

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Шадура Дмитро Володимирович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Методика реалізації цифрового управління електроприводом в режимі
електродинамічного гальмування
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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

Шадура Д.В.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2024

АНОТАЦІЯ

Шадура Д.В. Методика реалізації цифрового управління електроприводом в режимі електродинамічного гальмування Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

Метою даної роботи є дослідження електродинамічних процесів у частотно-керованому електроприводі методом математичного моделювання - зокрема, в режимі двострумowego динамічного гальмування з урахуванням вищих гармонік струму статора асинхронного двигуна.

Запропоновано використовувати просторово-векторну широтно-імпульсну модуляцію з m -кратною підмодуляцією несучої частоти і без підмодуляції у режимі гальмування АД при неоднозначності сил тертя у ланках рухомості виконавчого механізму.

Ключові слова: асинхронний двигун, режим гальмування, математичне моделювання.

ABSTRACT

Shadura D.V. The method of implementing digital control of an electric drive in the mode of electrodynamic braking Qualifying work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The purpose of this work is to study electrodynamic processes in a frequency-controlled electric drive by the method of mathematical modeling - in particular, in the mode of two-current dynamic braking, taking into account the higher harmonics of the stator current of an asynchronous motor.

It is proposed to use space-vector pulse-width modulation with m -fold submodulation of the carrier frequency and without submodulation in the AD braking mode in the case of ambiguity of frictional forces in the moving parts of the executive mechanism.

Key words: asynchronous motor, braking mode, mathematical modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕХАНІКИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	7
1.1 Механічні характеристики електроприводу робочої машини	7
1.2 Основні розрахункові параметри та схеми включення асинхронних електродвигунів	11
Висновки по розділу 1	14
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	15
Висновки по розділу 2	18
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЧАСТОТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАРМОНІК СТРУМУ СТАТОРА	19
3.1 Оцінка впливу вищих гармонік струму статора частотно-керованого АД	20
3.2 Узагальнена модель частотно-керованого електроприводу	23
Висновки по розділу 3	35
ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

У багатьох галузях промисловості продуктивність технологічного обладнання значною мірою визначається рівнем його автоматизації, основною ланкою якого є електропривод. Прогрес у багатьох галузях науки і техніки (машинобудування, мікроелектроніка, транспорт, космічна техніка, видобуток і переробка корисних копалин і т. д.) все більше підкреслює його найважливішу роль.

Більшість людей рідко використовують поняття «електропривід», хоча стикаються з цим поняттям щодня: комфортний рух в електропоїзді, ліфті, автомобілі, використання численних побутових приладів (пилосос, міксер, кондиціонер, вентилятор, кухонний комбайн, автоматична пральна машина) та т.д.

Автоматизований електропривод найчастіше не розглядається як окремий пристрій, він є важливою ланкою ієрархічної структури автоматизації. Найбільш яскраво сутність автоматизованого електроприводу проявляється в електросталеплавильних установках і металорізальних верстатах з числовим програмним управлінням, робото-технічних комплексах та автоматичних лініях. Розуміння пристрою і роботи електроприводу - це перш за все розуміння фізичних процесів, що відбуваються в ньому, вміння зіставити сучасні технічні рішення в галузі мікро-і силової електроніки, а також сучасного програмного забезпечення. В даний час на зміну регульованого електроприводу постійного струму прийшов регульований електропривод змінного струму, насамперед на базі асинхронних короткозамкнутих двигунів. Асинхронні двигуни є найпоширенішими електричними машинами, але донедавна вони застосовувалися в основному в нерегульованих електроприводах для обертання механізмів, що працюють з постійною швидкістю: вентиляторів, насосів, компресорів, конвеєрів. Тому огляд механічних характеристики електроприводу робочої машини та визначення особливостей його роботи в різних режимах являється актуальним питанням.

Відповідно **метою даної роботи** є дослідження електродинамічних процесів у частотно-керованому електроприводі (ЧКЕП) методом математичного моделювання - зокрема, в режимі двострумове динамічного гальмування з урахуванням вищих гармонік струму статора асинхронного двигуна (АД).

В роботі **розглянуто наступні завдання:**

- особливості формування автономним інвертором напруги (АІН) низьких частот (0,2–15 Гц) струму статора АД, що супроводжується додатковими втратами електроенергії в ЧКЕП та появою пульсуючих моментів на валу АД, що викликають нерівномірність руху виконавчого механізму (ВМ) робочого органу (РО) технологічної машини (ТМ) у зоні малої швидкості.

- запропоновано використовувати просторово-векторну широтно-імпульсну модуляцію (ПВ ШІМ) з m -кратною підмодуляцією несучої частоти (НЧ) і без підмодуляції у режимі гальмування АД при неоднозначності сил тертя у ланках рухомості ВМ РО і наявності пульсуючих моментів на валу АД і на цій основі реалізувати програмне гальмування ЧКЕП з корекцією закону руху.

Об'єктом дослідження являються частотно– керований електропривід.

При виконанні роботи були **використані методи** аналізу та математичного моделювання а також робота по моделюванню ЧКЕП (в програмному пакеті Matlab + Simulink).

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Шадура Д.В. ОСНОВНІ РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ ТА СХЕМИ ВКЛЮЧЕННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Студентські наукові читання : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 березня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 129 с.

Ярош Я. Д., Шадура Д.В. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО
ДВИГУНА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ГАЛЬМУВАННЯ
ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Студентські наукові читання : збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 20 березня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. 134 с.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕХАНІКИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

1.1 Механічні характеристики електроприводу робочої машини

Для розрахункової одномасової схеми, усталений механічний рух електроприводу буде визначатися рівністю моментів двигуна та навантаження, тобто умовою $M = M_c$. Перевірка виконання цієї умови може проводитися аналітично або за допомогою механічних характеристик двигуна і виконавчого органу.

Механічною характеристикою двигуна називається залежність його швидкості від моменту, що розвивається $f = \omega (M)$ (двигун обертального руху) або зусилля $f = v (F)$ (двигун поступального руху). Розрізняють природну та штучну механічні характеристики двигунів.

Природна характеристика двигуна (може бути тільки одна для даного двигуна) відповідає основній (паспортній) схемі його включення та номінальним параметрам напруги живлення. Природні механічні характеристики різних двигунів обертального руху наведені на рис. 1.1, а. На природній характеристиці розташовується точка номінального (паспортного) режиму роботи двигуна з координатами $\omega_{\text{ном}}$, $M_{\text{ном}}$.

Якщо включення двигуна відбувається не за основною схемою або в його електричні ланцюги включені будь-які додаткові електротехнічні елементи (резистори, реактори, конденсатори), або двигун живиться напругою з неномінальними параметрами, то його характеристики називаються *штучними*. Таких характеристик у двигуна можливо скільки завгодно. Оскільки ці характеристики отримують у цілях регулювання змінних (координат) двигуна: струму, моменту, швидкості, положення, то вони іноді називаються *регульовальними*.

Механічної характеристикою виконавчого органу робочої машини або виробничого механізму називається залежність швидкості від виникаючого при його русі зусилля або моменту, т. е. $f = \omega_{\text{во}} (M_{\text{во}})$ при обертальному русі

виконавчого органу і $f = v_{\text{во}} (F_{\text{во}})$ при його поступальному рух. У результаті виконання операції приведення до валу двигуна ці характеристики перетворюються в залежність виду $f = \omega (M_c)$, де ω – швидкість двигуна, а M_c – приведена до його валу момент навантаження (опір). Механічні характеристики виконавчих органів деяких робочих машин наведено на рис. 1.1, б. Слід зазначити, що реальні механічні характеристики виконавчих органів складні і зазвичай є поєднанням показаних на рис. 1.1, б залежностей[2].

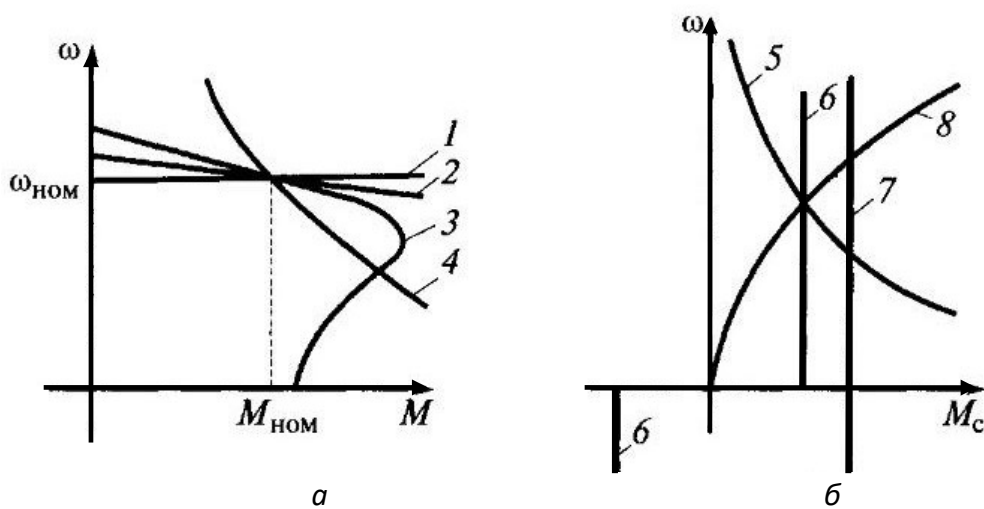


Рисунок 1.1. Механічні характеристики:

a - двигунів: 1 - синхронного; 2 - постійного струму з незалежним збудженням; 3 - асинхронного; 4 - постійного струму з послідовним збудженням; *б* – виконавчих органів робочих машин: 5 – механізму головного руху метал-лообробного верстата; 6 – транспортера, механізму подачі верстатів; 7 - підйомного механізму; 8 – відцентрових насосів, вентиляторів і компресорів

За характером дії моменти навантаження M_c поділяються на активні та реактивні. *Активний* момент має постійний, не залежний від швидкості напрямок своєї дії (характеристика 7 на рис. 1.1, б). Такі моменти створюються потенційними силами, до яких належать сила тяжіння Землі, сили пружної деформації і т.д. буд.

Реактивний момент, характеристика якого відповідає залежності б на рис.

1.1, б створюється в основному силами тертя, він завжди протидіє руху і тому змінює свій знак із зміною напрямки швидкість руху.

Кількісно механічні характеристики двигуна і виконавчих органів оцінюються *жорсткістю* : [1]

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega} .$$

Використовуючи цей показник, можна оцінювати характеристику I синхронного двигуна (рис. 1.1) як абсолютно жорстку ($\beta=\infty$), характеристику асинхронного двигуна 3 – яка має змінну додатну та негативну жорсткості, так і характеристику вантажопідійомних механізмів 7 - які мають нульову жорсткість ($\beta=0$) і т.д..

Концепція механічних характеристик дозволяє знайти параметри режиму двигуна, що встановився. Для цього в тому самому квадранті поєднуються механічні характеристики двигуна D і виконавчого органу BO , як це показано на рис. 1.2. Точки 1 і 2 перетину цих характеристик, коли моменти двигуна та виконавчого органу рівні, будуть відповідати встановленому руху зі швидкостями відповідно $\omega_{уст1}$ і $\omega_{уст2}$ та моментом $M_{уст} = M_c$.

Аналітичний спосіб для такої перевірки застосовується в тих випадках, коли механічні характеристики двигуна та навантаження задані у вигляді рівнянь. Тоді спільне розв'язання цих двох рівнянь за умови $M = M_c$ дає шукане значення $\omega_{уст}$. Підстановка цього значення швидкості в будь-яке з двох рівнянь механічних характеристик дозволяє отримати значення моменту, що встановився.

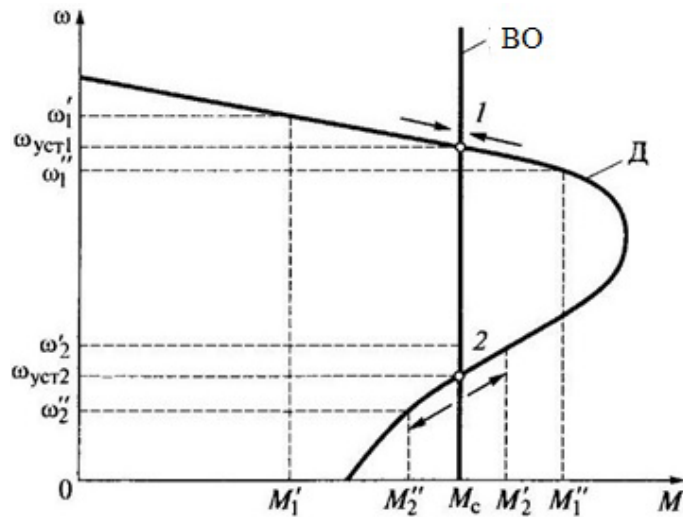


Рисунок 1.2. Пошук параметрів встановленого руху двигуна

Видом механічних характеристик двигуна та виконавчих органів визначається *стійкість усталеного руху*. Під стійкістю розуміється властивість системи «двигун - виконавчий орган» підтримувати рух з швидкістю при можливих невеликих його відхиленнях.

Розглянемо спосіб визначення стійкості руху за допомогою механічної характеристики (рис. 1.2) [3].

Припустимо, що з якоїсь причини швидкість ЕП підвищилася до рівня ω_1' . З'ясуємо, що відбуватиметься зі швидкістю, якщо викликана її зміну причина зникне. З характеристик двигуна та виконавчого органу видно, що при швидкості ω_1' момент навантаження M_c більше моменту двигуна M_1' , тобто $M_1' \leq M_c$. Тоді у системі «двигун – виконавчий орган» діятиме негативний динамічний момент. Почнеться процес гальмування ($d\omega/dt < 0$), який закінчиться при швидкості $\omega_{уст1}$.

Розглянемо тепер положення при якому короткочасове збурення визвало зниження швидкості до рівня $\omega_1'' \leq \omega_{уст1}$. В даному випадку $M_1'' \geq M_c$ і під дією вже позитивного динамічного моменту швидкість почне зростати, поки досягне рівня $\omega_{уст1}$. Таким чином, в системі підтримується рух зі швидкістю $\omega_{уст1}$, тобто він є стійким.

Подібний аналіз для точки 2 показує, що при можливих відхиленнях

швидкості від значення $\omega_{уст2}$ повернення до цієї швидкості після зняття обурення не відбувається. Таким чином, рух зі швидкістю $\omega_{уст2}$ є нестійким.

Перевірка на стійкість руху може бути виконана також аналітично з використанням поняття жорсткості характеристик. Рух буде стійко при виконанні умови:

$$\beta - \beta_c < 0 \text{ або } \beta < \beta_c,$$

де β і β_c – жорсткості механічних характеристик двигуна і виконавчого органу.

1.2 Основні розрахункові параметри та схеми включення асинхронних електродвигунів

Найбільш поширеними типами електроприводів є електроприводи з короткозамкненими асинхронними двигунами. Для нерегульованих електроприводів характерний пуск електродвигуна прямим включенням у мережу за допомогою контактної апаратури без проміжних перетворювачів електричної енергії.

Стандартна схема силових ланцюгів включення короткозамкнутого асинхронного двигуна за допомогою контактів магнітного пускача приведена на рис. 1.3.

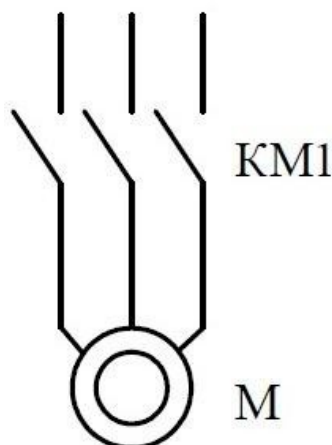


Рисунок 1.3. Схема включення короткозамкнутого асинхронного двигуна

Для розрахунку характеристик АД користуються його математичною

моделлю, яка в загальному випадку представляється різними схемами заміщення. Найбільш простий і зручний для інженерних розрахунків асинхронного двигуна є Т-подібна схема заміщення (рис. 1.4) [2].

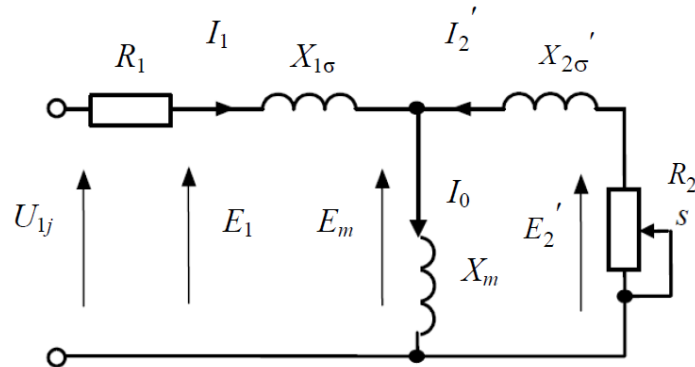


Рисунок 1.4. Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

У схемі прийняті наступні позначення:

U_{1j} - фазна напруга обмотки статора;

R_1 - активний опір обмотки статора;

$X_{1\sigma}$ - індуктивний опір розсіювання обмотки статора;

I_1 - струм обмотки статора;

E_1 - ЕРС обмотки статора;

R_2' - активний опір обмотки ротора, приведенного до обмотці статора;

$X_{2\sigma}'$ - індуктивний опір розсіювання обмотки ротора, приведенного до обмотування статора;

$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ - ковзання;

$\omega_0 = 2\pi f_1 / Z_p$ - синхронна кутова швидкість;

ω - кутова швидкість асинхронного двигуна;

z_p - число пар полюсів;

f_1 - значення частоти напруги змінного струму, підведеного до статора;

E_m - ЕРС від головного магнітного потоку машини;

E_2' - ЕРС обмотки ротора, приведена до обмотці статора.

Основні рівняння асинхронного двигуна, що відповідають даній схемі

заміщення [4]:

$$\begin{aligned} \overline{U}_{1j} - \overline{E}_m - jX_{1\sigma} \cdot \overline{I}_1 - R_1 \cdot \overline{I}_1 &= 0; \\ \overline{E}_m + jX'_{2\sigma} \cdot \overline{I}_2 - R'_2 \cdot \overline{I}'_2 / s &= 0; \\ \overline{I}_1 + \overline{I}'_2 - \overline{I}_0 &= 0. \end{aligned}$$

Векторна діаграма струмів, ЕРС і напруги, задовольняє системі рівнянь, зображено на рис. 1.5.

Струм ротора \overline{I}'_2 , приведений до обмотки статора асинхронного двигуна, визначається залежністю, яку одержуємо безпосередньо із схеми заміщення АД [4]:

$$I'_2 = \frac{U_{1j}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_{кн}^2}},$$

де $X_{кн} = X_{1\sigma} + X'_{2\sigma}$ - індуктивний опір короткого замикання.

Рівняння $I'_2 = f(s)$ називається електромеханічної характеристикою асинхронного двигуна

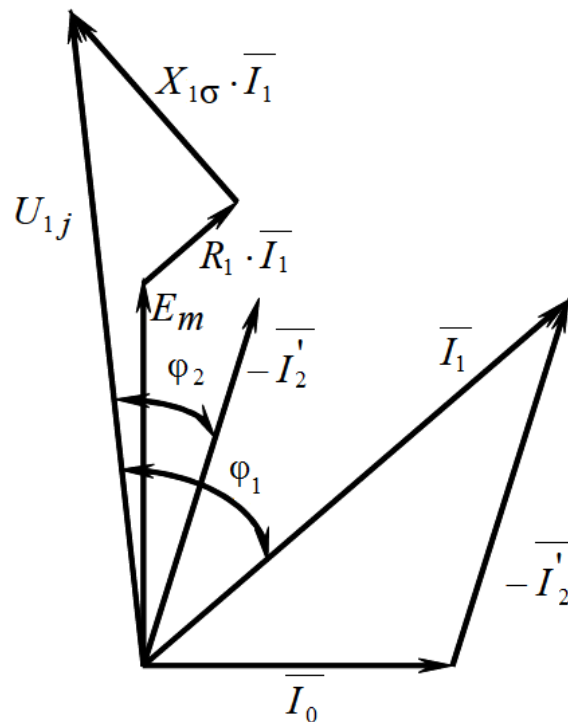


Рисунок 1.5. Векторна діаграма струмів, ЕРС і напруг

Висновки по першому розділу

У механічному русі бере участь рухома частина електродвигуна (ротор), елементи механічної передачі та виконавчий орган робочої машини. Рух будь-якого елемента механічної частини ЕП чи виконавчого органу робочої машини підпорядковується відомим законам механіки.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ГАЛЬМУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Математична модель асинхронного електродвигуна (АД) в рівняннях (2.1)-(2.3) складена для варіанта двомасової моделі, наведеної до еквівалентної одномасової моделі [2,5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \Omega \Phi_{ds} \\ V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \Omega \Phi_{qs} \\ V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi'_{qr} + (\Omega - \Omega_r) \Phi'_{dr} , \\ V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi'_{dr} - (\Omega - \Omega_r) \Phi'_{qr} \\ T_e = \frac{3}{2} p L_m (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\ \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \\ \Phi_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\ \Phi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \\ L_s = L_{ls} + L_m \\ L'_r = L'_{lr} + L_m \end{array} \right.$$

Рівняння механічної частини системи записуються так[5]:

$$\frac{d}{dt} \Omega_m = \frac{p}{j} (T_e - F \Omega_m - T_m - T_L), \quad (2.3)$$

При динамічному гальмуванні електроприводу відбувається зміна динамічного моменту на АД. Рівняння (2.1)-(2.3) не враховують змін у динамічному моменті на валу АД при подачі постійного струму управління в обмотки статора АД. Цей вплив вводиться в математичну модель додатком її

рівняннями (2.4)-(2.5) з відображенням фактора впливу змінних параметрів у зазначених залежностях[5]:

$$T_L = \frac{3I^2 L_m^2 R_2'}{(1-s)\Omega_n \left[\left(\frac{R_2'}{1-s} \right)^2 + (L_m + R_2')^2 \right]},$$

$$I_{II} = \frac{1}{\sqrt{3R_r' L_m}} \sqrt{\frac{3V_n R_r' (1-s)\Omega_n \left(\frac{R_r'}{1-s} \right)^2 + (L_m + R_r')^2}{s\Omega_n \left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (R_s + R_r')^2 \right]} - T_e (1-s)\Omega_n \left[\left(\frac{R_r'}{1-s} \right)^2 + (L_m + R_r')^2 \right]},$$

де в (2.1)-(2.5) R_s, L_{ls} - активний опір та індуктивність розсіювання статора; R_r', L_{lr}' - активний опір та індуктивність розсіювання ротора; L_m - взаємна індуктивність між статором і ротором; L_s, L_r' - повна індуктивність статора і ротора; V_{qs}, i_{qs} - проекція напруги і струму статора на вісь q ; V_{qr}, i_{qr}' - проекція напруги і струму ротора на вісь q ; V_{ds}, i_{ds} - проекція напруги і струму статора на вісь d ; V_{dr}', i_{dr}' - проекція напруги і струму ротора на вісь d ; $\varphi_{qs}, \varphi_{qs}$ - проекція магнітного статора на осі q та d ; $\varphi_{qr}', \varphi_{qr}'$ - проекція магнітного ротора на осі q та d ; Ω_m - кутова швидкість обертання ротора; θ_m - кут повороту ротора; P - число пар полюсів; Ω_r - електрична кутова швидкість ($\Omega_m \cdot p$); θ_r - електричний кут повороту ротора ($\theta_m \cdot p$); T_e - електромагнітний момент; T_m - момент навантаження; J - наведений момент інерції; H - наведений коефіцієнт інерції; F - коефіцієнт тертя; T_L - гальмівний момент, обумовлений перебігом постійної складової струму статора в режимі двострумного динамічного гальмування; I_{II} - стала складова струму статора в режимі двострумного динамічного гальмування; s - ковзання.

Електромагнітний момент гальмування від постійного струму керування визначається за рівняннями (2.4) і (2.5) і подається на вхід блоку керування асинхронного двигуна в момент початку гальмування. Такий принцип

Ω АД змінюється зі зміною або збереженням моменту M_H .

Режим двострумowego динамічного гальмування АД. Об'єктом підвищеної уваги дослідження є двострумовой електродинамічний принцип гальмування частотно-регульованого приводу АД у поєднанні з частотним управлінням та підмагнічуванням обмоток статора постійним струмом від додаткового керованого джерела. Двоструме гальмування засноване на суміщенні гальмування противмиканням та динамічного гальмування. Воно досягається одночасним введенням у двигун змінного та постійного струмів.

При швидкості руху виконавчого механізму приводу $M_H = M_C$ (момент навантаження M_H дорівнює статичному моменту M_C) швидкість обертання валу АД становить $\Omega_B = \Omega_H$. Режим гальмування починається з плавного зниження частоти f_M і напруги U_M живлення АД згідно із законом зміни напруги U_M і частоти f_M на виході автономного інвертора напруги (АІН): $U_M/f_M = \text{const}$, щоб не було динамічних ударів у системі електроприводу та виконавчому механізмі. Потім включається режим динамічного гальмування АД, постійний пульсуючий струм подається в обмотки статора АД, що знаходиться у стані двострумowego гальмування з плавним формуванням гальмівного моменту $-M_{T1}$ і плавним зниженням кутової швидкості обертання Ω . У цих двох режимах плавні переходи зміни швидкості визначаються постійного часу наростання постійного струму в обмотці управління. Далі зміна швидкості реалізується при постійному гальмівному моменті $-M_{T1}$ та постійному прискоренні гальмування $-\varepsilon_r$. На наступній ділянці гальмування АІН розвиває момент обертання АД на валу за рахунок зменшення гальмівного моменту при зменшенні струму підмагнічування I_{Π} . Повзуча низька частота обертання n і кутова швидкість обертання Ω продовжують знижуватися під активним моментом на валу АД. АД з гальмівного режиму

перетворюється на руховий режим на повзучій швидкості. На цьому відрізку гальмування при зростанні моменту можливий плавний розгін АД та приводна система без динамічних ударів. На останньому режимі гальмування АД алгоритм роботи АІН знижує швидкість до зупинки електроприводу мехатронної системи програмним формуванням вектора магнітного поля статора з відставанням на 1-2 електричних градуси від вектора магнітного потоку поля ротора.

Особливостями двострумowego динамічного гальмування АД є[4]:

1) режими гальмування відповідають розрахованим відріzkам переміщень приводів;

2) одночасне використання частотного принципу гальмування шляхом зниження (за пропорційним законом $U_m/f_m = \text{const}$) частоти та напруги живлення АД та двострумowego динамічного гальмування з регулюванням постійного струму в обмотках статора;

3) для сталості моменту та прискорення на ділянці гальмування регулювання величини постійної складової струму статора залежить від поточних значень частоти f та напруги U живлення АД від АІН;

4) плавні переходи кутової швидкості обертання ротора і моменту на валу АД досягаються постійною часу наростання постійного струму в обмотці управління.

Висновки по другому розділу

Регулювання напруги та частоти АІН за заданим законом задає плавність гальмування АД, але не вирішує завдання його ефективного гальмування при збільшенні теплових втрат у статорі та роторі та змінних температурних умовах навколишнього середовища. Інтенсивну експлуатацію частотно-регульованого приводу при температурі навколишнього середовища, що сильно змінюється, без перегріву ізоляції обмоток АД може забезпечити інтелектуальна система управління.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЧАСТОТНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГАРМОНІК СТРУМУ СТАТОРА

У виробничій практиці - наприклад, у промислових роботах (ПР), маніпуляторах, металорізальних верстатах - могли б ширше застосовуватися частотно-керовані електроприводи (ЧКЕП) на базі короткозамкнутого асинхронного двигуна (АД), що функціонують за схемотехнічним рішенням [1]: автономний інвертор напруги - асинхронний двигун (АІН - АД). Проте в даний час використання ЧКЕП дещо обмежена низкою причин [3,5]. Зокрема, неможливо забезпечити необхідні механічні характеристики АД у зоні низьких і повзучих швидкостей з урахуванням сил тертя у напрямних рухах виконавчого механізму (ВМ) робочого органу (РО) технологічної машини (ТМ). Відома [4] неоднозначність рушійних сил ВМ, обумовлена пульсаціями результуючого моменту на валу АД при квазісинусоїдальній живильній напрузі статора низької частоти 0,2-15 Гц. Це веде до формування крокового режиму обертання ротора. Це пояснюється в такий спосіб. Безліч магнітних полів у статорі АД збуджуються від гармонік струму - в основному, за рахунок взаємодії полів 5-ї та 7-ї гармонік з основною гармонікою - і обертаються з різними швидкостями та у різних напрямках [2]. Якщо розглядати випадковий характер зміни сил тертя у ланках рухливості ТМ разом з формуванням пульсуючого моменту на валу АД, то представляється досить складним забезпечення заданого режиму програмного гальмування АД.

В даному розділі розглянемо проблему зниження впливу тертя у ланках рухливості на точність позиції. рування ВМ ТМ за рахунок короткочасного використання результуючого (пульсуючого) моменту полів 5-й і 7-й гармонік струму статора з основною гармонікою в режимі гальмування АД потужністю до 100 Вт. Принято, що структура ВМ промислових роботів верстатних систем є складною, і в ній найбільша інтенсивність мікрорухів ланок спостерігається на частотах власних коливань $f_{вл}$ яка змінюється від 3 до 50 Гц [7].

3.1 Оцінка впливу вищих гармонік струму статора частотно-керованого АД

Оцінимо впливу 5-ї та 7-ї гармонік струму статора частотно-керованого АД на формування коливального моменту на валу АД. Пошук (метод математичного моделювання) умов забезпечення лінійності переміщення ВМ РО ТМ у області низьких частот обертання вала АД.

Розробимо метод (спосіб) регулювання моменту тертя у ланках ВМ приводу ТМ у вигляді формування та управління амплітудами 5-ї та 7-ї гармонік струму обмоток статора. Це дозволить використовувати ефект вібраційної лінеаризації обертання ротора АД для зниження впливу сил тертя та покращення якості позиціонування ВМ при роботі ЧКЕП у зоні малої швидкості.

Для рішення зазначеною проблеми представляється доцільним наступне.

1. Використовувати АІН з просторово-векторною широтно - імпульсною модуляцією (ПВШІМ) і зі ступінчато-програмно-переналаштовуваним рівнем несучої [7,9]. Зміна алгоритму роботи ключів АІН (введення підмодуляції несучої частоти - НЧ) може забезпечити кероване формування вихідної напруги АІН підвищеної електромагнітної сумісності з коефіцієнтом несинусоїдності, що не перевищує 5 % (ДСТУ EN 60034-1:2016) [5].

2. Вводити режим підмодуляції НЧ (16–50 кГц). У цьому випадку можна буде регулювати амплітуду гармонічних складових напруги АД і застосувати принцип вібраційної лінеаризації коефіцієнта тертя в ланках рухливості ВМ. Це важливо для підвищення рівномірності обертання вала АД, руху ВМ в режимі програмного гальмування та позиціонування РО [7, 5].

Відомо [9], що робота ТМ у повторно-короткочасному режимі супроводжується значними змінами швидкостей руху ВМ РО. Це пов'язано з гранично-допустимими моментами виконавчого двигуна та збільшенням теплових втрат. При низьких значеннях моментів

спостерігається збільшення перехідних процесів, що супроводжується зниженням швидкодії та продуктивності ТМ. Тому вибір тривалості запуску та гальмування АД ТМ у кожному конкретному випадку потребує детального дослідження. Режим повинен формуватися в залежно від виду навантаження: регулярне, нерегулярне, що змінюється з деякою кратністю статичного момента або залежить від форми графіка (двохперіодного або триперіодного) швидкостей [9].

Для дослідження пускогальмівних режимів АД при частотному управлінні математична модель останнього може бути заснована на диференціальних рівняннях узагальненої електричної машини та представлена в двокоординатній системі α і β [10]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i'_{1\alpha} \\ i'_{2\alpha} \\ i'_{1\beta} \\ i'_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cr_1 & dr'_2 & \Omega dL_{12} & \Omega dL_2 \\ dr_1 & -br'_2 & -\Omega bL_{12} & -\Omega bL_2 \\ -\Omega dL_{12} & -\Omega dL_2 & -cr_1 & dr'_2 \\ \Omega bL_{12} & \Omega bL_2 & dr_1 & -br'_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{2\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ -d & 0 \\ 0 & c \\ 0 & -d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{2\beta} \end{bmatrix}, \\ J \cdot \Omega' = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_{12} \cdot (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) - M_H(\Omega), \quad = \int_0^{t_1} \Omega dt, \end{cases}$$

$$\text{де} \quad u_{1\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot \cos(\alpha \cdot t); \quad u_{1\beta} = U_H \cdot \gamma \cdot \sin(\alpha \cdot t); \quad L_1 = L_{12} + L_{\sigma 1}; \quad L_2 = L_{12} + L_{\sigma 2};$$

$$b = \frac{L_1}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}; \quad c = \frac{L_2}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}; \quad d = \frac{L_{12}}{L_1 \cdot L_2 - L_{12}^2}.$$

У системі рівнянь (3.1): $i_{1\alpha}$, $i_{2\alpha}$, $i_{1\beta}$, $i_{2\beta}$ — струми в обмотках статора та ротора по нерухомим відносно статора координатним осям α і β ; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ - напруги на обмотках статора по осях α і β ; r_1 , r'_2 - активні опорів ротора та статора відповідно; L_1 , L_2 , L_{12} - індуктивності статора і ротора і взаємна індуктивність; $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ - індуктивності розсіювання обмоток статора та ротора; p - число пар полюсів статора АД; U_H , γ , α - номінальна відносна вхідна напруга живлення АД, частота вхідної напруги живлення; Ω - кутова частота обертання ротора АД; $M_H(\Omega)$ - момент навантаження на роторі АД; J - момент інерції ротора АД; φ - кут повороту ротора.

У системі Mathcad було досліджено наведену в [8] математичну модель АД АІР-50. Її параметри: $P_n = 90$ Вт ($P_s = 93,75$ ВА); $U_{фн} = 127$; $f_c = 50$ Гц; $R_{фс} = 37,15$ Ом; $L_s = 0,102$ Гн; $R_r = 25,69$ Ом; $L_r = 0,102$ Гн; взаємна $L_{sr} = 1,69$ Гн; $\mu_r = 0,00025$; $J_r = 0,2454 \cdot 10^{-4}$ кг·м²; $2p = 1$. В результаті отримані графічні залежності фазних струмів (криві 1, 2, 3 (рис. 3.1, а) та моменту АД (крива 1, рис. 3.1, б)) при перемиканні ($t = 0,12$ с) IGBT -транзисторів АІН з переходом (перемиканням) від дванадцяти робочих станів базових векторів до двадцяти чотирьох (відповідно, криві 4, 5, 6 рис. 3.1, а) та моменту (крива 2, рис. 3.1, б) при формуванні квазісинусоїдальної напруги без підмодуляції несучої частоти.

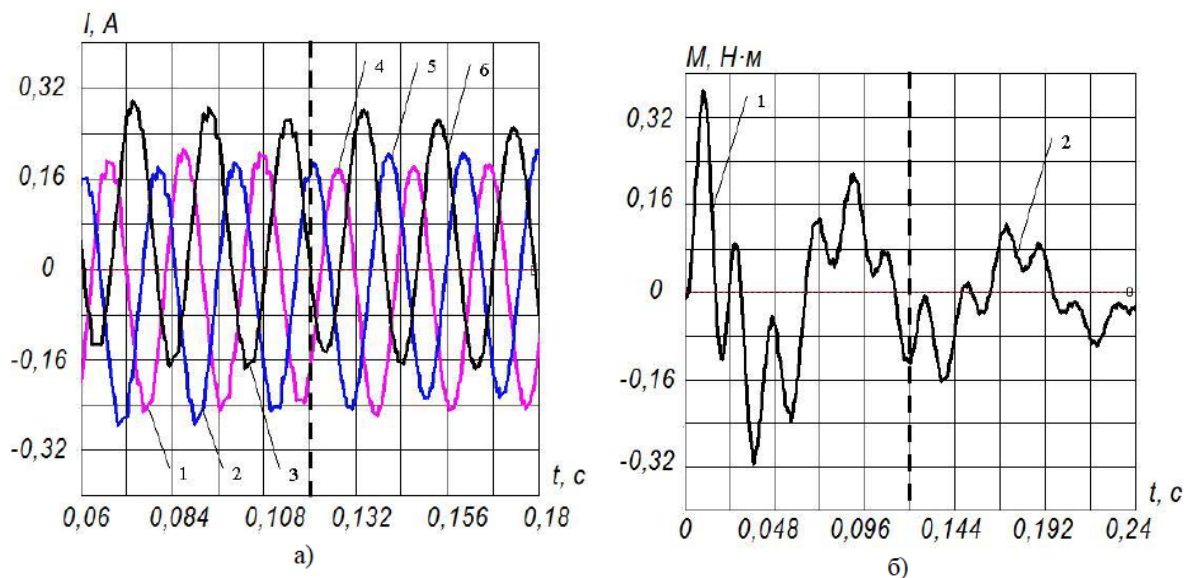


Рисунок 3.1. Фазні струми і момент на валу АД без підмодуляції НЧ

Аналіз залежностей показує, що криві 1, 2, 3 фазних струмів статора АД при 12 базових векторах (рис. 3.1, а) мають видимі спотворення (викиди) амплітуд, значення яких на 13,6% перевищують рівні амплітуд фазних струмів (криві 4, 5, 6), що формуються при 24 базових векторах. За тих же умов генерування фазних струмів у залежностях створюваного моменту на валу АД гармонійними складовими (криві 1 та 2, рис. 1, б) має місце зменшення амплітуд викидів до 46 %.

На рис. 2 наведено залежності тих же переходів робочих станів АІН (з 12 на 24 базових вектора) режимі дворазовий підмодуляції НЧ; тобто $m = 2$.

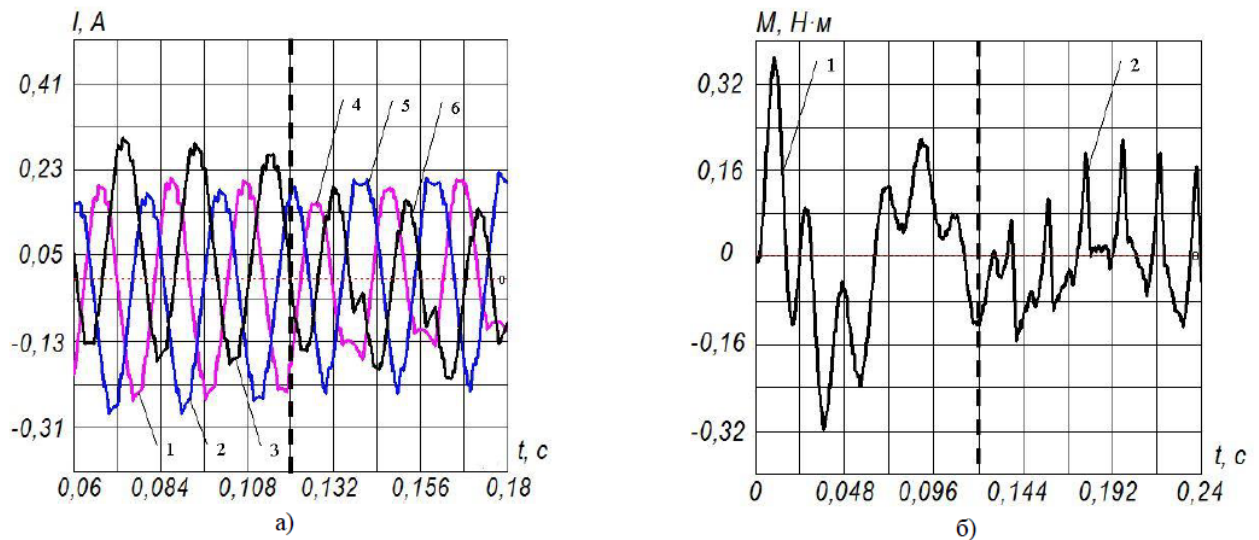


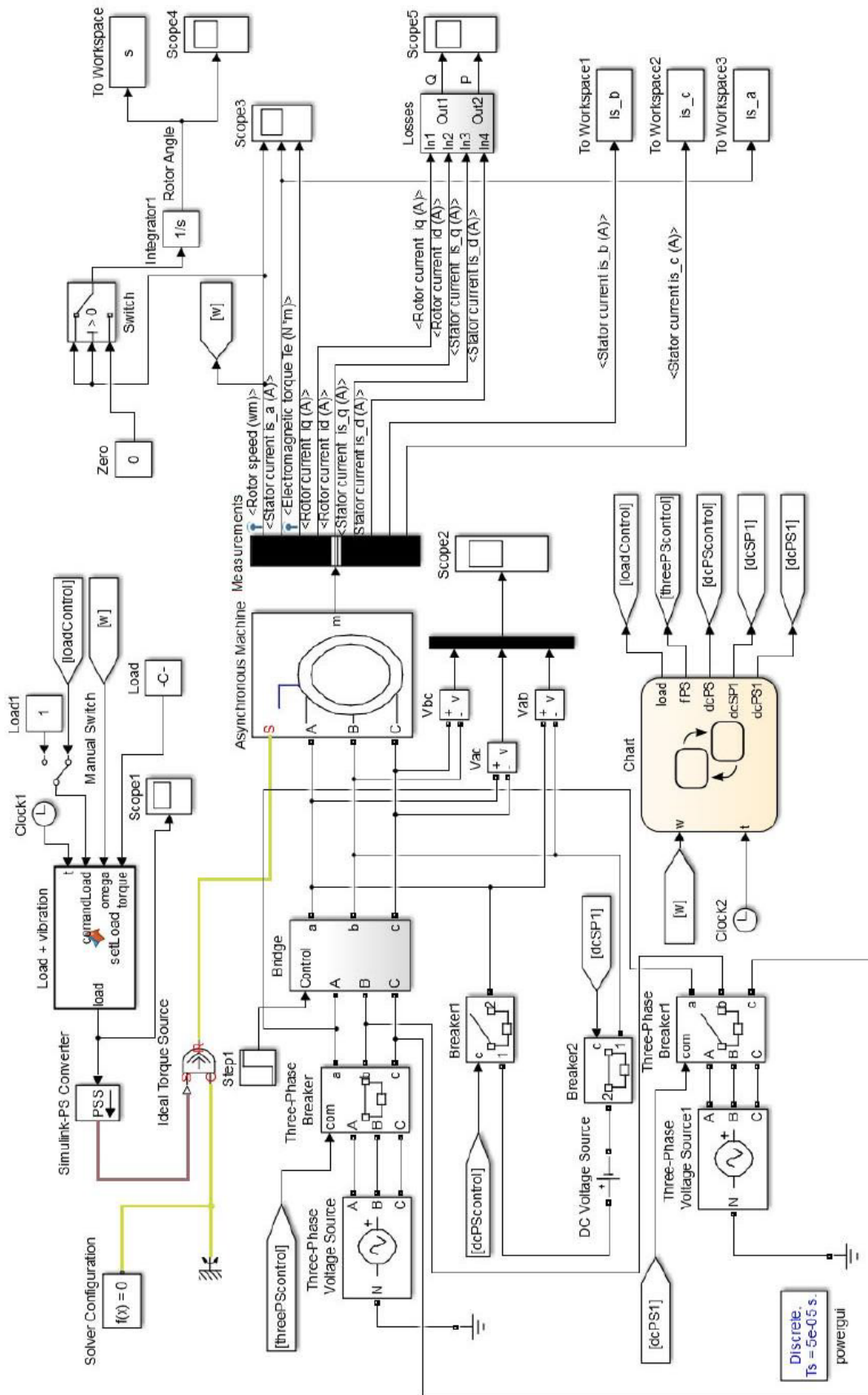
Рисунок 3.2. Фазні струми і моменти на валу АТ з дворазовий підмодуляцією

Зіставлення амплітуд струмів фаз А, В (криві 1 та 4, 3 та 6, рис. 3.2, а) підтверджує зменшення викидів (від 37% до 12%). Це значно змінює характер формується залежності моменту на валу АД (криві 1 і 2, рис. 3.2, б) при зниженні сплесків амплітуд моменту від 47% до 23%. Поява прискорених сплесків зменшених амплітуд на залежності формованого моменту (за час $\Delta t = 0,24 - 0,12 = 0,12$ с) дозволяє підвищити рівномірність обертання валу АД, плавність переміщення ВМ у зоні позиціонування. Застосування 2-3-кратної та вище підмодуляції НЧ АІН в IGBT -транзисторах супроводжується додатковими тепловими втратами. Їх можна знизити, змінивши алгоритм роботи IGBT -транзисторів. При цьому за сигналами датчиків враховується короткий час знаходження ВМ РО ТМ в зоні позиціонування.

3.2 Узагальнена модель частотно-керованого електроприводу

У програмному пакеті Matlab + Simulink була розроблено узагальнена модель ЧКЕП [8] для:

- обліку пульсуючих моментів;
- оцінки впливу сил тертя на формування швидкості АД;
- виявлення особливостей управління рухом ВМ в зоні позиціонування (рис.3. 3).



Модель містить наступні блоки.

Asynchronous machine - асинхронний двигун (АД) змінного струму з

Рисунок 3.3. Схема моделювання режиму гальмування АД в системі АПН — АД

короткозамкнутим ротором, який описується системою рівнянь (1).

Bridge - трифазний мостовий випрямляч на діодах з гальмівним резистором R і ключем Breaker для управління режимом динамічного гальмування АД.

Three - Phase Voltage Source - генератор трифазного напруги для живлення АД.

Three - Phase Breaker - трифазний вимикач для відключення/підключення живильного трифазного напруги до АД, що формується блоком Three - Phase Voltage Source .

DC Voltage Source - джерело постійної напруги для формування постійного струму в обмотці статора АД у режимі двострумове динамічного гальмування.

Breaker 1 та Breaker 2 — ключі для керування режимом двострумове динамічного гальмування АД.

Step 1 - блок, що формує сигнал управління ключем Breaker блоку Bridge .

Three - Phase Voltage Source 1 - генератор трифазного напруги для формування додаткової напруги живлення АТ 5-й або 7-й гармонікою.

Three - Phase Breaker 1 - трифазний вимикач для відключення/підключення до АД трифазної напруги 5-й або 7-й гармоніки, формуються блоком Three - Phase Voltage Source 1.

V_{ab} , V_b з і V_a з - блоки для виміру фазних напруг на обмотках статора АД.

Measurements - блок для вимірювання і формування наступних змінних, які описують стан АД:

- Rotor speed - кутова швидкість обертання ротора, рад/с;
- Stator current i_{s_a} - струм фази А статора, Ампер;
- Stator current i_{s_b} - струм фази В статора, Ампер;
- Stator current i_{s_c} - струм фази С статора, Ампер;
- Electromagnetic torque T_e - електромагнітний момент ротора, Н·м;
- Rotor current i_q - проекція струму ротора на вісь α , Ампер;
- Rotor current i_d - проекція струму ротора на вісь β , Ампер;

- Stator current i_{s_q} - проекція струму статора на вісь α , Ампер;
- Stator current i_{s_d} - проекція струму статора на вісь β , Ампер.

Losses -блок призначений для вимірювання сумарних електричних (теплових) втрат потужності і енергії в обмотках статора і ротора АД, розрахунок яких здійснюється в відповідно з виразами [8,10, 11]:

$$P_E = (i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2) \cdot r_1 + (i_{2\alpha}^2 + i_{2\beta}^2) \cdot r_2'; \quad Q_E = \int_0^{t_1} P_E dt. \quad (3.2)$$

Тут P_E - сумарні електричні (теплові) втрати потужності; Q_E - сумарні втрати енергії в обмотках статора та ротора АД.

Integrator 1 - блок для формування сигналу Rotor Angle (кут повороту ротора АД, рад.) шляхом інтегрування кутової швидкості обертання ротора.

Load + vibration -блок - S -функція для формування моменту навантаження на роторі АД в функції кутової швидкості обертання ротора.

При цьому момент опору на ротор АД задається в вигляді рівняння, наприклад, «вентиляторного» навантаження з доповненням пульсуючого складника моменту в режимі гальмування згідно системі рівнянь:

$$M(\Omega) = \begin{cases} M_c + k \cdot \Omega^2, & \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \\ M_c + k \cdot \Omega^2 + M_{c1} \cdot \sin(\Omega_1 t), & \text{при } t > t_1. \end{cases}$$

Тут M_c - статична частина моменту навантаження на роторі АД, k - коефіцієнт тертя; M_{c1} - амплітуда пульсуючого моменту опору, обумовленого мікровібрацією ротора артеріального тиску, викликаного наявністю вищих гармонік у напрузі живлення АД у режимі гальмування; Ω_1 - частота вищої гармоніки напруги живлення АД, яка створює пульсуючий момент опору.

Simulink - PS Converter - блок, що перетворює безрозмірну математичну величину в розмірну фізичну величину (математичного значення моменту опору на ротор АД в фізичне значення в Н·м).

Ideal Torque Source - блок, що формує на виході крутний момент, пропорційний значенню фізичного сигналу на його вході.

Solver Configuration - блок, задаючий умови для рішення рівнянь, які

описують модель в Matlab + Simulink .

Clock 1 і Clock 2 - блоки, формують поточний час процесу моделювання.

To Workspace , To Workspace 1, To Workspace 2, To Workspace 3 - блоки, що передають у систему Matlab Workspace розраховані в результаті моделювання значення кута повороту ротора АД та компонентів струму статора i_{1b} , i_{1c} , i_{1a} відповідно.

Load - блок, що задає початкове значення моменту опору ротора АД.

Load 1 - блок, що задає режим гальмування АД під навантаженням.

Manual Swith - блок для перемикання режимів гальмування АД під навантаженням і на холостому ходу.

Score 1, Score 2, Score 3, Score 4, Score 5 - блоки, які графічно відображають осцилограми сигналів: моменту навантаження ротора АД; фазної напруги на обмотках статора; кутової швидкості обертання ротора; струму фази ротора; електромагнітного моменту на роторі АД; кута повороту ротора; сумарних електричних (теплових) втрат енергії і потужності в обмотках статора та ротора АД.

Chart - блок, що керує роботою інших блоків моделі з урахуванням сигналів кутової частоти обертання ротора Ω і поточного часу моделювання t , формує наступні керуючі сигнали [9]:

$$loadControl = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 0,5; \\ 1, & 0,5 < t \leq 1; \\ 2, & t > 1 \text{ u } 0,01 \cdot \Omega_H \leq \Omega \leq 0,1 \cdot \Omega_H; \\ 3, & t > 1 \text{ u } \Omega < 0,01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$threePScontrol = \begin{cases} 0, & t > 1; \\ 1, & 0 \leq t \leq 1; \end{cases}$$

$$dcPScontrol = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 1 \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega < 0,01 \cdot \Omega_H; \\ 1, & t > 1 \text{ и } \Omega \geq 0,01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$dcSP1 = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1 \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega < 0,01 \cdot \Omega_H; \\ 0, & t > 1 \text{ и } \Omega \geq 0,01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$dcPS1 = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq 1 \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega < 0,01 \cdot \Omega_H \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega > 0,1 \cdot \Omega_H; \\ 1, & t > 1 \text{ и } 0,01 \cdot \Omega_H \leq \Omega \leq 0,1 \cdot \Omega_H. \end{cases}$$

Діапазони зміни характерних параметрів рівняння (3.4) обрані в відповідно з тахограмою $\Omega = f(S)$, наведеною на рис. 3.4.

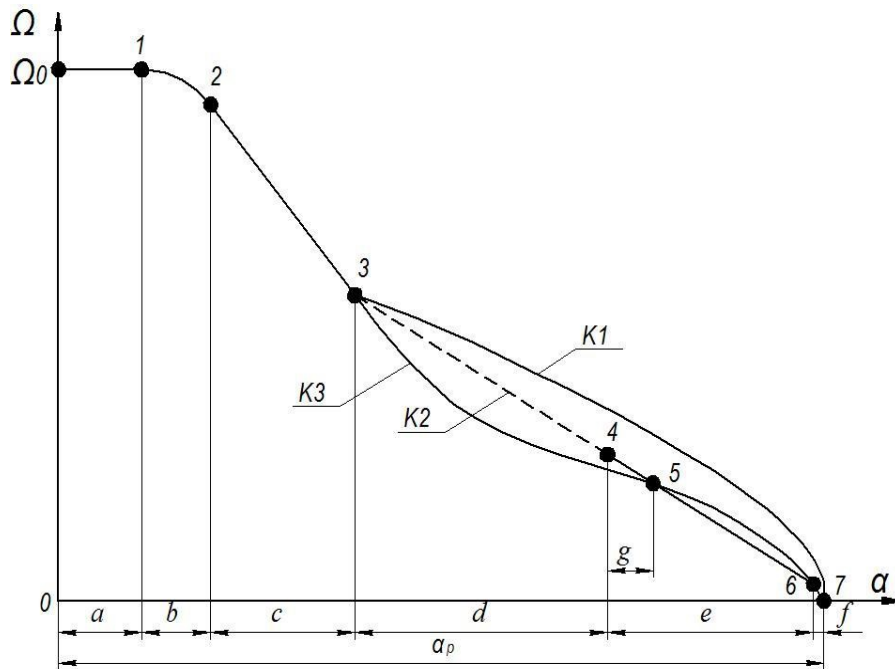


Рисунок 3.4. Тахограма кутовий швидкості АД на розрахунковій ділянці гальмування

У процесі регулювання швидкості і положення ВМ використовуються сигнали зворотних зв'язків по регульованим змінним, що забезпечуються відповідними вимірювальними пристроями з метою керування швидкістю ВМ РО в функції пройденого шляхи.

Для підвищення продуктивності ТМ можна програмно виключити проміжні формування швидкості руху (переміщення) ВМ РО (точки 1, 2, 3 тахограми, рис. 3.4). Це пов'язано з можливостями СУ щодо забезпечення безперервної зміни швидкості АД в режимі, наприклад, двотокового програмного динамічного гальмування при проходженні ВМ шляху ($a + b + c$).

Такий режим гальмування АД разом із роботою АІН на базі ПВШІМ дозволяє реалізувати допустимі прискорення (розгону - гальмування) без ударів у кінематиці ВМ ЧКЕП ТМ до точок 4, 5, коли таке гальмування ще можна здійснити [10].

З урахуванням довжини ділянки ($d + e + f$), що відповідає точкам 3, 4, 5, 6, 7 (лінійна залежність До 2), швидкість гальмування можна визначити згідно з виразом [1, 6, 11]:

$$\Omega_{\text{доп}} = \sqrt{2M_T \cdot \Delta\alpha / J_{\Pi} \cdot K_S}, \quad (3.5)$$

де $\Omega_{\text{доп}}$ - допустима швидкість гальмування за умовами міцності конструкції виконавчого механізму, $M_T = M_{T\text{max}}$ - максимальне значення динамічного моменту гальмування; J_{Π} - момент інерції ВМ ЧКЕП, наведений до валу АД.

Приріст шляху при постійному гальмівному моменті з (3.5) складе [1, 11]:

$$\Omega_{\text{доп}} \Delta\alpha = J_{\Pi} \cdot \frac{\Omega_0^2 \cdot K_S}{2M_T} = b \cdot \Omega_0^2. \quad (3.6)$$

Тут Ω_0 — початкова швидкість гальмування, K_S — коефіцієнт пропорційності між кутом повороту валу двигуна і переміщенням (рад/рад, м/рад).

Якщо прийняти $J_{\Pi} = \text{const}$ (3.5) і (3.6), то очікуване значення $\Delta\alpha$ пов'язано з формуванням гальмівного моменту M_T як параметра, залежного від значення моменту тертя, що змінюється, в рухомих ланках ВМ в зоні малої та повзучої швидкості руху ВМ.

Відомо [6], що тахограма ділянки 3-7 руху ВМ існуючих верстатних систем у зазначеній зоні швидкості може бути реалізована по-різному - кривими К1, К2, К3, залежними від інерційної складової J_{Π} (крива К1), від моменту тертя та швидкості у вигляді експериментальної кривої К3 або лінійної залежності К2 (для ідеального випадку).

Неоднозначність моменту гальмування M_T у зоні 3–4–5–6–7 ускладнює точне визначення значення $\Delta\alpha$ співвідношенню (3.6) через нестабільність

моменту тертя $M_{тр}$ і супроводжується зниженням точності позиціонування ВМ РО.

Для вимірювання довжини ділянки g (точки 4–5) у СУ ЧКЕП дається оцінка фактичної швидкості руху та положення РО за допомогою датчиків (інкрементальний енкодер DRS60 фірми SICK; інтерфейс - TTL/RS422; кількість імпульсів на один оборот - 8192). Це дозволяє здійснити в моделі програмне регулювання амплітуди 7-ї гармоніки (ділянка 5–6), а на ділянці 6–7 — амплітуди 5-ї гармоніки з метою створення мікровібрацій ротора та отримання ефекту вібраційної лінеаризації [4] коефіцієнта тертя на малий час у нелінійній механічній системі.

Введення додаткової мікровібрації у ланці рухливості ВМ від АД дозволяє зменшити значення ефективного коефіцієнта тертя ($k_{ef} < k$) у транспортуючій ланці рухливості, що підтверджують теоретичні [7] та експериментальні дослідження [10].

При моделюванні режимів роботи ЧКЕП використовувалися такі параметри для блоків моделі.

1. Asynchronous machine (параметри AIP-50 A2).

2. Код S-функції, що реалізується блоком Load + vibration:

```
function load = setLoad(t,comandLoad,omega,torque)
```

```
%#codegen
```

```
wn = 315; % Номінальна швидкість
```

```
tau_set = 20 * Torque / 100; tau_friction = 3*torque/100;
```

```
load = 0;
```

```
if (comandLoad == 1)
```

```
load = torque + tau_friction * omega * omega;
```

```
end if(comandLoad == 2)
```

```
load = torque + tau_friction * omega * omega +
```

```
5*tau_set*sin(2*pi*250*t);
```

```
%load = tau_friction*omega*omega;
```

```
End if(comandLoad == 3)load = 0; end
```

3. Three-Phase Voltage Source: амплітудне значення напруги - 179,61 В; фаза напруги - 0 ел. град; частота напруги - 50 Гц.

4. Three-Phase Voltage Source: амплітудне значення напруги - $0,2 \cdot 24$ В для 5-ї або $0,13 \cdot 24$ В для 7-ї гармоніки напруги живлення; фаза напруги - 0 ел. град; частота напруги - 250 Гц (5-я гармоніка) або 350 Гц (7-я гармоніка).

5. Блок Bridge: R (опір) - 10 Ом.

6. Блок Losses: Rr (активний опір обмотки фази ротора) - 25,69 Ом.

7. Блок Losses: Rs (активний опір обмотки фази статора) - 37,15 Ом.

8. Блок Losses: (Math Function 1, 2, 3, 4) function - square (u2).

9. Блок Load: constant value (-0,0001 Н · м).

10. Блок Step1: step time - 1; initial value - 0; final value - 1; sample time - 0.

11) Блок Load1: constant value (-0,0001 Н · м).

У решті блоків схеми, зображеної на рис. 3.3, використовуються значення параметрів за промовчанням. Час моделювання складає 1,4 с.

На рис.3.5 наведено залежності, отримані при моделюванні електромеханічних процесів у АД ЧКЕП для режиму розгону (тимчасова ділянка 1, $t_1 = 0,05$ с) та підтримання швидкості (тимчасова ділянка 2, $t_2 = 0,35$ с) з моментом навантаження, рівним моменту тертя ланок ВМ, прийнятим рівним $M_c = M_T = 0,07$ Н·м.

Пуск АД супроводжується «кидками» формованим значень:

— максимального струму фази статора $I_{cm} = 1,5$ А;

— максимального моменту двигуна M_m .

При цьому частота обертання ротора збільшується від 0 до $\Omega_0 = 300$ рад/с з перерегулюванням σ не більше 8 %.

На тимчасовій ділянці 3 ($t_3 = 0,02$ с) здійснюється накидання статичного моменту $\Delta M_c = 0,155$ Н·м у відповідності з виразом (3.3), що викликає зростання струму I_c і просадку частоти обертання валу АД з 300 рад/с до 245 рад/с. Стан такого режиму АД зберігається на тимчасовому інтервалі 4 ($t_4 = 0,48$ с).

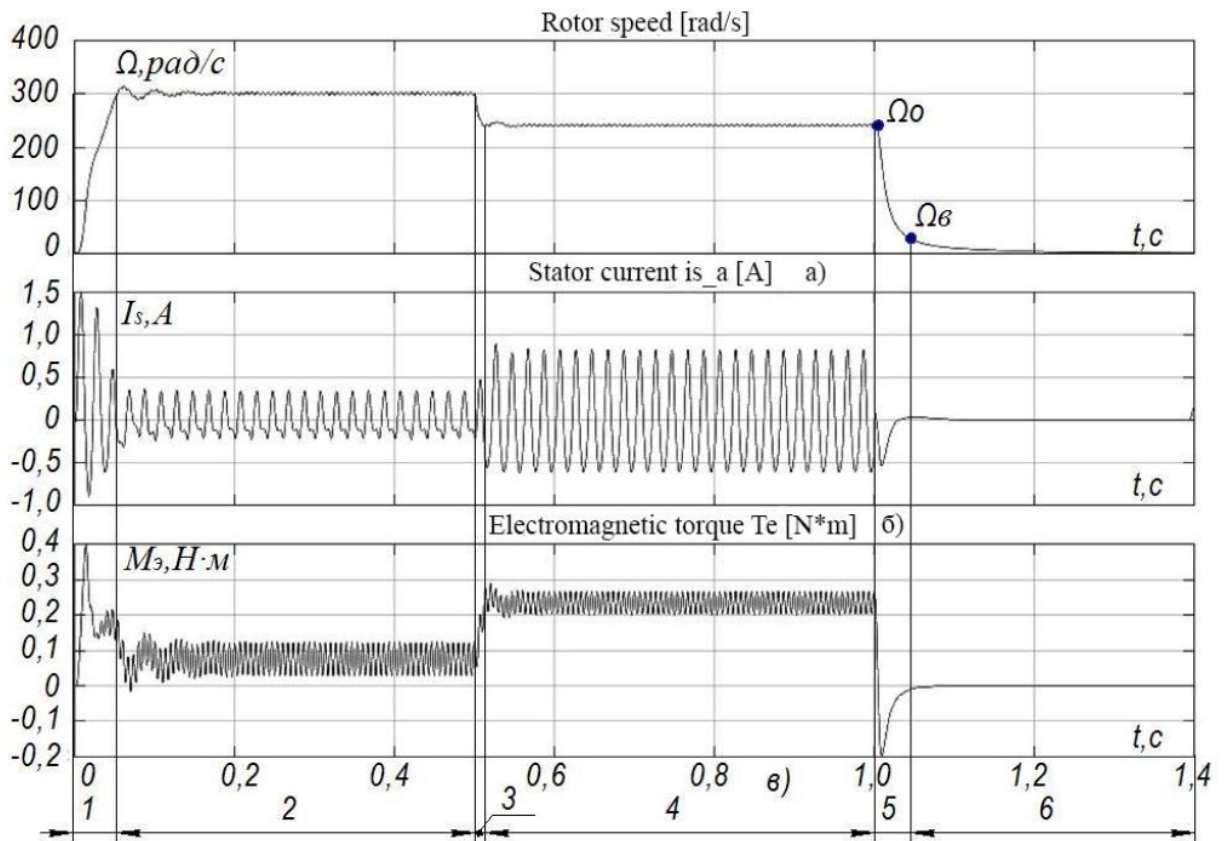


Рисунок 3.5. Кутова частота ротора (а), струм статора (б) та електромагнітний момент АД (в) в функції від часу (з підмодуляцією $m = 4$)

На ділянці 5 ($t_5 = 0,06$ с) з переходом на ділянку 6 наведено зміни контрольованих параметрів АД, коли при $t = 1$ с моделюється процес вимикання АІН щодо формування 3-фазної напруги живлення АД і кривій вибігу (при одночасному відключенні моменту тертя) ВМ ТМ.

Математичне моделювання з використанням розробленої моделі (рис. 3.3) дозволило уточнити вплив пульсацій електромагнітного моменту АД, створюваного 5-й і 7-й гармоніками напруги живлення, на коефіцієнт тертя в ланках рухливості ВМ при гальмуванні ЧКЕП для різних значень моменту інерції навантаження, приведених до ротору АД. Для цього на ділянці 6 при швидкості $W_b = 0,1 \cdot \Omega_0$ рух ВМ (рис.3.5) додатковим генератором Three-Phase Voltage Source1 формувалась трифазна напруга амплітуди і частоти гармонік живлення (U_n) АД:

- 5-ї - 20% від U_n , 250 Гц;

- 7-ї - 13% від $U_{\text{п}}$, 350 Гц.

Вимірювання кута повороту ротора здійснювалися від початкового моменту часу до повної зупинки АД.

Далі цей кут порівнювався з кутом повороту φ_0 , що вимірюється за відсутності в напрузі живлення АД 5-ї або 7-ї гармонік на ділянці гальмування:

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0. (7)$$

Вимірювання різниці кутів повороту $\Delta\varphi$ проводилися при $J_{\text{п}}$ навантаження ЧВЕП, що змінюються від номінального значення $J_{\text{н}}$ до десятикратного - $10 \cdot J_{\text{н}}$, а також для випадку гальмування АД у режимі холостого ходу та під навантаженням.

Отримані залежності $\Delta\varphi$ у функції від $J_{\text{н}}$ (для випадку живлення АД напругою 5-ї або 7-ї гармоніки в режимі гальмування під навантаженням та на холостому ході) представлені на рис. 3.6.

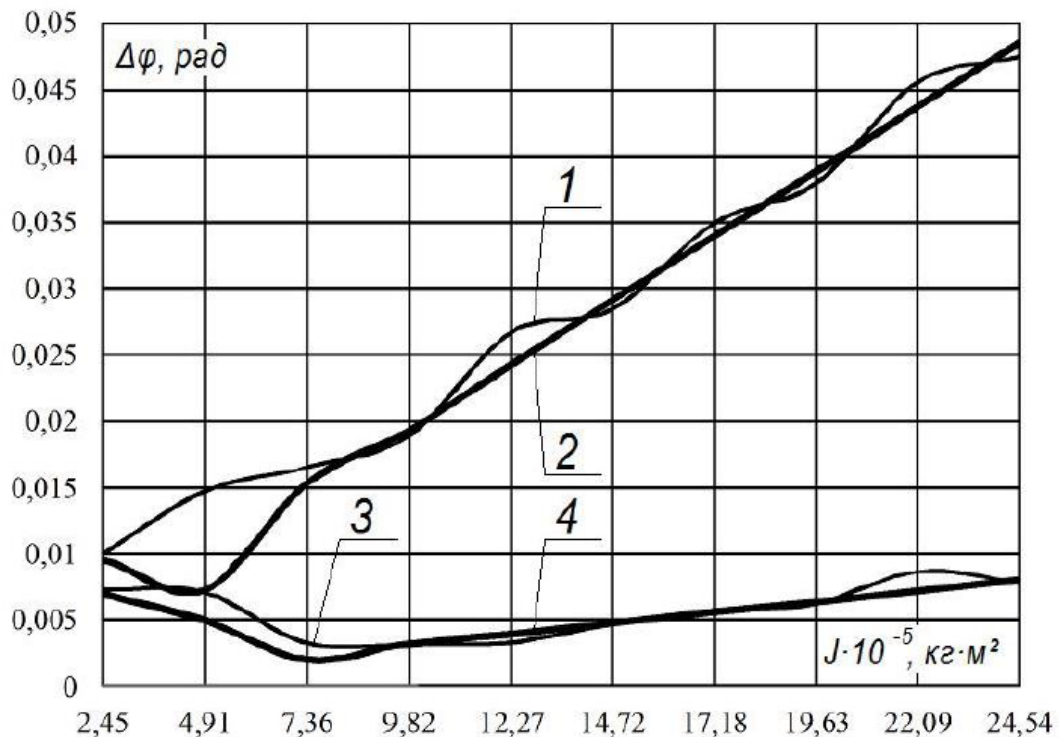


Рисунок 3.6. Залежність різниць кута повороту ротора АД при зміні гармонійних складових струму статора

Залежності пронумеровані відповідно модельованим режимам роботи ЧВЕП:

1 - при гальмуванні без навантаження (у режимі холостого ходу) і пульсуючому електромагнітному моменті, створюваним 5-ю гармонікою;

2 - при гальмуванні з номінальним навантаженням і пульсуючому електромагнітному моменті, створюваному 5-ю гармонікою;

3 - при гальмуванні без навантаження (у режимі холостого ходу) і пульсуючому електромагнітному моменті, створюваним 7-ю гармонікою;

4 - при гальмуванні з номінальним навантаженням і пульсуючому електромагнітному моменті, створюваному 7-ю гармонікою.

Аналіз залежностей 1, 2 (рис. 3.6) показує, що наявність 5-ї гармоніки (амплітуда 20%, струм статора I_c , частота 250 Гц) формує додатковий момент на валу АД, що забезпечує ефект вібраційної лінеаризації коефіцієнта тертя у ланках рухливості ВМ.

Це підтверджується збільшенням $\Delta\varphi$ від 0,01 до 0,047 рад при зміні інерційної складової. Залежності 3, 4 отримані при моделюванні режимів гальмування АД в аналогічних умовах за параметрами, що задаються, але за наявності в струмі I_c статора 7-ї гармоніки (амплітуда 13%, частота 350 Гц). У цьому випадку введення додаткової мікрівібрації моменту на валу не є достатнім по рівню, щоб забезпечити ефект вібраційної лінеаризації коефіцієнта тертя у ланках рухливості ВМ. Найбільша зміна параметра $\Delta\varphi$ спостерігається в діапазоні від 0,00025 рад до 0,0055 рад у режимі гальмування на холостому ходу і зменшується при номінальному навантаженні (крива 4).

На рис. 3.7 наведено залежності сумарних електричних (теплових) втрат потужності та енергії в обмотках статора і ротора АД, отримані відповідно до рівняння (3.2) при включенні вимірювального блоку Losses та режиму підмодуляції вихідного напруги АІН.

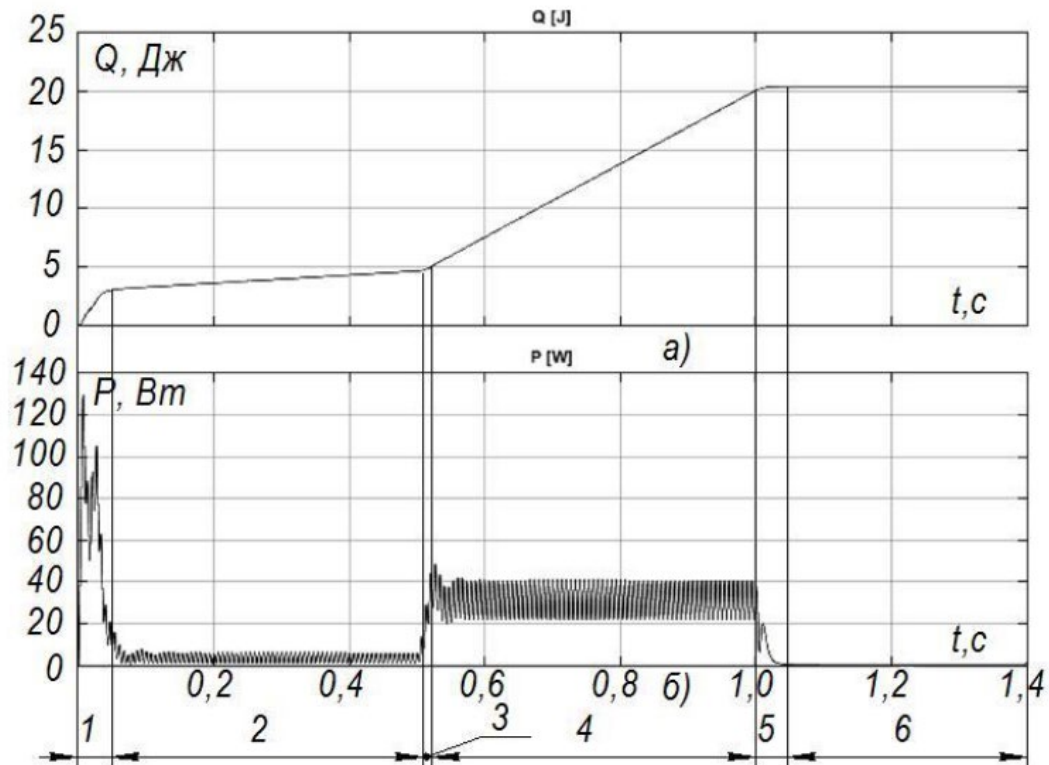


Рисунок 3.7. Сумарні теплові електричні втрати енергії в обмотках статора та ротора АД (а) та сумарні теплові електричні втрати потужності (б) в функції часу (з підмодуляцією $m = 4$)

Висновки по третьому розділу

Аналіз отриманих в результаті моделювання режимів АД ЧКЕП при роботі в зоні малої та повзучої швидкості переміщення ВМ ТМ дозволяє зробити такі висновки.

1. Випадковий вплив сил тертя у ланках рухливості ТМ у зоні малої швидкості переміщення ВМ можна зменшити за рахунок регулювання амплітуди 5-ї гармоніки струму статора на стадії передостаннього гальмування АД, створюючи режим бажаної мікровібрації вала АД.

2. Ефект вібраційної лінеаризації коефіцієнта тертя у ланках рухливості ВМ забезпечується програмним управлінням АІН з ПВШІМ та ступінчастою зміною несучої частоти в режимі підмодуляції вихідної напруги АІН.

3. За допомогою корекції кута повороту валу АД можна встановити програмований вибіг ВМ при гальмуванні АД ЧКЕП та підвищити точність позиціонування робітника органу ТМ.

4. Розроблена модель ЧКЕП у програмному пакеті Matlab + Simulink дозволяє виконати дослідження за оцінкою сумарних електричних втрат в АД для передбачуваних режимів роботи ЧКЕП з урахуванням та без урахування 5-ї та 7-ї гармонік струму статора.

ВИСНОВКИ

Метою даної роботи є дослідження електродинамічних процесів у частотно-керованому електроприводі (ЧКЕП) методом математичного моделювання — зокрема, в режимі двострумowego динамічного гальмування з урахуванням 5-ї та 7-ї гармонік струму статора асинхронного двигуна (АД). Наведено особливості формування автономним інвертором напруги (АІН) низьких частот (0,2–15 Гц) струму статора АД, що супроводжується додатковими втратами електроенергії в ЧКЕП та появою пульсуючих моментів на валу АД, що викликають нерівномірність руху виконавчого механізму робочого органу технологічної машини у зоні малої швидкості та ускладнюючих їх позиціонування у задане положення. За неоднозначності сил тертя у ланках рухливості ВМ РО та наявності пульсуючих моментів на валу АД реалізувати програмне гальмування ЧКЕП без корекції закону руху досить важко. Для вирішення цієї проблеми в ЧКЕП пропонується, по-перше, використовувати просторово-векторну широтно-імпульсну модуляцію (ПВ ШІМ) з m -кратною підмодуляцією несучої частоти (НЧ) та без підмодуляції в режимі гальмування АД. По-друге, доцільно застосувати (короткочасно в зоні малої швидкості) принцип вібраційної лінеаризації для зниження коефіцієнта тертя до зниженого значення ($K_{сф}$) у ланках рухливості ВМ РО за рахунок мікровібрації ротора АД, обумовленої 5-й та 7-й гармоніками струму статора. Таким чином, робота з моделювання ЧКЕП (у програмному пакеті Matlab + Simulink) дозволила уточнити вплив 5-ї та 7-ї гармонік струму статора АД на можливість програмного здійснення двострумowego режиму динамічного гальмування ЧКЕП при зниженні загальних втрат електроенергії в зоні малої швидкості руху ВМ РО. Крім того, було підтверджено можливість застосування у типових схемах АІН — АД пропонованих рішень електроприводів мехатронних та робототехнічних систем широкого призначення з підвищеними вимогами до позиціонування.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зеленов А.Б. Теорія електропривода: Методика проектування електроприводів: Підручник. – Луганськ: Вид-во "Ноулідж", 2010. – 670 с.
2. Теорія електропривода: Підручник / За ред. М.Г. Поповича. – К.: Вища школа, 1993. – 494 с.
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.–148с.Режим доступу https://eprints.kname.edu.ua/57522/1/76Л_Консп_Лекцій_2019%20печ.pdf
4. Безрученко В. М. Теорія електроприводу [Електронний ресурс] : підручник. Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2011. Режим доступу <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/402>
5. ДСТУ EN 60034-1:2016 Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (EN 60034-1:2010; EN 60034-1:2010/AC:2010, IDT)
6. Василега П. О. Електропривод робочих машин : підручник / П. О. Василега. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 290 с.
7. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Казак М.О. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
8. Мілих В.І., Іваненко В.М. Дослідження асинхронних двигунів: Лабораторний практикум з курсу «Електричні машини» для студентів електротехнічних спеціальностей. – Харків: НТУ «ХПІ», 2007.– 93 с.
9. В.Б.Нізімов Конспект лекцій з дисципліни „Системи керування електроприводами” для напряму 6.050702 – електромеханіка «Електромеханічні системи авоматизації та електропривод

/Дніпродзержинський державний технічний університет. – Дніпродзержинськ: ,2012. – 61 с.

10. Ноженко В. Ю. Нестационарные процессы в последовательном резонансном контуре / В. Ю. Ноженко, Д. И. Родькин, В. В. Ченчевой // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. — 2016. — Вип. 5 (100). — С. 9—18

11. В. Ю. Ноженко, Д. Й. Родькін, О. П. Чорний Пускові режими асинхронного електропривода зарезонансної вібраційної машини// Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 4