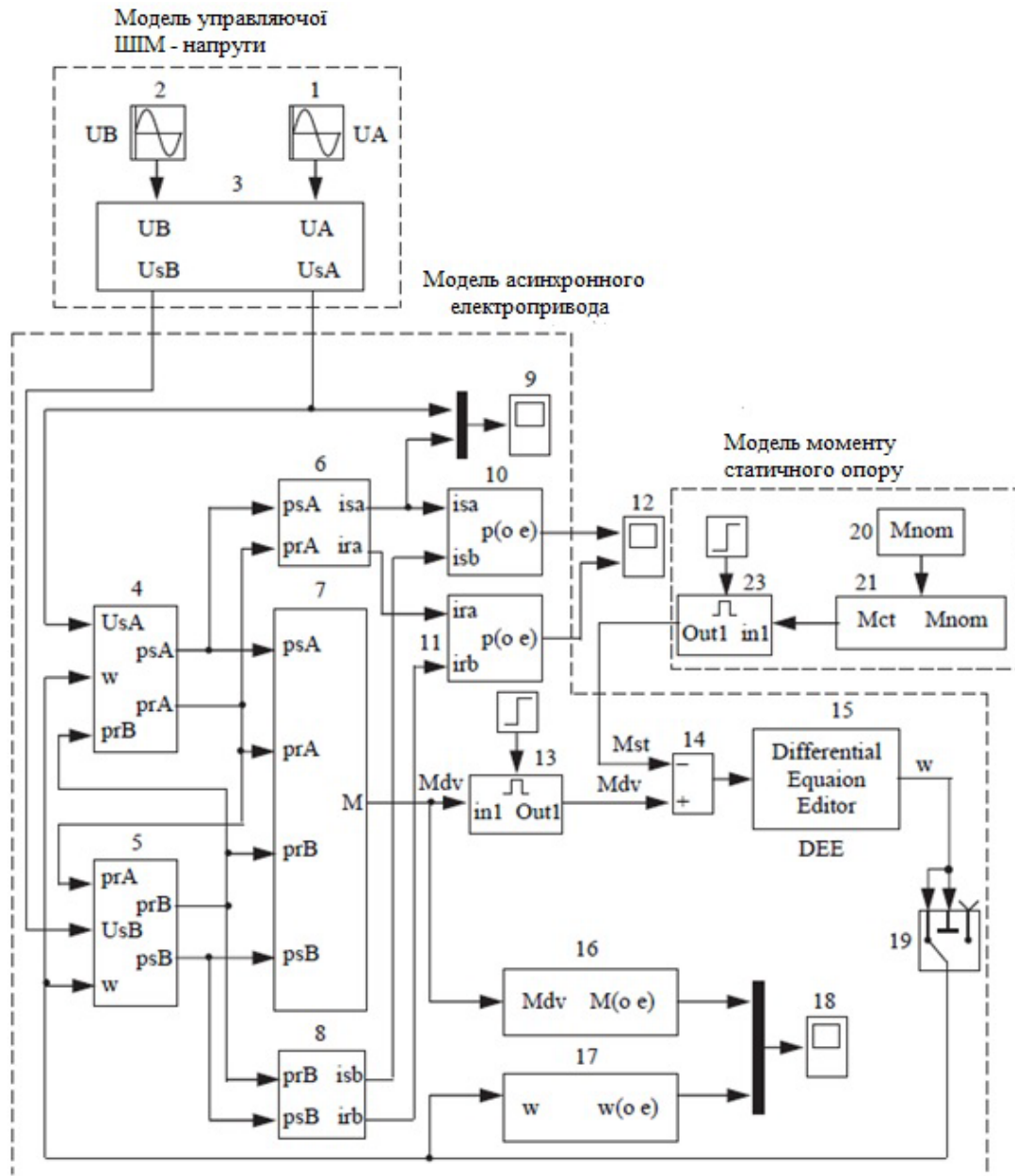


Рисунок 2.1 – Модель асинхронного електропривода з ШІМ - напругою

$$\begin{aligned}
\frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= U_{s\alpha} - a11\psi_{s\alpha} + a1\psi_{r\alpha}; \\
\frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= U_{s\beta} - a11\psi_{s\beta} + a1\psi_{r\beta}; \\
\frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= a21\psi_{s\alpha} - a22\psi_{r\alpha} - \psi_{r\beta}\omega_r; \\
\frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= a21\psi_{s\beta} - a22\psi_{r\beta} - \psi_{r\alpha}\omega_r,
\end{aligned} \tag{2.1}$$

де коефіцієнти, що входять у дані формули, визначаються за такими виразами:

$$\begin{aligned}
a11 &= \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a12 = \frac{R_s L_m}{L_s L_r - L_m^2}; \\
a21 &= \frac{R_r L_m}{L_s L_r - L_m^2}; \quad a22 = \frac{R_r L_s}{L_s L_r - L_m^2},
\end{aligned}$$

де  $R_s$  – активний опір обмотки фази статора;  $L_s = L_{s\sigma} + L_m$  – повна еквівалентна індуктивність фази статора, що складається з індуктивності від поля розсіювання ( $L_{s\sigma}$ ) та головного потоку ( $L_m$ );  $L_r = L_{r\sigma} + L_m$  – повна еквівалентна індуктивність фази ротора, що складається з індуктивності від поля розсіювання ( $L_{r\sigma}$ ) та головного потоку ( $L_m$ );  $R_r$  – активний опір обмотки фази ротора.

Рівняння електромагнітного моменту, виражене через потокозчеплення обмоток, обчислюється за формулою [6]

$$M_{дв} = \sqrt{3}p \frac{a12}{R_s} (\psi_{sB}\psi_{rA} - \psi_{sA}\psi_{rB}). \tag{2.3}$$

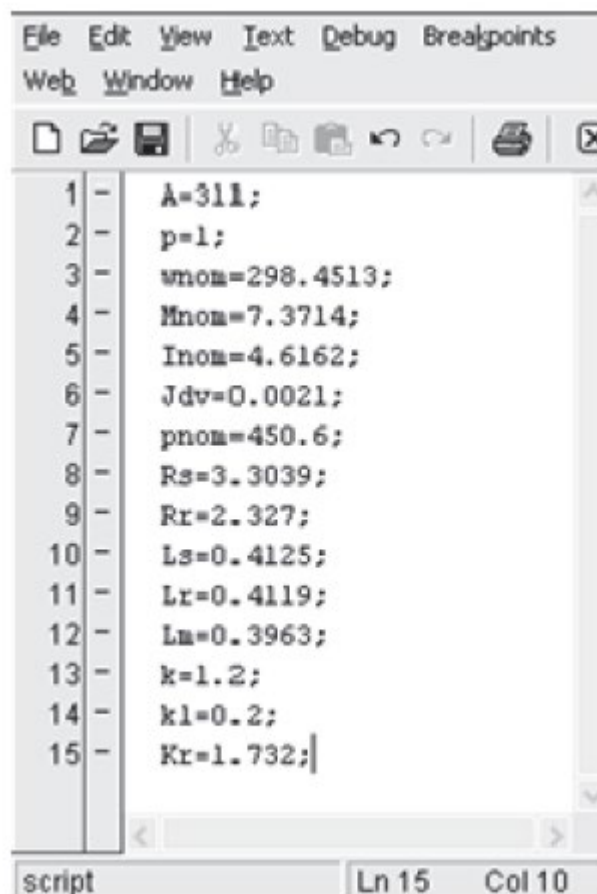
Рівняння руху електроприводу запишеться так [6]:

$$M_{дв} - M_{ст} = J_{\Sigma пр} \frac{d\omega_r}{dt}, \tag{2.4}$$

де  $J_{\Sigma пр}$  – сумарний наведений момент інерції електроприводу.

Управляючі впливи  $U_{s\alpha}$  і  $U_{s\beta}$  є блоками 1 і 2. Рішення наведених виразів виконується *Subsystems*-моделлю, блоками 4, 5, 6, 8, 16. Наприклад, знаходження поткозчеплень статора і ротора обмотки фази А виконується блоком 4, аналогічно побудований блок 5 для обчислення поткозчеплень статора і ротора обмотки фази В. Визначення електромагнітного моменту, що розвивається двигуном, здійснюється блоком 16. Рішення рівняння руху електроприводу має оригінальне оформлення.

Спочатку блоком 14 знаходиться різниця між моментом двигуна і моментом статичного опору механізму, потім вона надходить на процедуру диференціювання блоком 15 (*Differential Equation Editor*) для отримання значень швидкості електроприводу, що є кінцевим результатом обчислення моделі. Команда процедури диференціювання подається блоком 13 (*Step*). Момент подачі цієї команди вибирається вручну за налагоджувальним розрахунком та виявлення точки, в якій різниця  $M_{дв} - M_{ст}$  приблизно дорівнює нулю, а потім змінюється, створюючи позитивну зміну швидкості електроприводу. Для аналізу отримані результати доцільніше представляти у відносних одиницях, у яких за базові прийнято номінальні значення цих фізичних величин. Візуалізація результатів виконується віртуальними осцилографами (*Scope*). Для надання моделі узагальненості введемо до неї M-файл, куди заносяться вхідні дані, що у моделі, рис. 2.2.



```

1 - A=311;
2 - p=1;
3 - wnom=298.4513;
4 - Mnom=7.3714;
5 - Inom=4.6162;
6 - Jdv=0.0021;
7 - pnom=450.6;
8 - Rs=3.3039;
9 - Rr=2.327;
10 - Ls=0.4125;
11 - Lr=0.4119;
12 - Lm=0.3963;
13 - k=1.2;
14 - k1=0.2;
15 - Kr=1.732;

```

Рисунок 2.2- Вікно M – файла.

Технологічний цикл обладнання реалізується електроприводом за допомогою виконання циклограми завдання напруги, що управляє, в

підсистемі Signal Builder (блок 1). У ній формується бажана діаграма зміни кута керування напругою, що відповідає цьому циклу. Для поставленого завдання інтерес представляє початкова частина бажаної діаграми, тобто наростання управляючої напруги, (пуск електроприводу).

На рис. 3 представлені варіанти розвитку цієї напруги у процесі пуску. Перша залежність (лінія 1) технічно найпростіше реалізована, що представляє лінійну зміну кута за час  $t_{\text{пуск}}$ . Друга залежність (лінія 2) створює можливість організації форсованого розвитку електромагнітного моменту двигуна  $t_{\text{форс2}}$  за рахунок швидкого збільшення напруги живлення на обмотках електродвигуна до значення, що дорівнює моменту холостого ходу електроприводу з метою якнайшвидшого початку його руху. Тимчасова та вагова координати точки Б, з якої починається лінійна зміна кута за час  $t_{\text{пуск}}$ , визначаються в процесі налагодження моделі, а її дія задається в блоці 15 (Step).

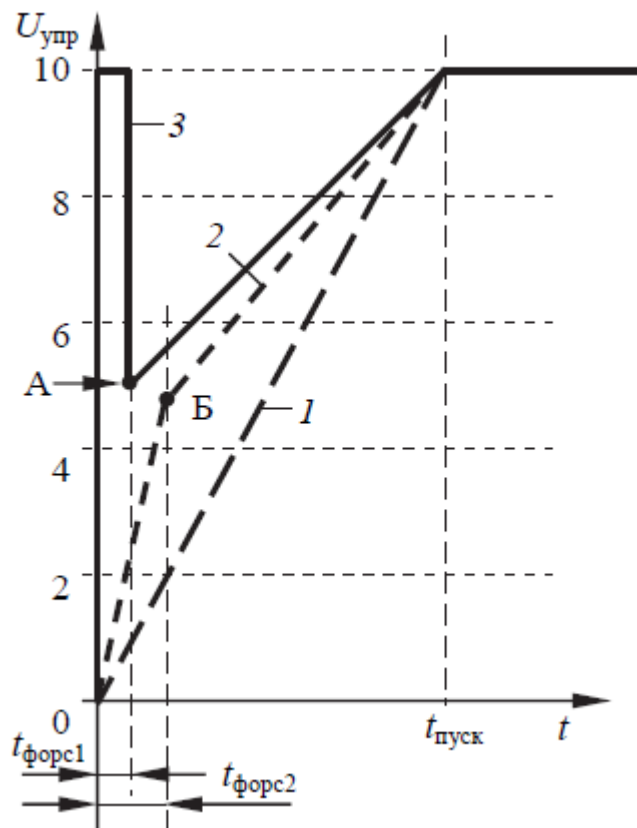


Рисунок 2.3 – Бажані діаграми зміни управляючої напруги

Аналогічно слід надходити і при налагодженні реального електроприводу з регулятором напруги. Третя залежність (лінія 3) організує форсований

розвиток електромагнітного моменту двигуна за рахунок подачі номінальної напруги на час  $t_{\text{форс1}}$  з тією ж метою, що й у попередньому випадку. Тимчасова та вагова координати точки А також визначаються при налагодженні моделі або електроприводу.

На рис. 4, 5, наведені епюри швидкості та електромагнітного моменту двигуна, а також сумарних втрат, отриманих в результаті розрахунку фазового регулювання, ШІМ-регулювання та прямого пуску режимів роботи електроприводу.

Слід звернути увагу на розвиток швидкості в способах пуску, що розглядаються. При прямому пуску зміна швидкості переважно підпорядковується інерційності електроприводу ( $J_{\Sigma\text{пр}}$ ) і неконтрольованого розвитку електромагнітного моменту двигуна. Характеризується цей процес суттєвими коливаннями швидкості на початку та незначними наприкінці пуску. При застосуванні керованого за впливом ( $U_{sA}$  і  $U_{sB}$ ) пуску коливання швидкості відсутні в початковому етапі розгону електроприводу і незначно виявляються при виході характерної точки, що оцінює положення електроприводу на механічних характеристиках асинхронного двигуна, на їх стійку частину ( $0 < s < s_{\text{кр}}$ ).

З керованих за завданням пусках перевагу слід віддати пуску з ШІМ-напругою. Воно гарантує найменші коливання швидкості в процесі розгону, найменші втрати потужності, найменші прискорення електроприводу. Для фазового регулювання при даній формі завдання кута зміни впливу, що задає, а саме підвищення напруги живлення до номінального за 4 с, час запізнення  $t_{\text{зап}} = 2,5$  с, обумовлений наростанням електромагнітного моменту двигуна до значення моменту холостого ходу. Час розгону двигуна після цього моменту  $t_{\text{п.упр}} = 0,08$  с [16].

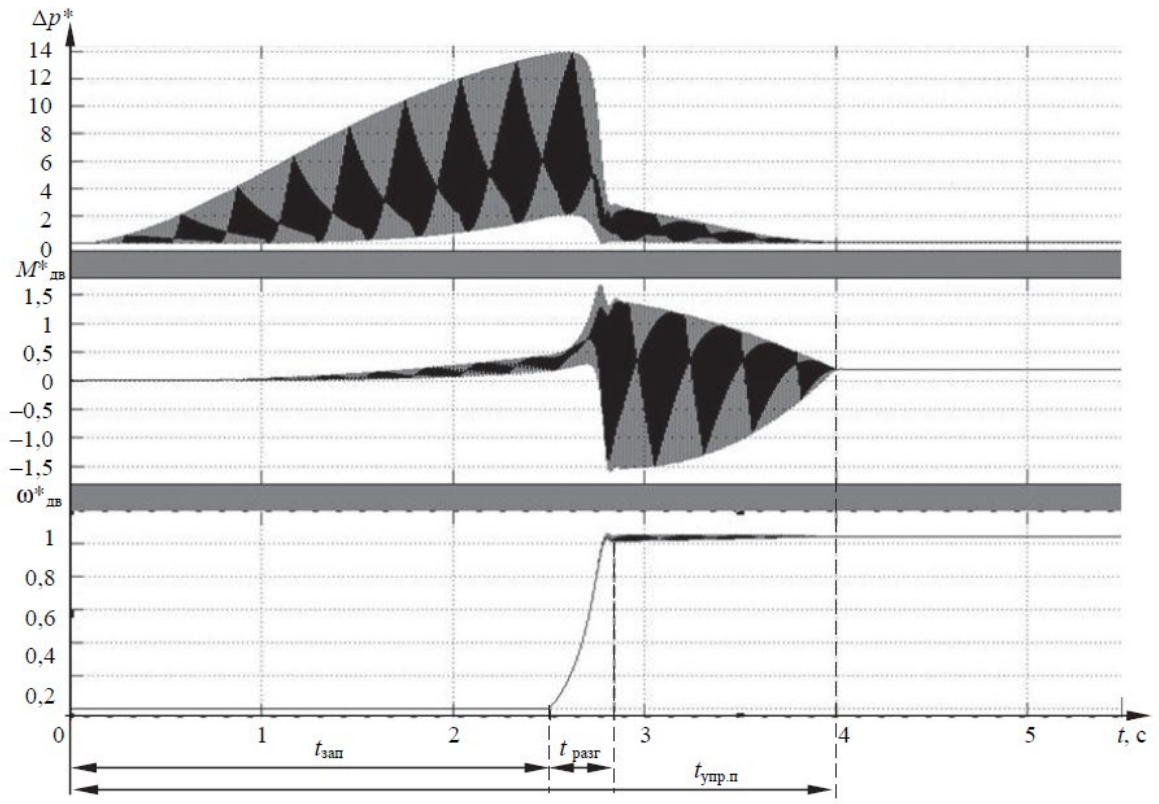


Рисунок 2.4 - Епюри втрат потужності  $\Delta p^* = f(t)$ ; електромагнітного моменту  $M^* = f(t)$ ; частоти обертання вала двигуна  $\omega^* = f(t)$  при фазовому регулюванні

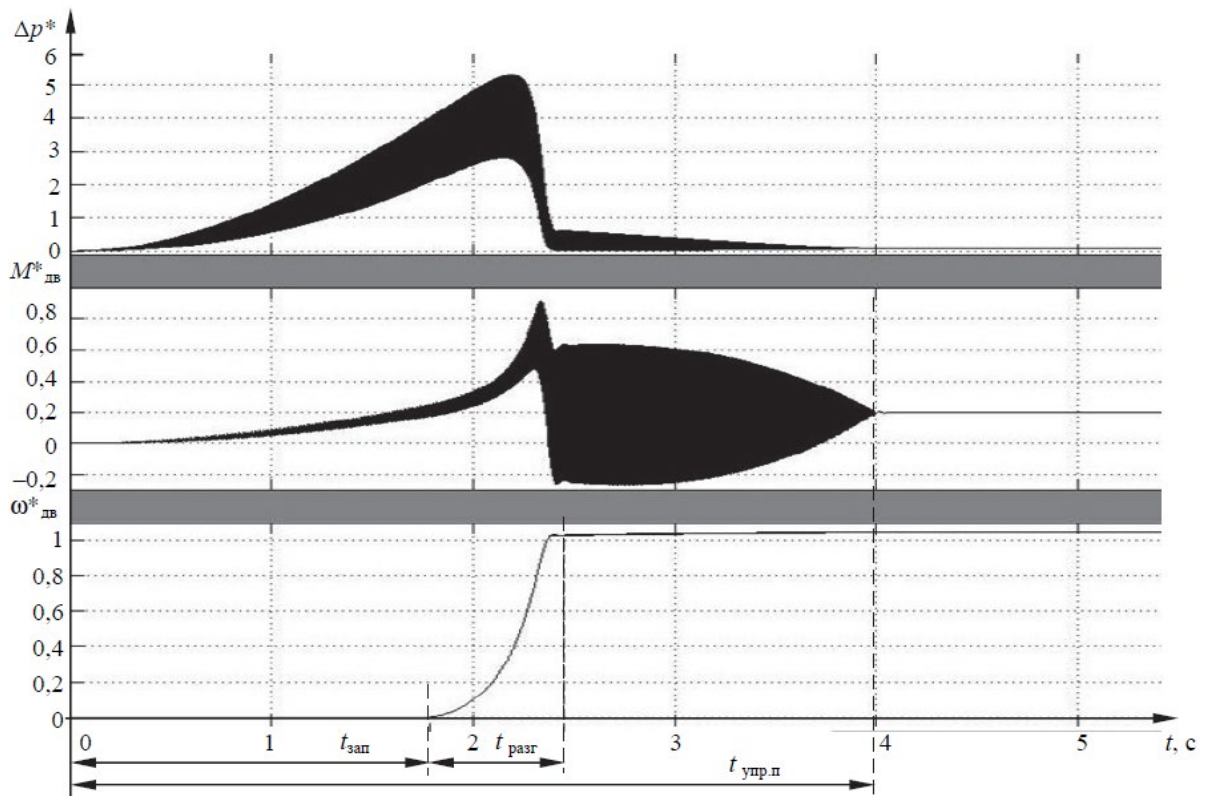


Рисунок 2.5 - Епюри втрат потужності  $\Delta p^* = f(t)$ ; електромагнітного моменту  $M^* = f(t)$ ; частоти обертання вала двигуна  $\omega^* = f(t)$  при ШІМ-регулюванні

Причому напруга продовжує наростати за рахунок управління до номінального. Амплітуда коливань моменту двигуна становить  $A = 3$  у. о., період  $T = 0,001$  с, частота коливань  $f = 1000$  Гц [16]. Період високочастотних коливань не істотно впливає через інерційність приводу робочою машиною, якою є друкарське обладнання, що володіє великими інерційними масами поступального і обертального руху. Амплітуда коливань кутової швидкості двигуна становить  $A = 0,033$  у. о. від номінального значення, період коливань  $T = 0,001$  с, частота коливань  $f = 1000$  Гц. З отриманих даних видно, що момент двигуна та його кутова швидкість знаходяться у протифазі. Відносні втрати потужності двигуна за час пуску перевищують його номінальні значення, досягаючи максимальних значень, які виникають під час руху вала двигуна від нульової швидкості в зоні великих ковзань, що перевищують критичне ковзання. Відносні втрати потужності перевищують номінальні втрати 4,89 разу. Інтегральний показник втрат у період зміни напруги від нуля до номінальних становить 9,797. У режимі з ШІМ-регулюванням характер зміни моменту відповідає задаючому значенню напруги, яким живиться електродвигун. Коливання електромагнітного моменту двигуна з'являються в процесах пуску та обумовлюються застосуванням ШІМ-напруги. Під час керованого пуску  $t_{п.упр}$  момент має коливальний характер із високочастотною складовою, що відповідає частоті модуляції ШІМ-напруги. У процесі пуску простежується інтенсивне зростання моменту, пов'язане з тим, що регульовальні характеристики із зміною кута управління ШІМ-напругою входять до зони значних динамічних моментів, наближаючись до природної механічної характеристики. Істотного впливу на розвиток швидкості ці коливання не мають, оскільки вони мають високочастотний характер і фільтруються механічною частиною електроприводу. Значні втрати у двигуні



спостерігаються тільки під час  $t_{\text{зап}} = 1,7$  с, коли ротор двигуна не обертається (режим короткого замикання), час розгону двигуна становить  $t_{\text{п.упр}} = 0,6$  с. Амплітуда коливань моменту двигуна становить  $A = 0,84$  у. о., період коливань  $T = 0,0025$  с, частота коливань  $f = 400$  Гц [16]. Амплітуда коливань кутової швидкості двигуна  $A = 0,0045$  у. о., період коливань  $T = 0,0035$  с, частота коливань  $f = 1000$  Гц. Після початку руху за рахунок збільшення кута управління ШІМ-напруги втрати знаходяться на рівні номінального значення і до кінця пуску відповідають втратам холостого ходу. Відносні втрати та потужності в даному циклі роботи досягають свого максимального значення 5,5 у. о. Інтегральний показник втрат за період зміни напруги від 0 до номінальних становить 4,198.

На основі розгляду характеру зміни електромагнітного моменту для прямого пуску, фазового управління та ШІМ-регулювання робимо висновок, що максимальні значення моменту при прямому пуску досягають триразових  $M_{\text{ном}}$ , при фазовому регулюванні  $1,6 M_{\text{ном}}$ , а при ШІМ-напрузі  $0,86 M_{\text{ном}}$ , що говорить про вплив їх на стан кінематичних ланок технологічної машини [7]. Великі динамічні моменти збільшують люфти та зазори, порушуючи цим працездатність кінематики та погіршуючи якість виконання технологічного процесу (друкування, фальцювання тощо).

### **Висновки по другому розділу**

Розгляд втрат у разі дозволяє зробити висновок, що загальні втрати при керованому пуску трохи менше втрат потужності при прямому пуску. При пуску з ШІМ-регулюванням відбувається придушення вищих гармонік живлячої напруги електродвигуна, покращуючи гармонійний склад напруги живлення і тим самим енергетичні показники, а також дозволяє сформувати симетричну трифазну систему як для фазних, так і для лінійних напруг. Гармонічний склад живильного асинхронного двигуна напруги визначає форму механічних характеристик, а отже, його регулювальні властивості та енергетичні показники.

### РОЗДІЛ 3

## МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПУСКУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Вибір силової схеми управління АТ визначає можливості асинхронного електроприводу (АЕП) щодо реалізації пускових режимів роботи. Технічні та економічні показники силової схеми відіграють головну роль у виборі сфери застосування АЕП і виявляють доцільність їх промислового застосування. Однак, досі немає чіткої думки, де і в якому випадку застосовувати ту або іншу силову схему параметричного керування асинхронного електроприводу, а недостатньо обґрунтований вибір силової схеми може навести до значних економічних втрат.

Процес вибору раціональної схеми можна розглядати як завдання оптимізації якості протікання її статичних та динамічних процесів під час пуску АЕП. До основних показників оцінки цих режимів відносять час розгону АЕП з урахуванням впливу електромагнітного та статичного моментів, що є актуальним завданням.

Одним із шляхів вирішення цього завдання є використання розрахункових та експериментальних даних, які визначають час розгону АЕП, які наведені у вітчизняній та зарубіжній літературі . Однак цей шлях не дає однозначної відповіді на це завдання через різні умови роботи механізмів, використання тільки деяких типів перетворювачів та т.п. [9-13, 17]. До того ж, він може призвести до невірних результатів, оскільки застосування тієї чи іншої силової схеми перетворювача визначається технічними та економічними умовами стосовно кожного конкретного промислового механізму.

**Постановка задачі.** Всебічний аналіз різноманітності силових схем управління та дослідження основних режимів АД з метою визначення часу пуску АЕП пов'язаний з великим обсягом аналітичних обчислень та необхідністю проведення експериментальних досліджень. Тому для систематизованого аналізу, отримання розрахункових значень часу пуску для

раціональних варіантів силових схем для ланцюгів двигуна найбільш зручно користуватися узагальненою (загальною) схемою управління АД та її математичним описом, який дозволяє створити загальний алгоритм управління та ефективно застосовувати аналітичні методи розрахунку та при дослідженні використовувати ПЕОМ. Для побудови узагальненої схеми управління АД запропоновано модульний спосіб, реалізація якого здійснюється шляхом застосування елементарних модулів: силового та зв'язку. Силовий модуль (СМ) містить, як правило, керований вентиль і пасивні елементи (активні опори  $R$ , конденсатори  $C$  і індуктивності  $L$ ). Модуль зв'язку (МЗ) складається лише з пасивних елементів. У СМ, крім тиристора, можуть бути застосовані діоди, симістори та інші напівпровідникові прилади. Параметри  $R$ ,  $C$ ,  $L$  елементів СМ та МЗ за потреби можуть змінюватися імпульсним, широтно-імпульсним або іншим методом. Однак при цьому моделі стають складнішими, оскільки параметри елементів СМ та МЗ змінюються за допомогою додаткових керованих вентилів. При побудові узагальненої схеми управління АД цілком достатньо застосувати найпростіші модулі, щоб отримати загальну структуру, з якої утворюється достатньо варіантів силових схем. Так, з використанням найпростіших силових модулів, до складу яких входять два опори і тиристор, і модуля зв'язку, що містить тільки один активний опір, отримана узагальнена схема параметричного управління асинхронним електродвигуном (АЕД) силова схема якої наведена [14].

Послідовне включення силового тиристора та активного опору, паралельно яким підключено другий додатковий опір, утворює силовий модуль, який названий резисторно-тиристорним (РТМ). Кожен РТМ являється не лише окремим функціональним елементом, а й конструктивно закінченим блоком-модулем.

Наявність тиристорів у РТМ при їх керуванні призводить до зміни еквівалентної величини опору модуля, що зумовлює необхідність математичного моделювання цих вентилів з урахуванням режимів їхньої

роботи та особливостей використання в електроприводі. Такий підхід викладено в [14], суть якого полягає в тому, що робота вентилів визначається логічним синтезом і функціями, що перемикаються. Це дозволило отримати математичний опис роботи вентилів у РТМ для різних схем перетворювачів та створити загальний алгоритм для розрахунку ПЕОМ часу пуску АЕП.

Еквівалентний опір  $i$ -го резисторно-тиристорного модуля визначається за такою формулою [13]:

$$R_{mi} = \frac{R_{s(r)} [rK_i + r_{s(r)}]}{R_{s(r)} + [rK_i + r_{s(r)}]}, \quad (3.1)$$

де  $R_{s(r)}$  – додаткові опори, які включені до ланцюга статора (ротора);  $r_{s(r)}$  – опору обмоток статора (ротора);  $r$  – опір вентиля у закритому стані,  $K_i$  – функція, що характеризує стан вентилів (при  $K_i = 0$  – вентиль відкритий, при  $K_i = 1$  – закритий).

**Матеріал та результати досліджень.** Для врахування впливу процесів пуску на режим роботи механізму необхідне знання їхньої тривалості та характеру протікання. Визначення в ремні розбігу найпростіше проводиться графоаналітичним методом.

Для цього будуємо криву моменту двигуна в частках номінального моменту при заданому значенні напруги та криву статичного моменту, також виражену в частках номінального моменту двигуна в залежності від ковзання. Потім визначаємо надлишковий момент, рівний різниці між моментом двигуна і статичним моментом, і розбиваємо криву надлишкового моменту на ряд прямокутників  $m_{S1}, m_{S2}, \dots, m_{Sn}$  і так далі, а потім визначаємо час розбігу або вибігу за відомою формулою [16]:

$$t_n = T_a \cdot \left[ \frac{\Delta S_1}{\Delta m_{S1}} + \frac{\Delta S_2}{\Delta m_{S2}} + \dots + \frac{\Delta S_n}{\Delta m_{Sn}} \right], \quad (3.2)$$

де  $T_a$  - механічна постійна часу;  $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_n$  - ділянки ковзання двигуна.

При розбігу  $\Delta S_n$  – негативні, а  $\Delta m_{Sn}$  – позитивні. При вибігу  $\Delta S_n$  – позитивні, а  $\Delta m_{Sn}$  – негативні.

Однак, графоаналітичний метод не зручний, не раціональний та не може бути повною мірою використаний. У той же час для розрахунку часу запуску АЕП моделі краще використовувати аналітичний метод, у якому використовується загальне рівняння руху електропривода. Це дозволяє не тільки визначати тривалість перехідного процесу при пуску, але виразити його динаміку під час переходу від однієї частоти обертання ротора до іншої.

Час пуску асинхронного електроприводу  $t_n$  при початковій кутовій швидкості ротора  $\omega_{rn}$  визначимо аналітичним шляхом під дією постійного статичного моменту навантаження  $M_c$  і моменту інерції електроприводу  $J_\Sigma$  за виразом [16]:

$$t_n = \frac{J\omega_{rn}}{M_c} \left\{ \left[ \frac{(b-b_1)b_1}{\alpha^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{b_1}{\alpha}\right)^2 - \frac{c}{\alpha}} - \frac{b-b_1}{\alpha} \right] + \right. \\ \left. + \ln \left[ S + \left( \frac{b_1}{\alpha} + \frac{\sqrt{\left(\frac{b_1}{\alpha}\right)^2 - \frac{c}{\alpha}}}{S_H} \right) + \left( \frac{b_1}{\alpha} - \sqrt{\left(\frac{b_1}{\alpha}\right)^2 - \frac{c}{\alpha}} \right) \right] \right\} \quad (3.3)$$

Коефіцієнти у виразі (3.3) визначаються наступним чином:

$$\alpha = (1 + \tau_2)^2 (r_A + r_{2A})^2 + [X_A + (1 + r_1) \cdot X_\alpha]^2;$$

$$b = (1 + \tau_1) \cdot (1 + \tau_2) + (r_A + r_{2A}) \cdot (r_\alpha + r_{2\alpha}) \cdot [X_A + (1 + \tau_1) X'_\alpha] \cdot \tau_1 \cdot \frac{(r_A + r_{2A}) \cdot (r_\alpha + r_{2\alpha})}{X_\alpha};$$

$$b_1 = b - \frac{K_m \cdot U_\Pi^2 (r_\alpha + r_{2\alpha})}{2M_c \omega_{rH}};$$

$$c = (1 + \tau_2)^2 \cdot (r_\alpha + r_{2\alpha}) + \tau_1^2 \frac{(r_\alpha + r_{2\alpha})^2 (r_A + r_{2A})}{X_\alpha^2},$$

де  $\tau_1, \tau_2$  – коефіцієнти розсіювання статора та ротора;  $r_A, r_a$  – активні опори обмоток статора та ротора;  $X_A, X_a$  – індуктивні опори обмоток статора та ротора;  $r_{2A}, r_{2a}$  – еквівалентні опори РТМ статора та ротора;  $U_\Pi$  – лінійне живильне напруга мережі;  $S, S_H$  – поточне та номінальне ковзання;  $K_m$  – кратність максимального моменту.

Активні  $r_A, r_a$  та індуктивні  $X_a$  опори, що входять до змінних коефіцієнтів, беруться з паспортних даних АД. Еквівалентні опори РТМ  $r_{2a}$  і  $r_{2A}$  обчислюються за допомогою функцій, що перемикають, за формулою (3.1). Як видно з рівняння (3.3), час пуску АЕП залежить від величини еквівалентних опорів ланцюгів статора та ротора АД, початкового та поточного значень його ковзання, напруги живильної мережі та параметрів АЕП.

Результати досліджень АЕП показали, що втрати електричної енергії в двигуні зменшуються при зміні еквівалентної величини опорів ланцюга статора і ротора АД, проте тривалість розбігу при цьому зростає зі збільшенням значень опорів, що входять в РТМ. На рис. 3.1,а наведені криві  $t_n = f(R_{\text{об}}, R_{\Sigma})$  часу розбігу функції зміни повного опору  $R_{\text{об}}$  двигуна і сумарної величини еквівалентних опорів  $R_{\Sigma}$  РТМ, на рис. 3.1,б - від статичного моменту і при зміні навантаження для різних значень початкового ковзання  $S_{\text{ноч}}$  АД, де час розгону  $t_n$  представлено в часах часу пуску  $t_0$  при холостому ході, а статичний момент - у частках критичного моменту  $M_k$ .

При незначній величині повного опору ланцюга двигуна, що дорівнює лише індуктивному опору контуру намагнічування  $R_{\text{об}} = X_M$  час розгону АЕП практично залишається одним і тим же. Однак, при збільшенні його до значення, що дорівнює індуктивному опору статора обмотки і більше  $X \geq X_A$ , час розбігу значно збільшується.

При  $R_{\text{об}} = X_A$  воно збільшується більш ніж 5 разів [17].

Тривалість процесу пуску АЕП залежить від величини та характеру статичного моменту  $M_c$ . Криві на рис. 3.1 не виявляють оптимального значення критичного ковзання  $S_k$ , що забезпечує мінімальну тривалість перехідних процесів пуску АЕП при тиристорному параметричному управлінні. Залежність тривалості перехідних процесів під час пуску від  $S_k$  ілюструється залежностями  $t_n/T_a = f(S_k)$  (рис. 3.1,в), наведеними до різних типів силових схем комутаторів. Зі збільшенням критичного ковзання  $S_k$ , що визначається величиною активних опорів статорного та роторного ланцюгів,

час розгону АЕД знижується, досягає мінімуму при деякому значенні  $S_K$ , що залежить від статичного моменту  $M_c$ , а потім знову зростає.

Вплив статичного моменту на величину критичного ковзання незначний. Час розбігу АЕП залежить від кратності максимального моменту  $K_M$ , що визначається ставленням максимального моменту  $M_{max}$  АЕД для його номінального значення  $M_H$ . Чим більша кратність максимального моменту  $K_M$ , тим за рівних умов менший час пуску. В умовах промислової експлуатації АЕП необхідно, щоб час  $t_n$  при номінальній та зниженій напругах мало найменше значення. Тут потрібно, щоб при відновленні напруги, наприклад після відключення короткого замикання в мережі, АЕД швидше відновлював номінальну швидкість. Тому  $K_M$  має бути максимальним. Розглянемо вплив кратності максимального моменту  $K_M$  на час розбігу на прикладі АЕД нормального виконання 4А, що має критичне ковзання  $S_K = 0,15$  і механізм вентиляторного, що приводить в рух типу. Час розбігу  $t_n$  виразимо в частках постійної механічної часу  $T_a$ . Криві часу розбігу для різних значень кратності максимального  $K_M$  моменту в залежності від зміни кратності напруги  $K_u$  при пуску двигуна дано на рис. 3.1, г у вигляді функцій  $t_n/T_a = f(K_M, K_u)$  [16].

Кратність напруги  $K_u$  дорівнює відношенню дійсної величини напруги  $U_{ss}$  на статорних обмотках АЕД до номінальної напруги  $U_{SH}$ .

На наведених графіках (рис. 3.1, г) крива 1 обчислена за  $K_M = 3$ , крива 2 – за  $K_M = 2,5$ , крива 3 – за  $K_M = 2$  і крива 4 – за  $K_M = 1,5$ . З аналізу цих кривих випливає, що час розбігу АЕД при тиристорному параметричному управлінні залежить від кратності максимального моменту: так, наприклад, при збільшенні кратності максимального моменту з 1,5 до 2,5 час розбігу зменшується при номінальній напрузі в 2 рази, а при напрузі 0,7 номінальної – у 2,4 рази. Час розбігу АЕП зменшується не пропорційно до збільшення кратності  $K_M$ . Так наприклад, зі збільшенням  $K_M$  з 1,5 до 2 час розбігу при напрузі 0,7 номінального зменшується з 8 до 5,25, тобто. в 1,6 рази, а при зміні кратності максимального моменту від 2,5 до 3 час пуску зменшується з 3,5 до 2,5. За час запуску АЕД споживає підвищений струм.

Знаючи залежність струму від часу, неважко визначити втрати електричної енергії та підвищення температури обмоток двигуна.

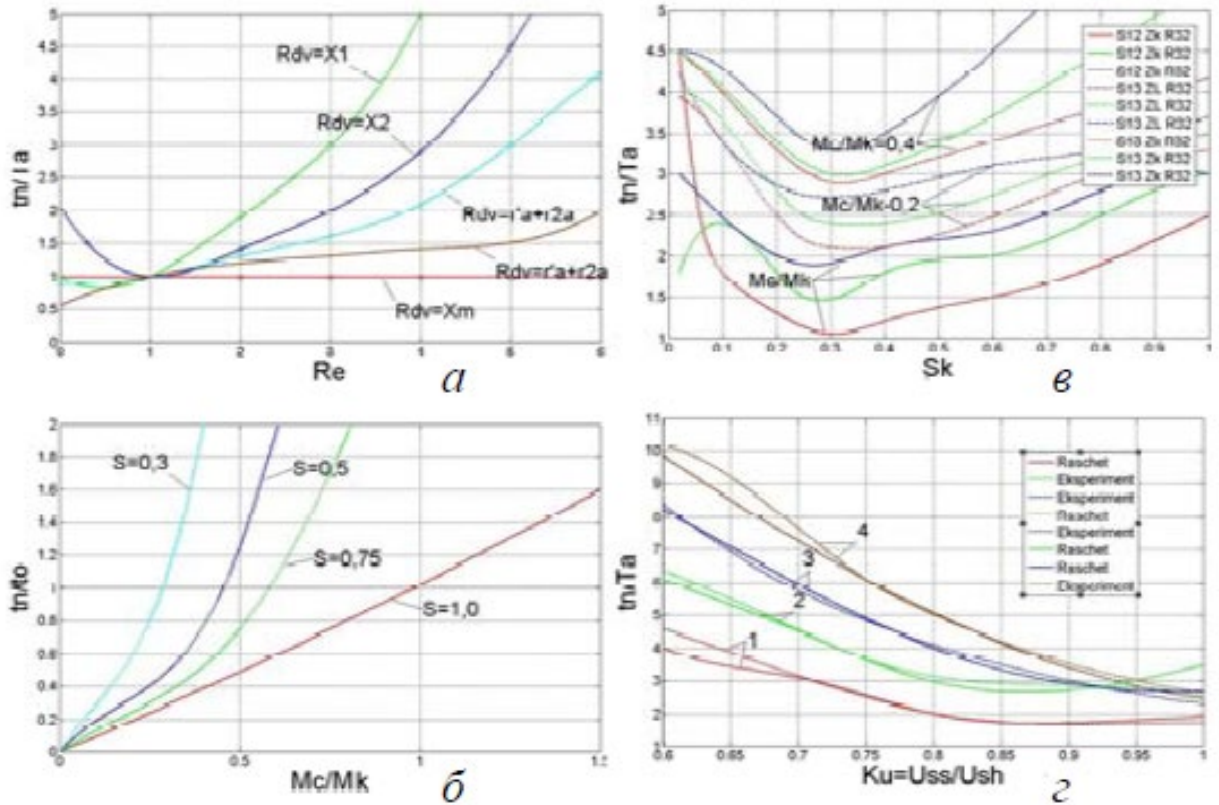


Рисунок 3.1. Криві часу розбігу АД в залежності від сумарної величини еквівалентних опорів РТМ (а) і статичного моменту (б), критиченого ковзання  $t_n/a=f(S_k)$  для різних типів силових схем комутаторів (в) і кратностей максимального моменту і напруги  $t_n/T_a=f(K_M, K_u)$  (г)

При пуску під навантаженням втрати електричної енергії в роторі АЕД завжди більше, ніж при пуску вхолосту, і ці втрати будуть тим більшими, ніж менше напруга на обмотках двигуна. При зниженні напруги за допомогою кута  $\alpha_s$  на 25 %, тобто.  $K_u = 0,75$ , кількість тепла збільшується в 4,7 рази, водночас тривалість розбігу зростає. Якщо прийняти тривалість розбігу при номінальному напрузі за 1,0 то за зниженні напруги до  $K_u = 0,8$  тривалість розбігу збільшується в 2,25 разу, а  $K_u = 0,7$  – вчетверо. Тому пуск АЕД при номінальній напрузі не вигідний не тільки з погляду втрат електричної енергії в двигуні, але і за тривалістю перебігу перехідного процесу - значно збільшується час розгону електроприводу. В результаті цього з'являється



вибір оптимуму між втратами електричної енергії двигуні та тривалістю процесу пуску АЕП.

Перевага надається тому чи іншому параметру, виходячи з вимог, що висуваються до механізму. Залежно від закону зміни напруги на обмотках АЕД по-різному протікає перехідний процес під час пуску АЕП. Як видно з представлених на рис. 3.2 кривих розбігу (а) та пускового струму (б), залежно від часу при прямому пуску з  $U_{SH}$  та  $M_C = 0,2$  (крива 1), двигун практично миттєво виходить на номінальну швидкість обертання. Підвищення  $M_C = 0,4$  (крива 2),  $M_C = 0,8$  (крива 3) та  $M_C = 1,0$  (крива 4) призводить до збільшення часу пуску. Тривалість протікання пускового струму через обмотки двигуна збільшується. Кратність пускового струму  $I_n$  до пускового струму двигуна при нерухомому роторі  $I_k$  практично залишається максимальним.

Зменшення напруги живлення двигуна, наприклад, до  $0,5U_{SH}$ , призводить до збільшення часу розбігу та зниження кратності пускового струму двигуна. Регулюючи напругу живлення на обмотках статора двигуна згідно із законом (2), можна змінювати час розбігу за підтримки кратності пускового струму у межах (рис. 3.2,б) [15].

Тут необхідно зазначити, що при такому способі керування двигуном можна отримати заправні або довідкові швидкості двигуна, прийнятні для виконання короточасних технологічних операцій механізмів, таких як дотяжка, заправка та інші.

Для реалізації такого способу пуску АД використовуємо спеціальний задатчик інтенсивності, що формує зміна напруги на статорі за слідуючого математичного виразу [14]:

$$U_{ss} = \left\{ \begin{array}{l} U_{руш} \cdot e^{-t/t_1} \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_1 \\ U_{\min} + U_{руш} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_2-t_1}{T_2}} \right) \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_1 \end{array} \right\}, \quad (3.4)$$

Напруга рушіння (3.4) визначається як:

$$U_{руш} = U_H \sqrt{M_c^0 / M_{II}},$$

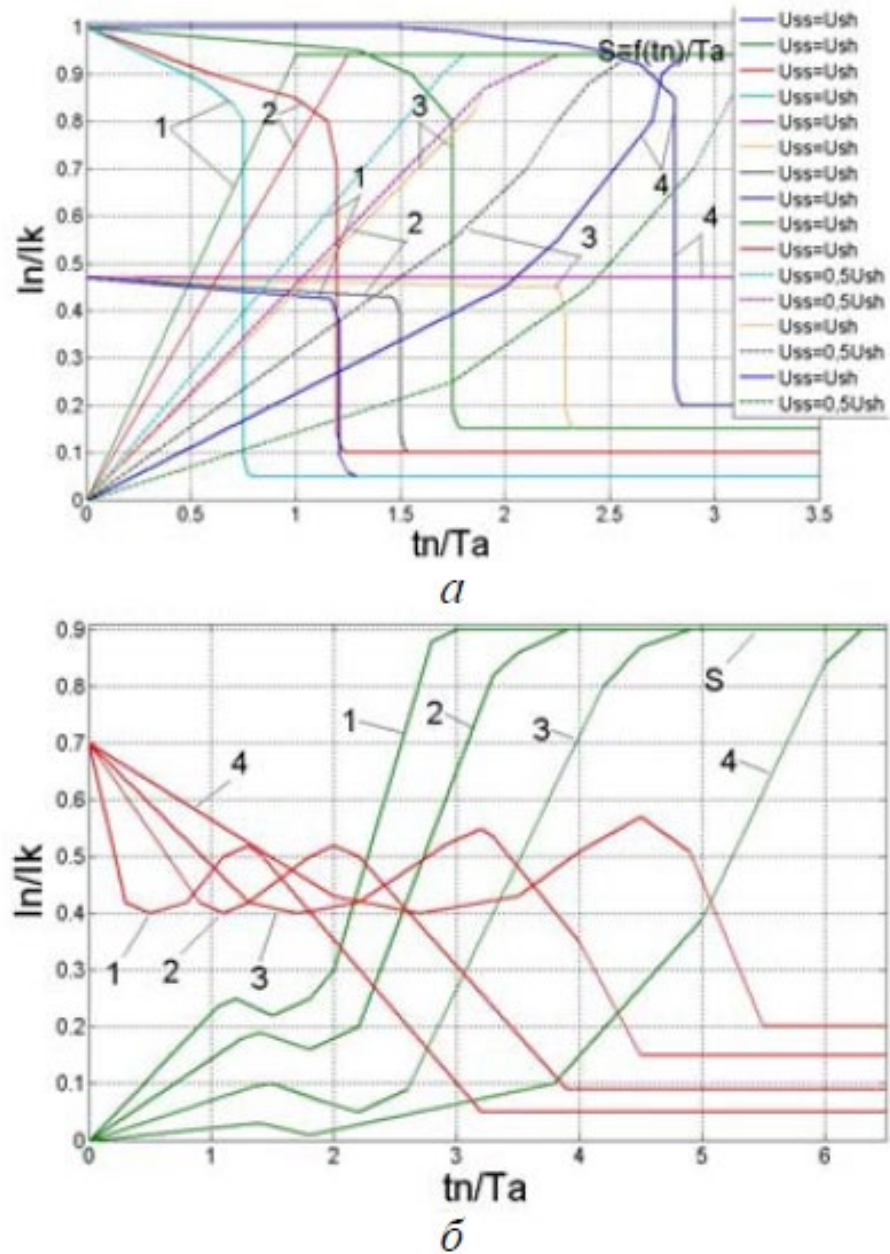


Рисунок 3.2 – Криві розбігу і пускового струму АД при параметричному управлінні

де  $M_c^0$ ,  $M_{II}$  - відповідно статичний момент при нерухомому роторі АД і пусковий момент АД при номінальній напрузі мережі. Мінімальна напруга у виразі (3), при якому ротор АД ще обертається, залежить від статичного моменту та визначається як:

$$U_{пуш} = U_H \sqrt{M_c^s / M^s},$$

де  $M_c^s, M^s$  - відповідно статичний момент при мінімальній частоті обертання ротора і момент двигуна при номінальній напрузі мережі живлення і мінімальній частоті обертання його ротора.

Постійна часу  $T_1$  для виразу (3.4) визначається з основного рівняння руху електроприводу та механічної характеристики АД і визначається для конкретного електроприводу. Значення  $T_1$  не перевищує п'яти періодів напруги мережі. Інша стала часу  $T_2$  вибирається в межах 1-2 значень заданого часу пуску.

### **Висновки по третьому розділу**

Запропоновано аналітичний метод для визначення часу розбігу АЕП при використанні в статорних та роторних ланцюгах АД керуючих резисторно-тиристорних модулів.

## ВИСНОВКИ

На основі розгляду характеру зміни електромагнітного моменту для прямого пуску, фазового управління та ШІМ- регулювання робимо висновок, що максимальні значення моменту при прямому пуску досягають триразових  $M_{ном}$ , при фазовому регулюванні  $1,6 M_{ном}$ , а при ШІМ-напрузі  $0,86 M_{ном}$ , що говорить про вплив їх на стан кінематичних ланок технологічної машини. Великі динамічні моменти збільшують люфти та зазори, порушуючи цим працездатність кінематики та погіршуючи якість виконання технологічного процесу (друкування, фальцювання тощо).

Розгляд втрат у разі дозволяє зробити висновок, що загальні втрати при керованому пуску трохи менше втрат потужності при прямому пуску. При пуску з ШІМ-регулюванням відбувається придушення вищих гармонік живлячої напруги електродвигуна, покращуючи гармонійний склад напруги живлення і тим самим енергетичні показники, а також дозволяє сформувати симетричну трифазну систему як для фазних, так і для лінійних напруг. Гармонічний склад живильного асинхронного двигуна напруги визначає форму механічних характеристик, а отже, його регульовальні властивості та енергетичні показники.

Запропоновано аналітичний метод для визначення часу розбігу АЕП при використанні в статорних та роторних ланцюгах АД керуючих резисторно-тиристорних модулів.

Встановлено, що для забезпечення необхідного діапазону зміни часу пуску малоінерційних електроприводів необхідно регулювати напругу на обмотках статора АД за складним законом із двома постійними часами: спадаючою за експоненційним законом і зростаючою, тим самим законом. Це необхідно, щоб перехідні електромагнітні моменти АД не перевищували допустимі значення.

Показано, що сумарний момент інерції та статичний момент АЕП не мають істотного впливу на максимальне значення електромагнітного моменту, що

дозволяє вибрати найпростіші закони керування пуском електроприводу та застосовувати в більшості випадків розімкнуту систему керування. Найбільше впливають вони на час перехідного процесу, частоту коливань електромагнітного моменту і швидкість обертання АД, що рекомендується враховувати при проектуванні та впровадженні в різні технологічні механізми та агрегати зазначених електроприводів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 316 с.: іл.
2. Голодний І.М., Санченко О.В. Г 60 Регульований асинхронний електропривод вентиляційної системи з широтно-імпульсним керуванням. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2020. – 117 с.: іл.
3. Донець О. В. Теорія електропривода : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка) / В. І. Колотіло, О. В. Донець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 148 с.
5. Ю.В.Шуруб, Статистична оптимізація регульованих за напругою асинхронних електроприводів // Техн. електродинаміка. 2014. № 5с. 115-118
5. Плешков С. П. , Серебренніков С.В. Енергоефективний електропривод у промисловості та сільськогосподарському виробництві: Навчальний посібник. – Кіровоград: РВЛ КНТУ, 2016.– 161 с.
6. А. А. Видмиш, Л. В. Ярошенко. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.
7. Теорія електроприводу Конспект лекцій з дисципліни „Теорія електроприводу” Ч. 1. „Механічні характеристики електропривода постійного та змінного струму” / А.В. Гнатов. – Х.: ХНАДУ, 2020. – 144 с.
8. Савченко І. Д. Приводи систем керування [Текст]: навч. посіб./ І. Д. Савченко.–Д.: РВВ ДНУ, 2014. – 112 с.
9. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.
10. Електропривод: Навчальний посібник / О.Ю. Синявський, П.І. Савченко, В.В. Савченко, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Ю.М. Хандола, І.П. Ільчов, В.Ю. Рамш, В.Я. Бунько; За ред. О.Ю. Синявського. – 2-е вид., доп і перероб.

11.Частотне керування асинхронним приводом: Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни „Основи електропривода” для студентів напряму підготовки 6.100101 – „Енергетика та електротехнічні системи в АПК” / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. – Ніжин.: 2011. – 98 с.

12.[https://stud.com.ua/84181/tehnika/osnovni tendentsiyi rozvitku suchas nogo elektroprivoda](https://stud.com.ua/84181/tehnika/osnovni_tendentsiyi_rozvitku_suchas_nogo_elektroprivoda)

13.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.: іл

14.Возняк, О.М., Штуць. А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ТВОРИ, 2021. – 280 с.

15.Закладний О.М. 3-18 Електропривод: Навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний – К.: НТУУ «КПІ», 2008. - 316 с.: іл.

16.Плахтій О. А. Дослідження системи керування пристрою плавного пуску асинхронного двигуна / О. А. Плахтій, В. П. Нерубацький, Д. А. Гордієнко, Д. А. Шелест, А. В. Синявський // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. - 2022. - Випуск 202. - С. 62-77.

17.Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Казак М.О. Г75 Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.

18.Панкратов А.І. П – 16 Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Сис теми керування електроприводами» (для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерноінтегровані технології» денної і заочної форми навчання)/ – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.

