

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ПРИВОДУ ПОХИЛОГО ДИФУЗІЙНОГО АПАРАТА З ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ

¹Вінницький національний технічний університет

Розроблено математичні моделі асинхронного приводу похилого дифузійного апарата, на основі яких створено імітаційні моделі, що дозволяють досліджувати динамічні режими роботи системи засобами імітаційного моделювання, враховуючи особливості роботи механіки приводу. Запропоновано підходи для синтезу систем частотно-регульованого приводу з різними варіантами живлення асинхронних двигунів та проведено дослідження їх динамічних властивостей у порівнянні з системою приводу постійного струму.

Ключові слова: математична модель, похилий дифузійний апарат, асинхронний привід, динамічні властивості системи.

Вступ

На сьогодні похилий дифузійний апарат (ПДА), який використовується в цукровому виробництві [1, 2] для екстракції соку з бурякової стружки приводиться в рух здебільшого приводом постійного струму. ПДА — це транспортуючий шнековал, розміщений у коритоподібному корпусі. Апарат приводиться в рух двома двигунами постійного струму, що обертають шнековали з різних їх кінців, між якими виникає значний пружний зв'язок, що суттєво впливає на динамічні властивості приводу. Однаковість електромагнітних моментів двигунів в такій системі забезпечується послідовним ввімкненням їх роторних обмоток та живленням від одного тиристорного перетворювача. Динамічні властивості такої системи досліджувалась у [3, 4].

Однак, останнім часом досить часто використовується асинхронний привід з частотним регулюванням [5, 6]. Це пояснюється відомими перевагами цього типу приводу та застарілістю основного обладнання існуючих систем

приводів постійного струму. Разом з тим, заміна систем приводів постійного струму на системи асинхронних приводів з частотним регулюванням зумовлює значні труднощі, пов'язані з необхідністю забезпечення синхронного обертання двох двигунів у разі виникнення режиму їх нерівномірного завантаження через технологічні особливості роботи ПДА.

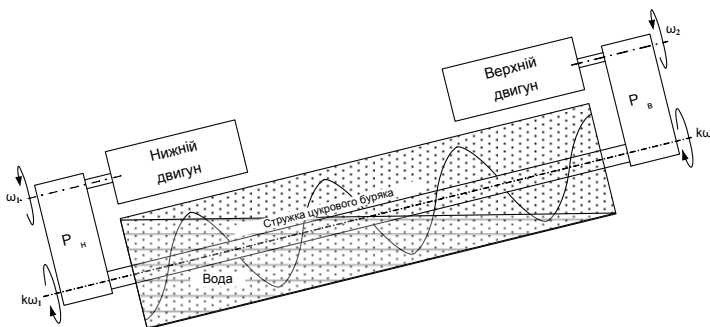


Рис. 1. Структурна схема ПДА

Дослідження таких режимів ускладнюються відсутністю адекватного математичного опису механічної частини приводу, яка б враховувала основні експлуатаційні характеристики роботи ПДА. Зокрема, у вказаних роботах не враховано явища, пов'язаного з наявністю пружних зв'язків між двома двигунами приводу, які значно впливають на його динамічні властивості. Також важливим є врахування нерівномірного завантаження шнековалів. Таке врахування є важливим через те, що верхній двигун працює в складніших умовах, оскільки сокостружкова суміш у верхній частині ПДА є гущішою та в'язкішою. Це спричинює помилки на стадії проектування, які призводять до ненадійної роботи приводу та виникненню таких передаварійних коливальних режимів, які описанні у [7].

У зв'язку з цим значної актуальності набуває математичне моделювання частотно-регульованого приводу ПДА, що дасть змогу правильно синтезувати та проектувати системи автоматич-

ного керування цим приводом, а також проведення досліджень динамічних властивостей таких систем та їх порівняння з традиційною системою приводу постійного струму.

1. Математичний опис асинхронного приводу ПДА

Для дослідження електромагнітних процесів, які виникають в асинхронному двигуні (АД), звернемось до математичного опису, поданого у вигляді проекцій просторових векторів на пряму та квадратурну осі α та β обертової системи координат записаній в операторній формі запису [8]. Ця система координат обертається з швидкістю, рівною кутовій частоті напруги живлення АД, ω_{0e} тобто є нерухомою відносно електричного простору. Кожний просторовий вектор у будь-який момент часу має проекцію на пряму та квадратурну осі.

$$\left\{ \begin{array}{l} p\Psi_{1\alpha} = u_{1\alpha} - \frac{1}{\sigma T_1} \Psi_{1\alpha} + \omega_{0e} \Psi_{1\beta} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \Psi_{2\alpha}; \\ p\Psi_{1\beta} = u_{1\beta} - \frac{1}{\sigma T_1} \Psi_{1\beta} - \omega_{0e} \Psi_{1\alpha} + \frac{k_2}{\sigma T_1} \Psi_{2\beta}; \\ p\Psi_{2\alpha} = \frac{k_1}{\sigma T_2} \Psi_{1\alpha} - \frac{1}{\sigma T_2} \Psi_{2\alpha} + \omega_p \Psi_{2\beta}; \\ p\Psi_{2\beta} = \frac{k_1}{\sigma T_2} \Psi_{1\beta} - \frac{1}{\sigma T_2} \Psi_{2\beta} - \omega_p \Psi_{2\alpha}; \\ i_{1\alpha} = \frac{1}{\sigma L_1} (\Psi_{1\alpha} - k_2 \Psi_{2\alpha}); \\ i_{1\beta} = \frac{1}{\sigma L_1} (\Psi_{1\beta} - k_2 \Psi_{2\beta}); \\ i_{2\alpha} = \frac{1}{\sigma L_2} (\Psi_{2\alpha} - k_1 \Psi_{1\alpha}); \\ i_{2\beta} = \frac{1}{\sigma L_2} (\Psi_{2\beta} - k_1 \Psi_{1\beta}); \\ M_D = \frac{3}{2} p_{II} \frac{k_1}{\sigma L_2} (\Psi_{2\alpha} \Psi_{1\beta} - \Psi_{1\alpha} \Psi_{2\beta}); \\ \omega_p = \omega_{0e} - p_{II} \omega, \end{array} \right. \quad (1)$$

де p — оператор Лапласа; $u_{1\alpha}$ та $u_{1\beta}$ — проекції вектора напруги на статорі; $\Psi_{1\alpha}$, $\Psi_{1\beta}$ та $\Psi_{2\alpha}$, $\Psi_{2\beta}$ — проекції вектора потокозчеплення статора та ротора, відповідно; $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ та $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ — проекції вектора струму статора та ротора, відповідно; ω_p — кутова швидкість роторної ЕРС; ω — кутова швидкість обертання ротора; M_D — електродинамічний момент АД, p_{II} — кількість пар полюсів;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} = 1 - k_1 k_2$ — коефіцієнт розсіювання машини; $k_1 = \frac{L_m}{L_1}$ та $k_2 = \frac{L_m}{L_2}$ — безроз-

мірні коефіцієнти; $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ та $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$ — сталі часу обмоток ротора та статора відповідно; R_1 , L_1

та R_2 , L_2 — активний опір та індуктивність обмоток статора та ротора.

Значення модулів векторів струму а також потокозчеплення статора можна знайти за формулами

$$I_{\max 1} = \sqrt{i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2}, \quad \Psi_{\max 1} = \sqrt{\Psi_{1\alpha}^2 + \Psi_{1\beta}^2}. \quad (2)$$

На рис. 2 показано структурну схему двигуна, складену за рівняннями системи (1).

Подана структурна схема є описом електромагнітних процесів АД за умови, що в електричній машині діють трифазні змінні напруги синусоїдної форми. На виході вона формує електромагніт-

ний момент $M_{\text{д}}$, а вхідними діями є проєкції вектора напруги на статорі $u_{1\alpha}$ та $u_{1\beta}$, а також її частота $\omega_{0\text{ел}}$. Таку систему можна представити у вигляді підсистеми, зображеної на рис. 3. Проєкції струму та потокозчеплення є інформативними величинами. Швидкість обертання залежить від механічної частини приводу і в найпростішому випадку пов'язане з електродинамічним моментом основним рівнянням механіки приводу.

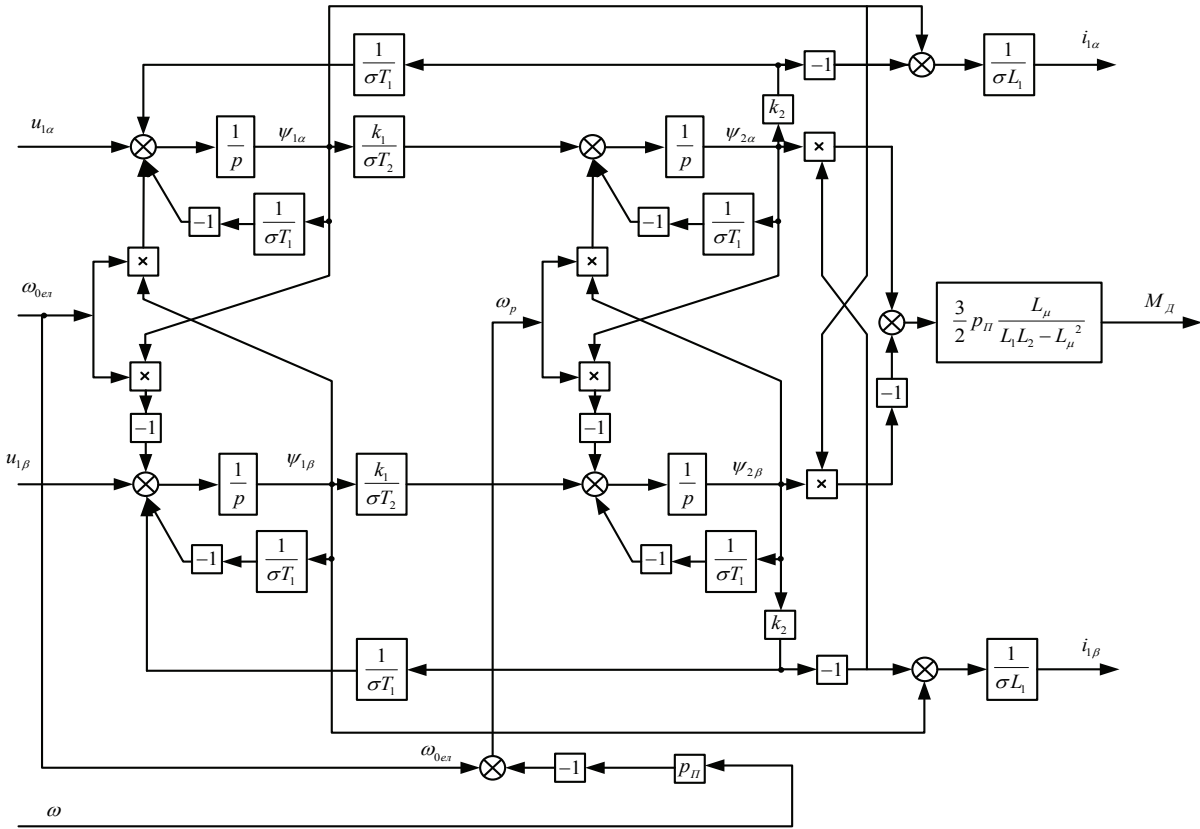


Рис. 2. Структурна схема АД

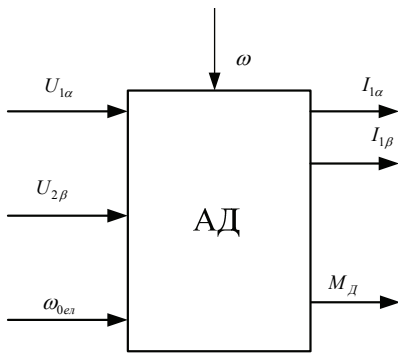


Рис. 3

Для опису механічної частини приводу ПДА звернемося до розробленої у [9] системи рівнянь, записаній в операторній формі запису,

$$\begin{cases} (J_1^* p^2 + \beta_1^* p + \zeta_{12}) \omega_1 - (J_{12}^* p^2 + \beta_{12}^* p + \zeta_{12}) \omega_2 = pM_1; \\ (J_2^* p^2 + \beta_2^* p + \zeta_{12}) \omega_2 - (J_{12}^* p^2 + \beta_{12}^* p + \zeta_{12}) \omega_1 = pM_2, \end{cases} \quad (3)$$

де

$$\begin{cases} J_1^* = J_1 + \alpha \frac{2}{3} J_{12} k^2; & J_2^* = J_2 + (1 - \alpha) \frac{2}{3} J_{12} k^2; & J_{12}^* = -\frac{1}{6} J_{12} k^2; \\ \beta_1^* = \beta_1 + \alpha \frac{2}{3} \beta_{12} k^2; & \beta_2^* = \beta_2 + (1 - \alpha) \frac{2}{3} \beta_{12} k^2; & \beta_{12}^* = -\frac{1}{6} \beta_{12} k^2 \end{cases}$$

— еквівалентні моменти інерції, еквівалентні коефіцієнти розсіювання та еквівалентні узагальнені сили, відповідно, а також J_1, J_2, J_{12} — відповідно, моменти інерції роторів нижнього і верхнього двигунів та завантажених шнеків; β_1, β_2 і β_{12} — коефіцієнти розсіювання енергії в обох двигунах та шнеку; α — коефіцієнт, який враховує нерівномірний розподіл моментів вздовж шнеків; ζ_{12} — коефіцієнт пружного зв'язку шнековала; ω_1, ω_2 — швидкості обертання, M_1, M_2 — механічний момент нижнього і верхнього двигунів, відповідно.

Використовуючи систему рівнянь (3) та структурну схему приводу, проказану у вигляді підсистеми (див. рис. 3), можна розробити структурну схему асинхронного приводу ПДА, показану на рис. 4.

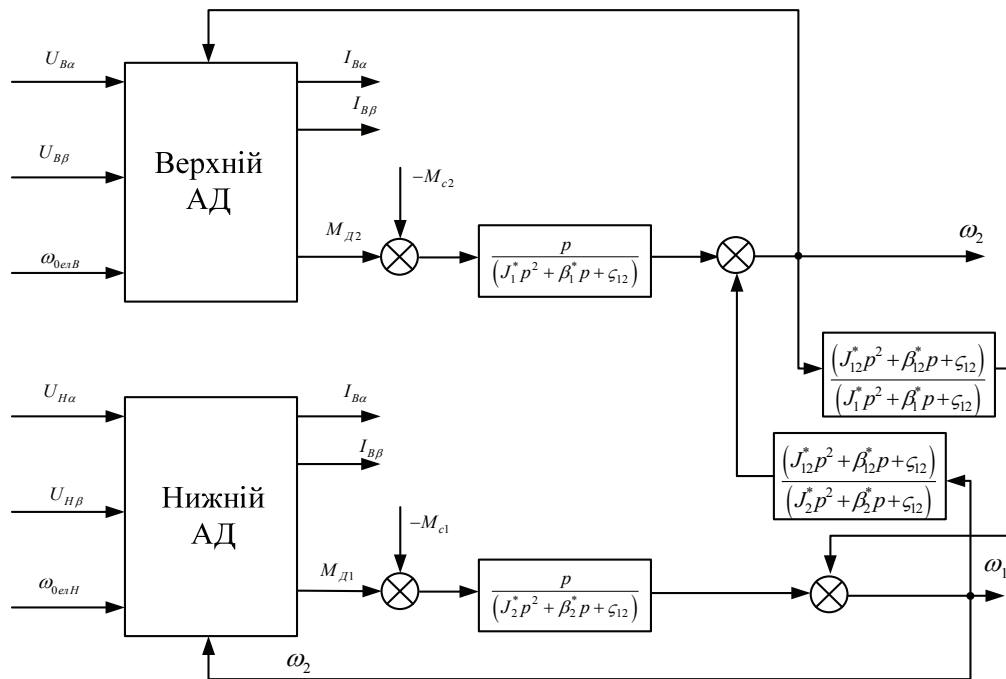


Рис. 4. Структурна схема асинхронного приводу ПДА

На рис. 4: $\omega_{0елН}$ та $\omega_{0елВ}$ — частоти, $U_{H\alpha}$, $U_{H\beta}$ та $U_{B\alpha}$, $U_{B\beta}$ — проекції векторів напруг, $I_{H\alpha}$, $I_{H\beta}$ та $I_{B\alpha}$, $I_{B\beta}$ — проекції струмів статорних обмоток нижнього та верхнього двигунів, відповідно, $M_{Д1}$, M_{c1} та $M_{Д2}$, M_{c2} — динамічні та статичні моменти нижнього та верхнього двигунів, відповідно.

Отримана структурна схема є математичною моделлю асинхронного приводу ПДА, на якій показані усі зв'язки змінних та їх взаємовплив. Вхідними діями цієї моделі є частота та діюче значення напруги живлення статорних обмоток верхнього та нижнього двигунів. В системах частотно-регульованого приводу джерелом цієї напруги є перетворювач частоти (ПЧ).

2. Математичне моделювання систем частотно-регульованого приводу ПДА

Дослідження процесів, які відбуваються в такій системі, є надзвичайно складним завданням внаслідок її високого порядку та великої кількості параметрів, які впливають на них.

Найзручнішими для розв'язання поставлених задач, на погляд авторів, є чисельні методи, за допомогою яких можна розв'язати отриману вище математичну модель системи та отримати реакції відповідних величин на різні збурення. Такі методи можна реалізувати, використовуючи прикладні пакети математичних програм, зокрема MATLAB. Цей пакет містить засіб імітаційного моделювання динамічних систем Simulink, який дозволяє досліджувати складні системи автоматичного керування.

Розглянемо різні варіанти живлення статорних обмоток нижнього та верхнього АД. Очевидно, що найпростішим є варіант живлення обох двигунів від одного ПЧ, зображений на рис. 5а. В такому разі частота та значення напруги статорних обмоток обох двигунів буде однаковим, тобто $\omega_{0елН} = \omega_{0елВ} = \omega_{0ел}$, $U_{H\alpha} = U_{B\alpha} = U_{\alpha}$, $U_{H\beta} = U_{B\beta} = U_{\beta}$.

Система частотно-регульованого асинхронного приводу ПДА за такого варіанта живлення може містити зворотні зв'язки за струмом, швидкістю обертання та кутом повороту вала, але впливати на швидкість обертання чи момент окремого двигуна не здатна. У разі живлення АД від індивідуальних ПЧ (рис. 5б) система керування може змінювати напругу та частоту окремо на кожному двигуні, таким чином впливаючи на швидкість обертання та кут повороту вала окремого двигуна.

Отримані вище математичні моделі дають змогу створити імітаційні моделі різних типів приводу в середовищі MATLAB Simulink для дослідження його динамічних властивостей з урахуванням різних особливостей роботи приводу, зокрема змінних в ході роботи статичного моменту на валу двигуна, приведенного моменту інерції усього механізму, виникнення за певних умов роботи нерівномірного завантаження шнековалів.

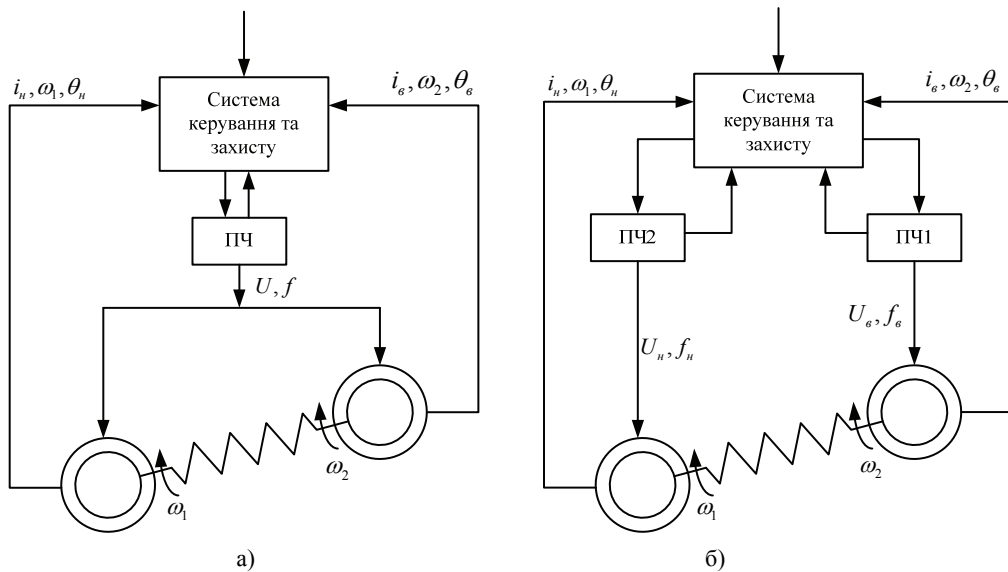


Рис. 5. Варіанти реалізації частотно-регульованого приводу ПДА

На рис. 6 показано приклад такого моделювання плавного пуску ПДА за різних параметрів системи. На ньому зображено часові діаграми напруги на двигунах U , моментів на валах нижнього і верхнього двигунів M_1 , M_2 , швидкості обертання нижнього і верхнього двигунів ω_1 , ω_2 , різниці швидкості обертання двигунів $\Delta\omega$, отримані в результаті дослідження.

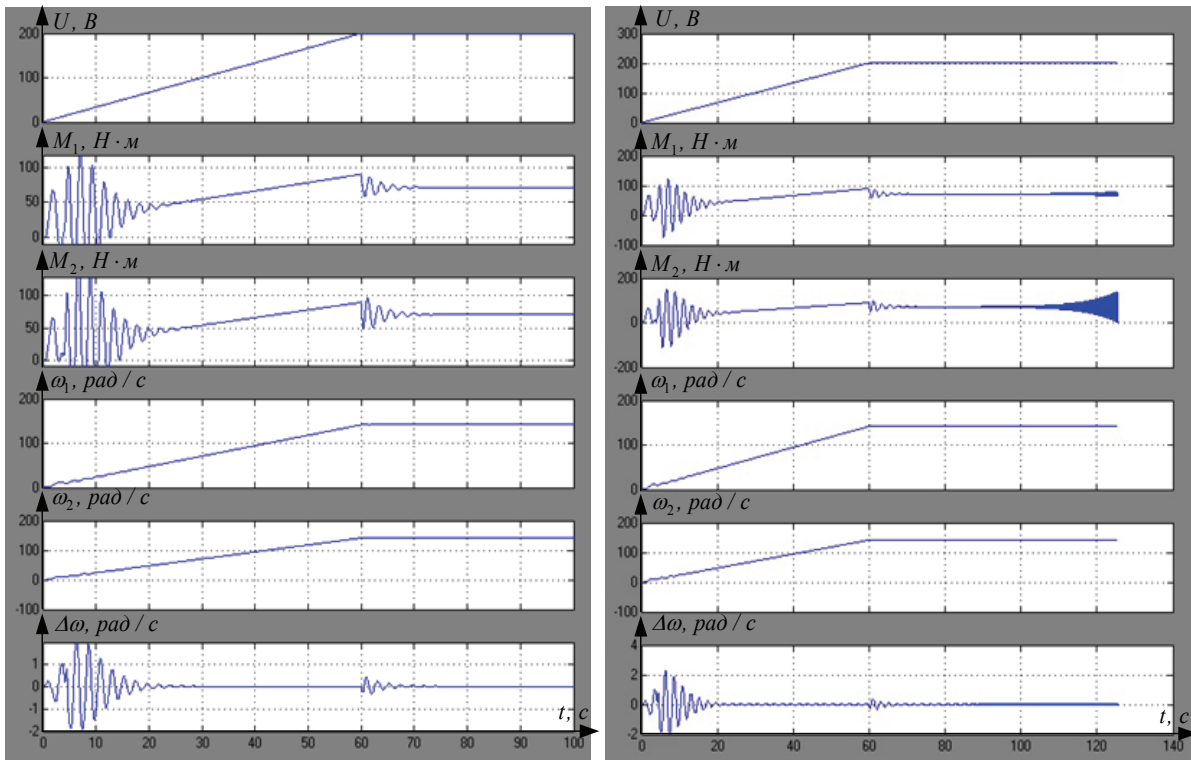


Рис. 6. Часові діаграми пуску ПДА

Як випливає з отриманих залежностей, динамічні властивості системи залежать від параметрів системи. Зокрема, за певних їх значень система приводу ПДА є стійкою (часові діаграми ліворуч),

а в іншому випадку вона втрачає стійкість. Тому постає задача визначення впливу параметрів системи на динамічні її властивості на стадії синтезування та проектування частотно-регульованих приводів ПДА.

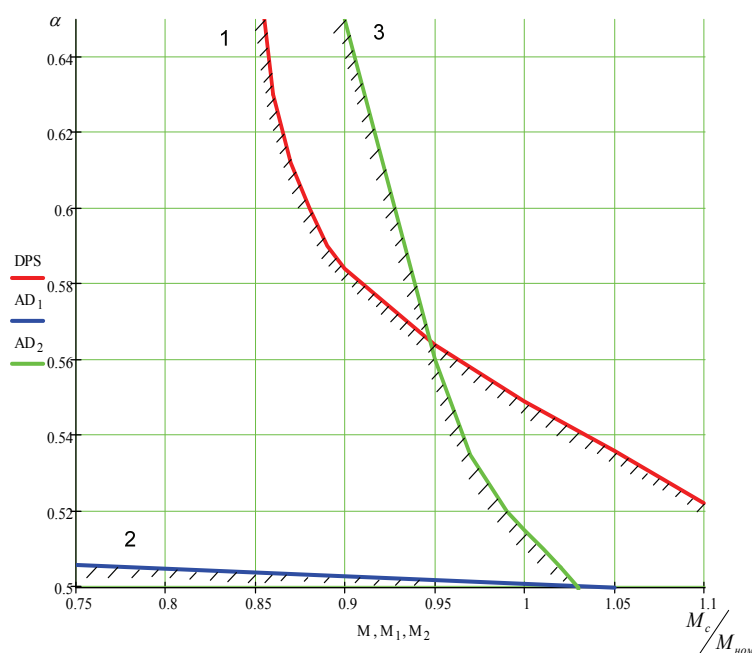


Рис. 7. Визначення зони стійкості різних типів привода

втрачати стійкість. Значно кращі властивості притаманні приводу з індивідуальними ПЧ, оскільки використання векторного керування в цьому типі дає змогу синхронізувати обертання обох двигунів навіть за значної нерівномірності завантаження. Незаперечною перевагою приводу постійного струму є його перевантажувальна здатність, чого досягти в асинхронному приводі досить важко. Особливо це стосується пускових режимів з номінальним завантаженням дифузійного апарата

Висновки

В роботі розроблено математичні моделі асинхронного приводу похилого дифузійного апарата, які враховують важливі особливості роботи механіки приводу. На їх основі створено імітаційні моделі в середовищі MATLAB Simulink, які дають змогу досліджувати динамічні властивості системи. Такі математичні та імітаційні моделі дозволяють синтезувати системи частотно-регульованого приводу, їх алгоритми керування за різних варіантів живлення двох АД та досліджувати процеси, які відбуваються у них. В роботі проведено дослідження динамічних режимів роботи систем асинхронного приводу у порівнянні з традиційними системами постійного струму, дослідження яких здійснювалось у [3, 4]. Тому гостро постає задача синтезу системи автоматичного керування приводом з якомога кращими динамічними характеристиками та розробки технічних засобів її реалізації.

Отримані результати можуть бути використанні для оптимального проектування приводу ПДА.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гребенюк С. М. Технологическое оборудование сахарных заводов / С. М. Гребенюк. — М. : Пищевая промышленность, 1985. — 520 с.
2. Технологія цукру (Sugar technology) : підруч. : в 3 т. — Т. 1 : Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози / [А. А. Ліпец, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін.] ; за ред. В. М. Логвіна, А. І. Українця ; Нац. ун-т харч. технол. — К. : Експрес-об'ява, 2015. — 288 с. — ISBN 978-966-97450-5-7.
3. Кухарчук В. Дослідження динамічних режимів роботи системи приводу похилого дифузійного апарата методом імітаційного моделювання / В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, А. М. Коваль // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2013. — № 4. — С. 7—12.
4. Кухарчук В. Динамічні властивості системи приводу похилого дифузійного апарата / В. В. Кухарчук, В. І. Родінков, А. М. Коваль // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. — 2013. — № 2. — С. 86—93.
5. Моногаров С. Частотно-регулируемый электропривод диффузионной установки ГТДС-20 / С. И. Моногаров // Технические и технологические системы. — Краснодар, 2009. — С. 178—180.
6. Куроедов В. Модернизация автоматизированного электропривода диффузионного аппарата ПДС-20 / В. И. Курое-

Також важливою задачею є порівняння динамічних властивостей синтезованих систем із традиційною системою приводу постійного струму цього механізму. Як приклад, на рис. 7 визначено границю стійкості, за методикою, поданою у [3, 4] в системі координат: статичний момент, коефіцієнт нерівномірності завантаження шнековала для таких типів приводів: 1 — привід постійного струму, 2 — асинхронний привід зі спільним ПЧ, 3 — асинхронний привід з індивідуальними ПЧ. Штриховкою вказано зони стійкості.

Як видно з отриманих залежностей асинхронний привід зі спільним ПЧ значно поступається приводу постійного струму і є дуже чутливим до нерівномірного завантаження шнековалів, внаслідок чого може

дов, С. И. Моногаров // Энергосбережение и водоподготовка. — 2010. — № 3 (65). — С. 60—61.

7. Родінков В. Незатухаючі електромагнітні коливання в електроприводі постійного струму / В. І. Родінков, А. М. Коваль, В. В. Юр // Вісник інженерної академії України. — 2010. — № 1. С. 124—127.

8. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. — М. : Академия, 2006. — 272 с.

9. Ведміцький Ю. Математична і електричні моделі механічної частини шнекових дифузійних апаратів / Ю. Г. Ведміцький, В. В. Кухарчук, А. М. Коваль // Вісник інженерної академії України. — 2010. — № 1. — С. 155—160.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки та електричних вимірювань ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.05.2017

Кухарчук Василь Васильович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань;

Коваль Андрій Миколайович — асистент кафедри теоретичної електротехніки та електричних вимірювань, e-mail: kovand1983@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

V. V. Kukharchuk¹

A. M. Koval¹

Mathematical Models of Asynchronous Drive of Inclined Diffusion Apparatus with Frequency Control

¹Vinnitsia National Technical University

There have been developed mathematical models of asynchronous drive of the inclined diffusion apparatus, on the base of which simulation models have been created that allow to research the dynamic modes of the system by means of imitative simulation, taking into account the features of the drive mechanics. There have been proposed the approaches to the synthesis of frequency-controlled drive systems with different supply variants of asynchronous motors and their dynamic properties have been researched in comparison to the DC drive system.

Keywords: mathematical model, inclined diffusion apparatus, asynchronous drive, dynamic properties of the system.

Kukharchuk Vasyl V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measuring;

Koval Andrii M. — Assistant of the Chair of Theoretical Electrical Engineering and Electrical Measuring, e-mail: kovand1983@gmail.com

V. V. Kukharchuk¹

A. H. Koval¹

Математические модели асинхронного привода наклонного диффузионного аппарата с частотным регулированием

¹Вінницький національний технічний університет

Разработаны математические модели асинхронного привода наклонного диффузионного аппарата, на основе которых созданы имитационные модели, позволяющие исследовать динамические режимы работы системы средствами имитационного моделирования с учетом особенностей работы механики привода. Предложены подходы для синтеза систем частотно-регулируемого привода с различными вариантами питания асинхронных двигателей и проведено исследование их динамических свойств по сравнению с системой привода постоянного тока.

Ключевые слова: математическая модель, наклонный диффузный аппарат, асинхронный привод, динамические свойства системы.

Кухарчук Василий Васильевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической электротехники и электрических измерений;

Коваль Андрей Николаевич — ассистент кафедры теоретической электротехники и электрических измерений, e-mail: kovand1983@gmail.com