

## ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В. С. Петрушин<sup>1</sup>, Ю. Р. Плоткін<sup>2</sup>, А. М. Якімець<sup>1</sup>, В. В. Горошко<sup>1</sup>, Р. М. Єноктаєв<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Одеська політехніка»

<sup>2</sup> Берлінська вища школа економіки та права

**Анотація.** Виконано моделювання частотно-регульованого асинхронного електроприводу за допомогою двох програмних продуктів Matlab і DIMASDrive. Визначено струми й активні потужності, що споживаються як на вході приводу, так і на вході асинхронного двигуна. Результати моделювання зіставлено з результатами експериментальних досліджень і визначено відповідні похибки. Розглянуто як статичні, так і динамічні режими роботи. Встановлено переваги та недоліки розглянутих програмних продуктів. Обґрунтовано взаємодоповнюваність цих програм, що дає змогу використовувати їх спільно при виконанні деяких завдань.

**Ключові слова:** частотно-регульований асинхронний електропривод, програма Matlab, програма DIMASDrive, математичне моделювання, експериментальні дослідження, статичні режими, динамічні режими.

### Вступ

Повсюдне використання частотно-регульованих асинхронних електроприводів (ЧРАЕП) у всіх галузях промисловості, на транспорті, що забезпечують раціональне керування технологічними процесами при мінімізації споживання енергоресурсів, вимагає їхнього розвитку та досконалості. Розробка таких електроприводів неможлива без адекватного моделювання всіх фізичних процесів, що відбуваються в них, як у статичних, так і в динамічних режимах роботи. На сьогодні запропоновано низку програм, що виконують таке моделювання, і доцільно оцінити їх з погляду точності моделювання та можливості використання.

### Постановка задачі

Системний підхід вимагає розгляду всіх можливих компонентів, що входять до складу ЧРАЕП. До їх числа слід віднести частотні перетворювачі різних типів, видів регулювання, у яких реалізуються різні закони частотного регулювання, асинхронні двигуни різних виконань, систем охолодження, тощо, узгоджувальні трансформатори та редуктори.

Більшість статей присвячено моделюванню ЧРАЕП за допомогою програмного продукту Matlab Simulink [1-4]. Ця програма популярна завдяки простоті у використанні та широкому спектру динамічних об'єктів – від напівпровідни-

кових і електромеханічних перетворювачів до приводних механізмів. Моделі Matlab Simulink широко використовуються для навчання студентів різним алгоритмам і методам керування асинхронними двигунами [1].

У [2] розглянуто моделювання розімкнутої системи ЧРАЕП з керуванням за законом частотного регулювання  $U/f = \text{const}$ , а також замкнута система з використанням ПІ-регулятора. У [3] для оцінки впливу пускового струму досліджується модель асинхронного двигуна з плавним пуском. У [4] розглядається застосування ШІМ-регулювання для зменшення кидків струму й моменту під час пуску в АД. Однак великий діапазон функцій програми Matlab Simulink знижує швидкість розрахунку складних систем і збільшує рівень абстракції від реальних об'єктів.

Моделі дають змогу розглядати електромеханічні та енергетичні процеси. Але необхідне істотне доопрацювання моделей для розгляду теплових, віброакустичних процесів, визначення механічних показників (прогину вала, критичної частоти обертання, міцності вала, динамічної вантажопідйомності підшипників), знаходження показників механічних характеристик (перевантажувальної здатності, жорсткості). Урахування таких особливостей, як насичення магнітної системи АД і витіснення струму в обмотці ротора, вимагає також додаткових елементів моделювання. Для розгляду економічних і ергономічних аспектів ЧРАЕП слід використовувати низку доповнень і вхідних даних, що визначають масогабаритні та вартісні показники.

До одного з недоліків Matlab Simulink належить необхідність задання параметрів заступної схеми асинхронного двигуна, що в низці випад-

© Петрушин В. С., Плоткін Ю. Р.,  
Якімець А. М., Горошко В. В.,  
Єноктаєв Р. М., 2023

ків (у разі конструктивних змін наявних двигунів: головних геометричних розмірів, розмірів зубцевих зон статора та ротора, обмотувальних даних, використовуваних матеріалів та інше) потребує додаткових програмних засобів їх визначення. Причому ці параметри вводяться як незмінні і значення їх не залежать від параметрів напруги, що живить двигун (діючого значення і частоти), а також від навантаження на валу. При цьому до числа параметрів не входить активний опір кола намагнічування, який дає змогу врахувати основні та додаткові втрати в сталі магнітопроводу. Моделі Matlab Simulink не враховують також механічні (вентиляційні, в підшипниках) і додаткові (поверхневі, пульсаційні) втрати.

У низці випадків необхідне використання особливих критеріїв, що враховують особливості експлуатації ЧРАЕП. До їх числа відносяться діапазонні критерії енергетичних показників, їх сукупності, коли вони взяті з відповідними коефіцієнтами, а також базові або модифіковані діапазонні критерії приведених витрат. У разі використання Matlab Simulink потрібне розроблення та розширення програми додатковими блоками.

Деякі тенденції вдосконалення ЧРАЕП пов'язані з підвищенням фазності, зокрема використання шестифазних і дев'ятифазних двигунів. Для моделювання таких двигунів у Matlab Simulink потрібні спеціальні моделі.

На кафедрі електричних машин Національного університету «Одеська політехніка» розроблено програмний продукт DIMASDrive [5], що дозволяє проводити електромагнітні, електромеханічні, енергетичні, теплові, віброакустичні, механічні розрахунки ЧРАЕП [6,7]. Крім того, цей продукт дає змогу здійснювати автоматизований вибір та оптимізаційне проектування асинхронних двигунів для конкретного технічного завдання. Останнє передбачає за рахунок оптимізаційних процедур спрямований пошук прийнятних конструктивних змін двигунів, що задовольняють відповідним критеріям.

### Мета роботи

Метою роботи є порівняння результатів моделювання, виконаного за допомогою двох програм, визначення похибок щодо результатів експериментальних досліджень, напрацювання рекомендацій щодо спільного використання двох цих програм.

Стандарт МЕК-60034-17 [8] стверджує, що неприпустимо використовувати під час моделювання ЧРАЕП параметри заступної схеми, які визначено для сталого режиму роботи двигуна за

номінальної величини і частоти напруги живлення. Це пов'язано з тим, що ці параметри змінюються не тільки через зміну параметрів живлення, а й через явища насичення магнітної системи двигуна і витіснення струмів в обмотках, що особливо проявляється в регульованих асинхронних двигунах. Для того, аби це врахувати, треба визначати всі параметри заступної схеми двигуна, враховуючи його конструктивні та функціональні особливості, для будь-якої навантажувально-регульовальної точки, а вже потім використовувати ці параметри для розрахунків. У разі моделювання динамічних режимів ці параметри є коефіцієнтами в системах нелінійних диференціальних рівнянь електричної та механічної рівноваги.

Доцільний також перехід від сімейств робочих характеристик і характеристики навантажувального механізму до регульовальних характеристик, що являють собою зміну досліджуваного показника від частоти обертання в заданому діапазоні регулювання за конкретного навантажувального механізму.

Математичні моделі (ММ), які використовують для дослідження перехідних електромагнітних і електромеханічних процесів у регульованих асинхронних двигунах, ґрунтуються на системах нелінійних диференціальних рівнянь рівноваги напруг і струмів у системі перетворених координат [9,10].

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha} = u_{s\alpha}(t) - r_s \cdot (a_l(t) \cdot \Psi_{s\alpha}(t) - a_0(t) \cdot \Psi_{r\alpha}(t))$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} = u_{s\beta}(t) - r_s \cdot (a_l(t) \cdot \Psi_{s\beta}(t) - a_0(t) \cdot \Psi_{r\beta}(t))$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha} = -p \frac{\omega_e}{i_{ped}} \cdot \Psi_{s\beta}(t) - r_r(t) \cdot (a_2(t) \Psi_{r\alpha}(t) - a_0(t) \Psi_{s\alpha}(t))$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} = p \frac{\omega_e}{i_{ped}} \cdot \Psi_{s\alpha}(t) - r_r(t) \cdot (a_2(t) \Psi_{r\beta}(t) - a_0(t) \Psi_{s\beta}(t))$$

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{1}{J_\Sigma} \left\{ \frac{mp}{2} a_0(t) \frac{n_{ped}}{i_{ped}} (\Psi_{s\beta}(t) \Psi_{s\alpha}(t) - \Psi_{s\beta}(t) \Psi_{s\alpha}(t)) - M_e(\omega_e) \right\}$$

де  $\Psi_{s\alpha}(t), \Psi_{s\beta}(t), \Psi_{r\alpha}(t)$  та  $\Psi_{r\beta}(t)$  – потокозчеплення статорних і роторних обмоток електричної машини, відповідно за вісями  $\alpha$  й  $\beta$ ;  $p$  – число пар полюсів;  $m$  – число фаз;  $r_s, r_r(t)$  – активні опори обмоток статора й ротора (останні змінюються на кожному кроці інтегрування);  $a_0(t), a_l(t)$ ,

$a_2(t)$  – розрахункові коефіцієнти, що визначаються параметрами заступної схеми що, як і активний опір ротора, змінюються на кожному кроці інтегрування:

$$a_0(t) = \frac{L_m(t)}{L_{\sigma 1}(t) \cdot L_{\sigma 2}(t) + (L_{\sigma 1}(t) + L_{\sigma 2}(t)) \cdot L_m(t)},$$

$$a_1(t) = \frac{L_{\sigma 2}(t) + L_m(t)}{L_{\sigma 1}(t) \cdot L_{\sigma 2}(t) + (L_{\sigma 1}(t) + L_{\sigma 2}(t)) \cdot L_m(t)},$$

$$a_2(t) = \frac{L_{\sigma 1}(t) + L_m(t)}{L_{\sigma 1}(t) \cdot L_{\sigma 2}(t) + (L_{\sigma 1}(t) + L_{\sigma 2}(t)) \cdot L_m(t)},$$

де у свою чергу  $L_{\sigma 1}(t)$ ,  $L_{\sigma 2}(t)$ ,  $L_m(t)$  – індуктивності розсіювання статора, ротора та взаємодукції. Аби модель була інваріантною як до звичайних двигунів (в тому числі й багатополюсних) так і до мотор-редукторів, використовується  $\omega_6$  – кутова частота обертання вихідного валу двигуна (або мотор-редуктора);  $i_{ped}$  та  $\eta_{ped}$  – передаточне відношення редуктора та його ККД відповідно;  $J_{\Sigma}$  – сумарний момент інерції приводу, приведенний до вихідного валу;  $M_6(\omega_6)$  – залежність моменту опору механізму на вихідному валу від частоти обертання. Миттєві значення напруг  $u_{s\alpha}(t)$  та  $u_{s\beta}(t)$  за вісями  $\alpha$  й  $\beta$  визначаються амплітудою напруги  $U_m$  (що залежить від закону частотного управління) й кутовим станом узагальненого вектору напруги  $\varphi$ :

$$u_{s\alpha}(t) = U_m(t) \cdot \cos(\varphi_I), \quad u_{s\beta}(t) = U_m(t) \cdot \sin(\varphi_I),$$

при цьому система доповнюється ще двома диференціальними рівняннями:

$$\frac{d}{dt}\varphi_I = \omega_I \quad \text{та} \quad \frac{d}{dt}\omega_I = \varepsilon_I(t),$$

де  $\omega_I$  – кутова частота обертання, а  $\varepsilon_I(t)$  – графік кутових прискорень узагальненого вектору напруги, що визначається заданою тахограмою швидкостей приводу.

Вирази, що пов'язують миттєві значення струмів і потокозчеплень, мають наступний вигляд:

$$i_{s\alpha}(t) = a_1(t) \cdot \Psi_{s\alpha}(t) - a_0(t) \cdot \Psi_{s\alpha}(t),$$

$$i_{s\beta}(t) = a_1(t) \cdot \Psi_{s\beta}(t) - a_0(t) \cdot \Psi_{s\beta}(t),$$

де  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$  – струми статора за вісями  $\alpha$  й  $\beta$ . Діюче значення струму статора:

$$i_I(t) = \sqrt{\frac{I}{2} \cdot [i_{s\alpha}(t)^2 + i_{s\beta}(t)^2]}$$

ММ, побудована на базі вищеописаних диференціальних рівнянь, дає змогу провести

розрахунки частот обертання, струмів у фазах обмоток, електромагнітних моментів, втрат.

У кожному з рівнянь мають місце нелінійні коефіцієнти – параметри двигуна, що змінюються в кожній робочій точці, зокрема й унаслідок явищ насичення магнітної системи та витіснення струму в обмотці ротора [7]. Один із підходів до аналізу динамічних характеристик регульованих асинхронних двигунів передбачає попереднє визначення цих коефіцієнтів для необхідних робочих точок діапазону регулювання. Тому до аналізу перехідного процесу проводять розрахунки сталих режимів з метою отримання значень усіх параметрів схеми заміщення з урахуванням витіснення струму в обмотці ротора і насичення магнітопроводу для необхідних робочих точок діапазону регулювання. Для цього використовують ММ усталених режимів. Під час розрахунків динамічних режимів враховують зміни на кожному кроці інтегрування системи, тобто в певних точках характеристики переходу від однієї частоти обертання до іншої, величин і частот живильної напруги відповідно до використовуваного закону частотного регулювання, параметрів схеми заміщення. За навантажень вентиляторного і тягового характерів змінюється також момент навантаження, значення якого, відповідне кутовій частоті обертання приводу, визначається за навантажувальною характеристикою. При реалізації такого підходу забезпечується підвищення рівня адекватності ММ.

Умовна активна потужність, що споживається двигуном, у динамічних режимах за умови синусоїдальної напруги живлення розраховується через діючі значення напруг і струмів:

$$P_I' = \frac{3}{2} \cdot [U_{s\alpha} \cdot I_{s\alpha} + U_{s\beta} \cdot I_{s\beta}].$$

Реальна споживана двигуном активна потужність  $P_I$  більша за умовну на величину суми неврахованих втрат (основних і додаткових у магнітопроводі, механічних, додаткових):

$$P_I = P_I' + \Delta P_{ct \text{ осн}} + \Delta P_{ct \text{ дод}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{дод}}.$$

### Результати досліджень

З метою обмеження обсягу досліджень далі розглянуто лише ЧРАЕП із транзисторним перетворювачем частоти з автономним інвертором напруги та ШІМ-регулюванням. Використовувалося скалярне керування. Під час розроблення математичної моделі ухвалювали такі спрощувальні припущення: обмотки статора і ротора симетричні; вентилялі ідеальні, їхня комутація миттєва; опір вентилів у відкритому і провідність

у закритому стані дорівнюють нулю. Для підтвердження результатів моделювання на стенді (рис.1) було проведено експериментальні дослідження.



Рис. 1. Загальний вигляд експериментального стенду

Серійний асинхронний двигун АІР71А2У3 отримував живлення від трифазного транзисторного перетворювача частоти SEMITEACH. Обмотка статора двигуна була з'єднана зіркою. Напруга в мережі під час експерименту становила 380 В при частоті 50 Гц. Частота модуляції перетворювача 6 кГц. Експерименти проводилися при законі частотного регулювання  $U/f = \text{const}$  для низки частот від 15 до 60 Гц. На рис. 2 представлено сімейство механічних характеристик (для різних частот) трифазного АД, на яке накладається лінійна навантажувальна характеристика, що забезпечується навантажувальним генератором стенду, що згодом використовується для переходу до регульовальних характеристик.

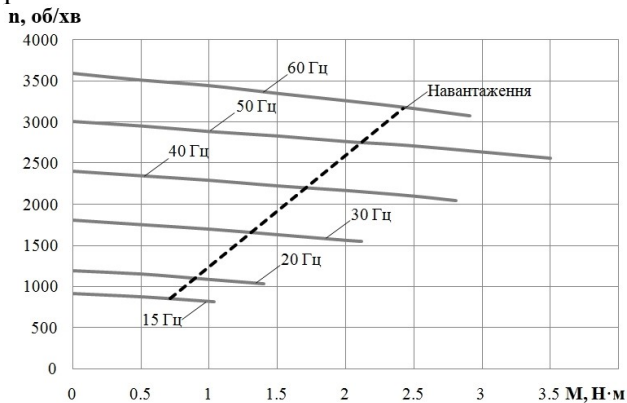


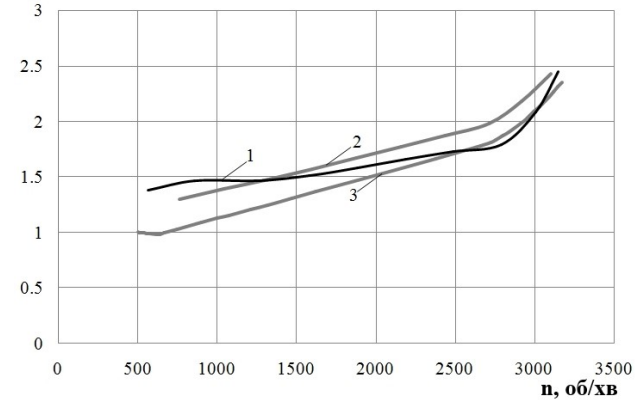
Рис. 2. Сімейство механічних характеристик (для різних частот) та навантажувальна характеристика

Осцилографування струмів і напруг проводилося за допомогою цифрового осцилографа BORDO-421 як на вході приводу, так і на вході двигуна.

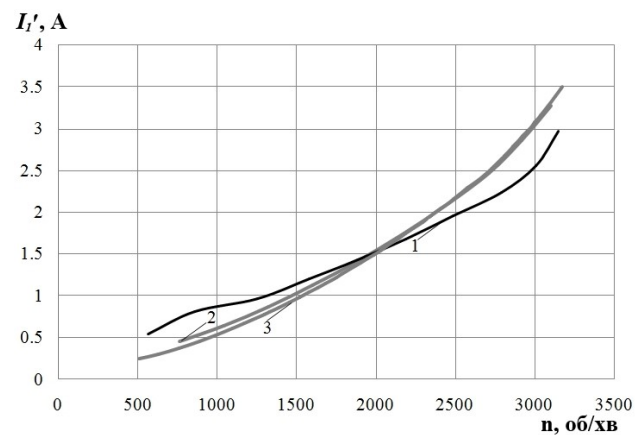
На рис. 3 наведено теоретичні та експериментальні регульовальні характеристики струмів на вході двигуна  $I_1$  (а) та на вході приводу  $I_1'$  (б).

Для обробки отриманих в експерименті ос-

цилограм струмів і напруг використовується програма «Обробка результатів», яку розроблено на



а)



б)

Рис. 3. Регульовальні характеристики струмів на вході двигуна (а) та на вході приводу (б): 1 – експериментальні, 2 – теоретичні Matlab, 3 – теоретичні DIMASDrive

на базі Matlab (її аналог описано в [11]). На рис. 4 та 5 наведено відповідно теоретичні та експериментальні регульовальні характеристики спожитої активної потужності, що споживається, на вході двигуна:

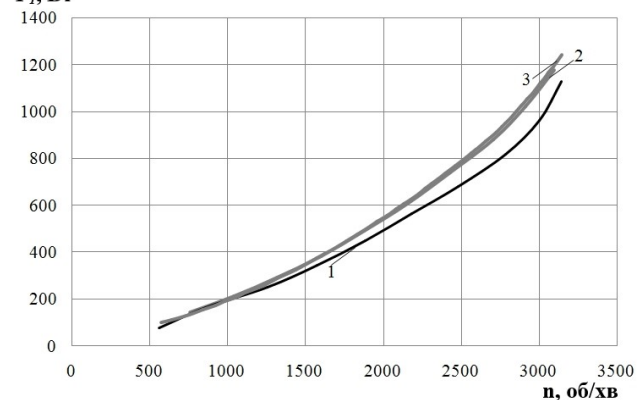


Рис. 4. Регульовальні характеристики активної потужності, що споживається, на вході двигуна: 1 – експериментальна, 2 – теоретична Matlab, 3 – теоретична DIMASDrive

ваних активних потужностей на вході двигуна  $P_I$  (а) та на вході приводу  $P_{I'}$ . Теоретичне визначення активних потужностей, що споживаються приводом, виконується з використанням коефіцієнта корисної дії перетворювача SEMITEACH, який, згідно з [12], складає 0,95. Розрахунок діючих значень струмів на вході приводу виконується за визначеними потужностями на вході приводу.

$P_{I'}, \text{Вт}$

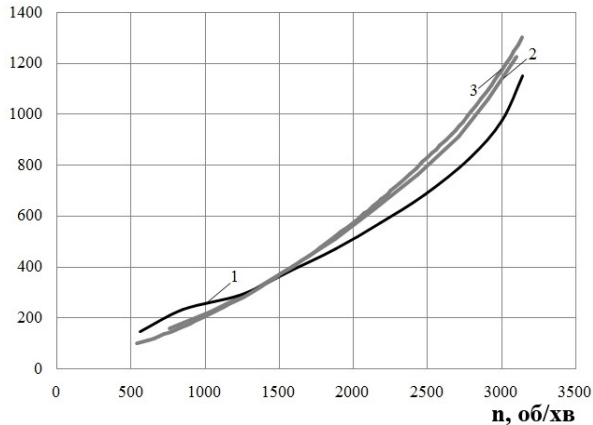


Рис. 5. Регулювальні характеристики активної потужності, що споживається, на вході приводу: 1 – експериментальна, 2 – теоретична Matlab, 3 – теоретична DIMASDrive

Також виконано моделювання двома програмами, а також експериментальне визначення споживаних струмів і потужностей під час роботи на задану тахограму (3 с на 1583 об/хв,  $M = 1,27 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ; 3 с – 2783 об/хв,  $M = 1,94 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) (рис. 5-6).

На рис. 6 та 7 наведено відповідно теоретичні та експериментальні динамічні характеристики споживаних струмів на вході двигуна  $I_I$  та на вході приводу  $I_{I'}$ .

$I_I, \text{А}$

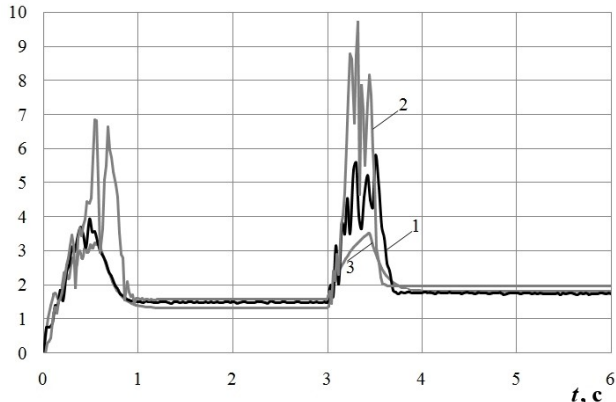


Рис. 6. Динамічні характеристики струму на вході двигуна: 1 – експериментальна, 2 – теоретична Matlab, 3 – теоретична DIMASDrive

$I_{I'}, \text{А}$

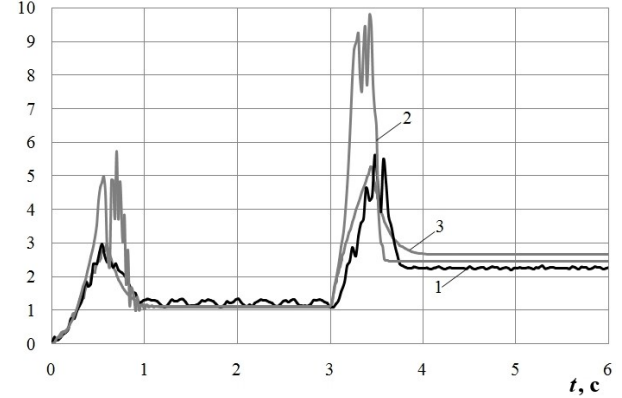
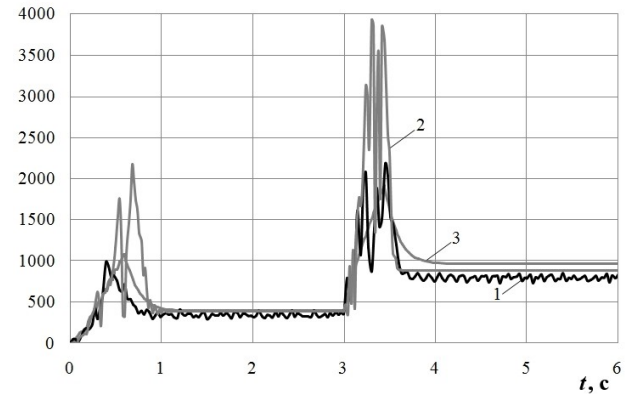


Рис. 7. Динамічні характеристики струму на вході приводу: 1 – експериментальна, 2 – теоретична Matlab, 3 – теоретична DIMASDrive

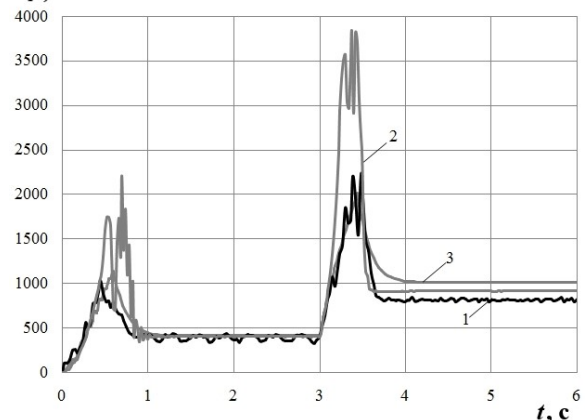
На рис. 8 наведено теоретичні та експериментальні динамічні характеристики споживаних активних потужностей на вході двигуна  $P_I$  (а) та на вході приводу  $P_{I'}$  (б).

$P_I, \text{Вт}$



а)

$P_{I'}, \text{Вт}$



б)

Рис. 8. Динамічні характеристики споживаних активних потужностей на вході двигуна (а) та на вході приводу (б): 1 – експериментальні, 2 – теоретичні Matlab, 3 – теоретичні DIMASDrive

Як було сказано вище, програма DIMASDrive за рахунок варіювання конструктивних параметрів двигуна забезпечує оптимізаційне проектування. Ефективність цього оптимізаційного проектування може бути підтверджена програмою Matlab, у моделі якої вводять нові параметри заступної схеми асинхронного двигуна, що попередньо отримані програмою DIMASDrive, та які відповідають тому чи іншому проектному варіанту.

### Висновки

1. Середня відносна похибка теоретичного визначення за допомогою математичних моделей щодо результатів експериментальних досліджень в розглянутому діапазоні регулювання (800 – 3000 об/хв) дорівнює:

- для струмів на вході двигуна: за допомогою Matlab 7,2 %, за допомогою DIMASDrive 10%;

- для струмів на вході приводу: за допомогою Matlab 16 %, за допомогою DIMASDrive 21 %;

- для потужностей на вході двигуна: за допомогою Matlab 7,19 %, за допомогою DIMASDrive 8,11 %;

- для потужностей на вході приводу: за допомогою Matlab 11,1 %, за допомогою DIMASDrive 11,8 %.

2. Струми та потужності на вході двигуна обидві програми розраховують з прийнятною похибкою.

3. Значні похибки стосовно входу приводу свідчать про недосконалість обох програм щодо розрахунку цих показників.

4. Вигляд динамічних характеристик, отриманих за допомогою двох програм, адекватний характеристикам експериментальним, проте теоретичні характеристики, отримані в Matlab, мають значні сплески при переході з однієї частоти обертання до другої у порівнянні з іншими характеристиками.

5. Використовуючи отримані похибки можливо керуватися при здійсненні корегування математичних моделей, зокрема врахування втрат від вищих часових гармонік, що покращить теоретичний аналіз роботи частотно-регульованих електроприводів.

6. Доцільно використовувати Matlab для перевірки проектних варіантів, виконаних за допомогою DIMASDrive.

### Список використаної літератури

1. Saghafinia, A., Ping, H. W., Uddin, M. N., & Amindoust, A. Teaching of Simulation an Adjustable Speed Drive of Induction Motor Using MATLAB/Simulink in Advanced Electrical Machine Laboratory [Text] – Procedia - Social and

Behavioral Sciences, – 2013. – 103, 912–921. doi:10.1016/j.sbspro.2013.10.413

2. Mansuri, A. E. Adjustable Speed Drive of Asynchronous Machine Using Volt/Hz & PI Technique [Text]. – 2018. – 2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). doi:10.1109/sceecs.2018.8546917

3. Nwachukwu, C. O., Ajumuka, M. I., & Izuegbunam, F. I. Three phase soft starter controller scheme for asynchronous machine response to transients using MatLab/Simulink [Text]. – 2017. – 2017 IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development (NIGERCON). doi:10.1109/nigercon.2017.8281968

4. Thakur, Neha and Rakesh Singh Lodhi. Computer Simulation of SPWM-VSI for Minimizing the starting torque and current in Asynchronous Motor Drive [Text] – International Journal of Research, – 2014. – Vol. 1, No. 5, 292–298.

5. Петрушин, В. С., Рябинин, С. В., Якимец, А. М. Программный продукт "DIMASDrive". Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода (свидетельство о регистрации программы ПА№4065) [Электронный ресурс]. – Киев: – Государственный департамент интеллектуальной собственности, 26.03.2001. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

6. Петрушин, В. С. Моделирование динамических режимов асинхронных двигателей при частотном регулировании [Текст] // В. С. Петрушин, А. М. Якимец // Проблемы автоматизированного привода. Вестник Национального технического университета "ХПИ": – 2001. – №10. – С. 156 – 157.

7. Петрушин, В. С. Учебное пособие "Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе" [Текст] // Одесса, Наука и техника: – 2006. – 320 с.

8. IEC/TS 60034-17:2006 "Rotating electrical machines - Part 17: Cage induction motors when fed from converters - Application guide".

9. Шрейнер, Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты: моногр. [Текст] / Р.Т. Шрейнер. Екатеринбург: УРО РАН: – 2000. – 654 с.

10. Шестаков, А. В. Математическая модель рабочих характеристик асинхронных двигателей с частотным управлением [Текст] // "Электротехника": – 2011. – №2. – С. 23 – 29.

11. Климаш, С. В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде

MatLab [Текст]/ С. В. Климаш, В. С. Климаш, С. В. Власьевский // Электротехнические системы и комплексы: – 2017. – №3(36). – С. 11–16. doi: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16.

12. Колпаков, А. SEMITEACH – силовая электроника для студентов [Текст] // Компоненты и технологии: – 2009. – №10. – С. 83 – 90.

### References

1. Saghafinia, A., Ping, H. W., Uddin, M. N., & Amindoust, A. (2013), "Teaching of Simulation an Adjustable Speed Drive of Induction Motor Using MATLAB/Simulink in Advanced Electrical Machine Laboratory". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 103, 912–921. doi:10.1016/j.sbspro.2013.10.413

2. Mansuri, A. E. (2018), Adjustable Speed Drive of Asynchronous Machine Using Volt/Hz & PI Technique. 2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). doi:10.1109/sceecs.2018.8546917

3. Nwachukwu, C. O., Ajumuka, M. I., & Izuegbunam, F. I. (2017), Three phase soft starter controller scheme for asynchronous machine response to transients using MatLab/Simulink. 2017 IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development (NIGERCON). doi:10.1109/nigercon.2017.8281968

4. Thakur, Neha and Rakesh Singh Lodhi (2014), "Computer Simulation of SPWM-VSI for Minimizing the starting torque and current in Asynchronous Motor Drive". *International Journal of Research*, Vol. 1, No. 5, 292–298.

5. Petrushin, V. S., Rjabinin, S. V., Yakimets, A. M. (2001), "The software product "DIMAS Drive". The program of analysis of work, selection and design of asynchronous squirrel-cage motors of variable speed drive systems (evidence of a PA program registration number 4065) " [Programmnyj produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinhronnyh korotkozamknytyh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoda (svidetel'stvo o registracii program-

my PA№4065. CD)], Gosudarstvennyj department intellektual'noj sobstvennosti, Kiev.

6. Petrushin, V. S., Yakimets, A. M. (2001), "Simulation of dynamic modes of induction motors with frequency regulation" ["Modelirovanie dinamicheskikh rezhimov asinkhronnykh dvigatelei pri chastotnom regulirovanii"], *Problems of automated electrodrive. Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, No.10, pp. 156–157.

7. Petrushin, V. S. (2006), Textbook. Induction motors in adjustable electric drive [Uchebnoe posobie. Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode], Science and Technology Publ. Odessa. 320 p.

8. IEC/TS 60034-17:2006 "Rotating electrical machines - Part 17: Cage induction motors when fed from converters - Application guide".

9. Schreiner, R.T. (2000), Mathematical Modeling AC Electric Drives with Semiconductor Frequency Converters [Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty: monogr.], Ural Department of Russian Academy of Sciences. Ekaterinburg. 654 p.

10. Shestakov, A. V. (2011), "A mathematical model of the performance of asynchronous motors with frequency control" [Matematicheskaja model' rabochikh kharakteristik asinkhronnykh dvigatelei s chastotnym upravleniem], *Elektrotehnika*, No. 2, pp. 23– 29.

11. Klimash, S. V., Klimash, V. S., Vlasayevsky, S. V. (2017), "Specialized Modules for Calculation of Energy Coefficients of Electrical Engineering Devices in Matlab " ["Spetsializirovannye moduli dlya issledovaniya energeticheskikh pokazateley elektrotehnicheskikh ustroystv v srede Matlab"], *Electrotechnical systems and complexes*, No.3(36), pp. 11–16. doi: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16.

12. Kolpakov, A. (2009), "SEMITEACH – power electronics for students" ["Semiteach – silovaya elektronika dlya studentov"], *Components&Technologies*, No.10, pp. 83–90.

## COMPARISON OF THE RESULTS OF SIMULATION A FREQUENCY-CONTROLLED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

V. Petrushin<sup>1</sup>, Y. Plotkin<sup>2</sup>, A. Yakimets<sup>1</sup>,  
V. Horoshko<sup>1</sup>, R. Yenoktaiev<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Odessa Polytechnic National University

<sup>2</sup>Berlin School of Economics and Law

**Abstract.** The modelling of a frequency-controlled asynchronous electric drive was carried out using two software products Matlab and DIMASDrive. The consumed currents and active powers are determined both at the input of the drive and at the input of the asynchronous motor. The simulation results are compared with the results of experimental studies and the corresponding accuracy are found. Both static and dynamic modes of operation are considered. The advantages and disadvantages of the considered software products are established. The complementarity of these programs is substantiated, which makes it possible to use them together when performing certain tasks.

**Keywords:** frequency-controlled asynchronous electric drive, Matlab program, DIMASDrive program, mathematical modelling, experimental studies, static modes, dynamic modes.

## ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

В. С. Петрушин<sup>1</sup>, Ю. Р. Плоткін<sup>2</sup>, А. М. Якімець<sup>1</sup>, В. В. Горошко<sup>1</sup>, Р. М. Єноктаєв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Одеська політехніка»

<sup>2</sup>Берлінська вища школа економіки та права

**Анотація.** Виконано моделювання частотно-регульованого асинхронного електроприводу за допомогою двох програмних продуктів Matlab і DIMASDrive. Визначено струми й активні потужності, що споживаються як на вході приводу, так і на вході асинхронного двигуна. Результати моделювання зіставлено з результатами експериментальних досліджень і визначено відповідні похибки. Розглянуто як статичні, так і динамічні режими роботи. Встановлено переваги та недоліки розглянутих програмних продуктів. Обґрунтовано взаємодоповнюваність цих програм, що дає змогу використовувати їх спільно при виконанні деяких завдань.

**Ключові слова:** частотно-регульований асинхронний електропривод, програма Matlab, програма DIMASDrive, математичне моделювання, експериментальні дослідження, статичні режими, динамічні режими.

Отримано 18.05.2023



**Петрушин Віктор Сергійович**, Національний університет «Одеська політехніка», доктор технічних наук, професор кафедри електромеханічної інженерії. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: victor\_petrushin@ukr.net, тел. (048) 734-8494

**Viktor Petrushin**, Odessa Polytechnic National University, Dr. of Science, Professor, Department of the electromechanical engineering. Shevchenko av., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: victor\_petrushin@ukr.net, ph. (048)734-8494

**ORCID ID:** 0000-0003-2659-126X



**Плоткін Юрій Романович**, Берлінська вища школа економіки та права, кандидат технічних наук, професор, HWR Berlin. Альт Фрідріхсфельде, 60, Берлін, Німеччина, E-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de, тел. +49 (0)30 30877-2443

**Juriy Plotkin**, HWR Berlin, Ph.D., Professor of electrical engineering/ energy technology at Berlin School of Economics and Law. Alt Friedrichsfelde, 60, Berlin, Germany, E-mail: juriy.plotkin@hwr-berlin.de, ph. +49 (0)30 30877-2443

**ORCID ID:** 0000-0001-9257-5933



**Якімець Андрій Миронович**, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічної інженерії. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: a.m.yakimets@op.edu.ua

**Andrii Yakimets**, Odessa Polytechnic National University, Ph.D, Associate Professor, Department of the electromechanical engineering. Shevchenko av., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: a.m.yakimets@op.edu.ua

**ORCID ID:** 0000-0002-0740-9154



**Горошко Василь Володимирович**, Національний університет «Одеська політехніка», Ph. D., старший викладач кафедри електромеханічної інженерії. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: vas.goroshko@gmail.com, тел. +38(063)6008004

**Vasil Horoshko**, Odessa Polytechnic National University, Ph.D, Senior Lecturer, Department of the electromechanical engineering. Shevchenko av., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: vas.goroshko@gmail.com, ph. +38(063)6008004

**ORCID ID:** 0000- 0002-7265-2513



**Єноктаєв Ростислав Миколайович**, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічної інженерії. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: rostik-enok@ukr.net

**Rostislav Yenoktaiev**, Odessa Polytechnic National University, Ph.D, Associate Professor, Department of the electromechanical engineering. Shevchenko av., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: rostik-enok@ukr.net

**ORCID ID:** 0000-0003-1577-9822