

УДК 621.3.076.7

Р. В. СЛОБОДЯН, А. С. ВАСЮРА

ЕМУЛЯТОР ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОНАВЧИХ АСИНХРОННИХ МІКРОДВИГУНІВ СУА

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: <romich.prof@gmail.com>*

Анотація. В роботі проаналізовано математичні моделі асинхронних двигунів та методи управління виконавчими асинхронними мікродвигунами. На основі обчислень обраної математичної моделі розроблено алгоритм та програмний засіб для реалізації емулятора лабораторного стенду з метою вивчення та дослідження виконавчих асинхронних мікродвигунів систем управління та автоматики.

Ключові слова: виконавчі асинхронні мікродвигуни, методи управління, регулювання частоти обертання, математичні моделі, система MATLAB, параметри та характеристики двигуна, емулятор лабораторного стенду, алгоритм, програмний засіб.

Анотация. В работе проанализированы математические модели асинхронных двигателей и методы управления исполнительными асинхронными микродвигателями. на основе обьсчета выбранной математической модели разработан алгоритм и программный продукт для реализации эмулятора лабораторного стенда с целью изучения и исследования исполнительных асинхронных микродвигателей систем управления и автоматики.

Ключевые слова: исполнительные асинхронные микродвигатели, методы управления, регулирование частоты вращения, математические модели, система MatLAB, параметры и характеристики двигателя, эмулятор лабораторного стенда, алгоритм, программное средство.

Anotation. In the work the mathematical models of asynchronous motors and methods of management of executive asynchronous micro-motors are analyzed. on the basis of the calculations of the chosen mathematical model laboratory stand were developed for the purpose of studying and researching executive asynchronous an algorithm and a software tool for implementation of the emulator of the micro-motors of control systems and automation.

Keywords: executive asynchronous micro-motors, control methods, speed control, mathematical models, MATLAB system, parameters and characteristics of the engine, laboratory stand emulator, algorithm, software tool.

ВСТУП

Невід’ємною складовою сучасних систем управління та автоматики, інформаційно-вимірювальних і обчислювальних засобів промислового виробництва, більшості систем дистанційного управління, робототехніки, широкого спектру побутової техніки є застосування пристроїв з використанням виконавчих мікродвигунів.

Від характеристик виконавчих двигунів в значній мірі залежить якість роботи всієї системи в цілому. Специфіка умов роботи таких двигунів визначає певні вимоги до них. Енергетичні параметри тут не є головними. На перший план висуваються такі показники, як швидкодія, діапазон регулювання, надійність, малі габарити і маса, незначна потужність управління, а також цілий ряд показників, що пов’язані з регульовальною характеристикою[1]. Окрім того, на відміну від звичайних двигунів до виконавчих мікродвигунів автоматичних пристроїв виставляються значно вищі вимоги за надійністю, габаритними показниками, стійкістю до різного роду факторів зовнішнього впливу, створенням шумів і вібрацій, тощо. Такі двигуни вкрай рідко працюють в номінальному режимі. Більшу частину часу вони перебувають в перехідних режимах пуску, реверса, зупинки, руху зі змінною швидкістю і т.п. З іншого боку, вони часто розраховані на малий термін служби або, взагалі, на одноразове використання, що дозволяє підвищити електричні і магнітні навантаження та суттєво зменшити масу і габарити.

Широкого поширення в системах управління та автоматики в якості виконавчих двигунів знаходять асинхронні мікродвигуни (АМД) завдяки, насамперед, своїм високим технічним характеристикам і експлуатаційним параметрам, можливостям використання ряду методів регулювання частоти обертання, простоті конструкції, надзвичайно високій надійності в роботі, простоті обслуговування та низькій собівартості, [2,3].

Проте, існуючі методи проектування далеко не завжди, до апаратної реалізації, дозволяють достовірно визначити оптимальні параметри та оцінити реальні можливості двигунів системи управління на практиці. Оптимальне управління АМД можливе лише за умови використання сучасних програм об'єктно-орієнтованого віртуального моделювання. На даний час розроблені та застосовуються досить складні математичні моделі асинхронних двигунів, які всебічно враховують природу фізичних явищ, що відбуваються в них [4, 5]. Але суттєвий недолік таких моделей у методичному відношенні полягає в їх надмірній складності та труднощах сприйняття сенсу моделей, що містять в собі безліч параметрів.

Для пересічного фахівця, молодого науковця з СУА, а тим більше, для студента ВНЗ - майбутнього фахівця з систем управління, знайти та обчислити такі моделі для конкретного двигуна надзвичайно складно, оскільки в технічних характеристиках, що наводяться в довідниках, надаються тільки головні експлуатаційні параметри. З іншого боку, для більшості задач управління АМД можна застосовувати достатньо прості у сприйнятті принципи роботи та налаштуванні моделі, для використання яких цілком достатньо параметрів, які зазвичай наводяться в технічних характеристиках двигунів.

Виходячи з викладеного, зважаючи на актуальність теми матеріалу, важливість її ґрунтовного дослідження, засвоєння та практичного використання, насамперед, студентами ВНЗ, а також науковцями і промисловими фахівцями з СУА, авторами статті запропонована оригінальна розробка невитратного емулятора лабораторного стенду для глибокого вивчення та дослідження виконавчих асинхронних мікродвигунів без використання спеціалізованої високошвидкісної апаратури.

Мета роботи – розробка емулятора лабораторного стенду, спрямованого на вивчення та дослідження виконавчих АМД систем управління і автоматики.

Обґрунтованість створення віртуального стенду обумовлюється, насамперед, значною витратністю виготовлення реального лабораторного макету в умовах сьогодення, до того ж, застосування системи моделювання Matlab [6] створює для цього широкі можливості.

Поставлена мета досягається шляхом вирішення наступних задач:

- аналіза методів управління виконавчими АМД і оцінки особливостей роботи двигунів при різних режимах;
- аналіза математичних моделей АМД, вибору простої у сприйнятті принципу роботи та налаштуванні моделі;
- розробки алгоритму та програмного засобу для реалізації емулятора лабораторного стенду.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ АМД

Частота обертання ротора n_2 асинхронних двигунів, як відомо [2,3], визначається за формулою

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p} (1 - s).$$

Отже, регулювання частоти обертання ротора двигуна (n_2) може здійснюватися зміною ряду факторів впливу, а саме, зміною: частоти напруги, що подається на обмотку статора (f_1), кількості пар полюсів обмотки статора (p) та ковзання ротора (s). В свою чергу, вплив на ковзання можна здійснювати: зміною величини підведеної до обмотки статора напруги U_1 , порушенням симетрії цієї напруги U_1 та зміною активного опору в колі ротора [3,7,8].

Серед найбільш поширених, можна охарактеризувати в цілому декілька методів регулювання частоти обертання АМД.

Регулювання частоти обертання двигуна *зміною кількості пар полюсів* обмотки статора є дискретним методом, який дозволяє здійснювати лише ступеневу зміну швидкості обертання. При додаванні кожної наступної пари полюсів обмотки статора, швидкість обертання ротора зменшується вдвічі. Застосування даного методу регулювання виправдане збереженням ККД і коефіцієнта потужності при перемиканні. Але головними недоліками є збільшена і складна конструкція двигуна, підвищена його вартість, а також зазначена вище неможливість плавної зміни частоти обертання.

У разі регулювання частоти обертання ротора *зміною ковзання шляхом порушення симетрії напруги*, яка підводиться до обмотки статора, штучні характеристики двигуна знаходяться в зоні між характеристикою з симетричним трифазним живленням двигуна та характеристикою при однофазному режимі живлення, яка є межею асиметрії трифазної напруги. Але із збільшенням асиметрії напруги, зменшення швидкості двигуна супроводжується погіршенням ККД, до того ж діапазон регулювання швидкості незначний.

Регулювання частоти обертання *зміною додаткового опору* в колі фазного ротора ґрунтується на залежності ковзання від активного опору кола ротора, яка визначається формулою [3]:

$$s = \frac{m_1 I_2'^2 (r_2' + R_{\text{доо}})}{\omega_1 M}$$

Метод має істотні переваги в порівнянні з попередніми, а саме, суттєве покращення пускових властивостей двигуна та гнучкість регулювання в широкому діапазоні частот обертання, яка не призводить до зміни максимального (критичного) моменту. Але недоліки методу полягають у зниженні жорсткості механічних характеристик та низькій економічності внаслідок зростання електричних втрат пропорційно ковзанню, а отже і погіршення ККД системи. Регулювання частоти обертання можна здійснювати тільки на пониження від номінальної. Крім того, такий метод можливо застосовувати лише для двигунів з фазним ротором, які в малопотужних системах управління майже не використовуються.

При регулюванні частоти обертання зміною величини напруги на статорі, діапазон можливої зміни частоти обертання не достатньо великий через вузьку зону стійкості роботи двигуна, обмеженої критичним ковзанням і недопустимістю значного пониження напруги живлення відносно номінального значення через зниження навантажувальної властивості двигуна, що пов'язано з квадратичною залежністю максимального обертового моменту від напруги живлення: $M_{\text{max}} \sim U_1^2$ живл. Важливо також брати до уваги, що при підвищенні напруги живлення від номінального значення існує небезпека перегріву двигуна та виходу його з ладу через збільшення електричних і магнітних втрат.

Управління асинхронними двигунами зміною частоти в мережі живлення є найбільш економічним варіантом гнучкого регулювання частоти обертання в широкому діапазоні, без значних енерговитрат і зниження перевантажувальних можливостей двигуна. Метод дозволяє отримати механічні характеристики з високою жорсткістю, а регулювання швидкості не супроводжується збільшенням ковзання двигуна [3]. При зміні частоти в мережі живлення двигуна відбувається пропорційна зміна синхронної частоти обертання магнітного поля $n_1 \sim f_1$, та відповідно, швидкості обертання ротора. Для технічної реалізації такого методу необхідне джерело живлення двигуна з регульованою частотою струму f_1 . Важливо мати на увазі, що із зміною f_1 змінюється і максимальний момент двигуна. Для отримання високих енергетичних показників двигуна – коефіцієнтів потужності, корисної дії, перевантажувальної здатності - необхідно одночасно з частотою f_1 змінювати і напругу живлення U_1 . Характер одночасної зміни f_1 і U_1 визначається рівнянням:

$$U_1' / U_1 = (f_1' / f_1) \sqrt{M' / M},$$

де U_1 і M - напруга і електромагнітний момент при частоті f_1 ;

U_1' і M' - напруга і момент при частоті f_1' .

Отже, якщо регулювання частоти обертання двигуна відбувається за умови сталості навантажувального моменту, то підведену напругу змінюють пропорційно зміні частоти струму:

$$U_1' = U_1 f_1' / f_1.$$

Слід зазначити, що залежності між регульованими напругою і частотою з урахуванням впливу активного опору статора, зміни жорсткості механічних характеристик, насичення сталі, погіршення тепловіддачі на низьких частотах обертання ротора двигуна мають достатньо складний характер. Разом з тим, сучасні пристрої частотного управління дозволяють широко використовувати їх для індивідуального управління АМД. Таке регулювання дозволяє ефективно застосовувати виконавчі АМД за найскладніших умов, а інколи, воно є єдиною можливістю, зокрема, у вибухо- та пожежонебезпечних середовищах.

В багатьох випадках, коли виконавчі АМД працюють порівняно невеликий час на штучних характеристиках, витрати електроенергії будуть незначними, навіть при неекономічних способах регулювання. Тому більш раціональним є застосування простих і дешевих способів регулювання частоти обертання АМД, хоча і неекономічних з точки зору споживання енергії.

РОЗРОБКА ЕМУЛЯТОРА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ

Отже, як було з'ясовано, для більшості задач управління АМД можна задовільнитися простими моделями, при використанні яких цілком достатньо паспортних даних двигунів.

Проведений аналіз математичних моделей асинхронних двигунів показав, що для вирішення поставленої задачі, можна скористатися спрощеною модифікацією класичної формули Клосса [4,8]. Аналітичний опис моделі має вигляд :

$$M_{\text{п}} = 2M_{\text{к}} / (S_{\text{к}} / S_{\text{п}} + S_{\text{п}} / S_{\text{к}}),$$

де $M_{\text{к}}$, - критичне (максимальне) значення моменту, якому відповідає критичне ковзання $S_{\text{к}}$.

На основі обчислень обраної математичної моделі асинхронного двигуна було розроблено алгоритм та програмний засіб для реалізації емулятора лабораторного стенду, що дозволяє проводити дослідження характеристик виконавчих асинхронних мікродвигунів без використання спеціалізованої високошвидкісної апаратури. Завдяки зручному та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу емулятора користувач має можливість задавати параметри конкретного виконавчого АД, режими роботи та емулювати необхідні штучні характеристики двигунів, оцінюючи характер та динаміку змін параметрів при різних методах управління.

При розробці програми-емюлятора були враховані ключові принципи роботи асинхронних двигунів, сучасні методи розробки програмного забезпечення та візуального представлення даних.

Розроблена програма не потребує значних обчислювальних потужностей, запускається без застосування складного програмного забезпечення як на комп'ютері, так і на будь-якому сучасному смартфоні, а віртуальні характеристики максимально наближені до реальних.

В якості прикладу, в роботі наведені вибіркові результати дослідження найбільш ефективного та економічного способу регулювання швидкості обертання виконавчого АД шляхом зміни частоти напруги живлення. Масиви значень залежності швидкості обертання магнітного поля статора від моменту для частот 10, 30 та 50 Гц наведені у табл. 1, а їх програмна реалізація – на рис. 1.

Таблиця 1.

Залежність швидкості обертання від моменту

$f_1 = 10 \text{ Гц}$									
M, Нм	0	0,0257	0,5147	0,0772	0,1029	0,1287	0,1544	0,1801	0,2059
ω , рад/с	67,258	66,2344	65,1830	64,1317	63,0803	62,029	30,9777	59,9263	58,875
M, Нм	0,2316	0,2573	0,2831	0,3088	0,3345	0,3603	0,3860	0,4079	0,4412
ω	57,8237	56,7723	55,7209	54,6696	53,6183	52,5669	51,5163	51,025	48,2214
M, Нм	0,4689	0,4745	0,4783	0,48	0				
ω	35,0446	28,0357	19,625	14,0179	0,4745				
$f_1 = 30 \text{ Гц}$									
M, Нм	0	0,0259	0,0517	0,07755	0,0134	0,1293	0,1551	0,1809	0,2068
ω	187,8393	186,8498	185,8603	184,8708	183,8813	182,8918	181,9023	180,9128	179,9233
M, Нм	0,2326	0,2585	0,2843	0,3102	0,3360	0,3619	0,3877	0,4136	0,4522
ω	178,9339	177,9444	176,9549	175,9654	174,9759	173,9864	172,9969	172,0074	168,2143
M, Нм	0,4689	0,4772	0,48	0,4783	0,4689	0,4411	0,4245	0,4051	0,3912
ω	162,6071	154,1964	147,1875	130,3661	115,5071	86,9107	71,4910	50,4642	28,0357
M, Нм	0,3856	0							
ω	14,0178	0,3801							
$f_1 = 50 \text{ Гц}$									
M, Нм	0	0,02611	0,0522	0,0783	0,1044	0,1305	0,1566	0,1827	0,2089
ω	314	313,027	312,054	311,081	310,108	309,135	308,162	307,1889	306,2159
M, Нм	0,235	0,2611	0,2872	0,3133	0,3394	0,3655	0,3917	0,4178	0,4522
ω	305,2429	304,2699	303,2969	302,3239	301,3509	300,3779	299,4049	298,4319	293,8143
M, Нм	0,4661	0,4744	0,48	0,4783	0,4744	0,4661	0,4594	0,4411	0,4272
ω	287,3661	280,3571	271,9464	260,7321	252,3214	243,9107	236,9018	221,4821	210,2679
M, Нм	0,4134	0,3856	0,3579	0,3301	0,3024	0,2746	0,2497	0,2358	0,2247
ω	198,4929	173,8214	151,3929	128,9643	104,2929	77,0982	49,0625	28,0357	0

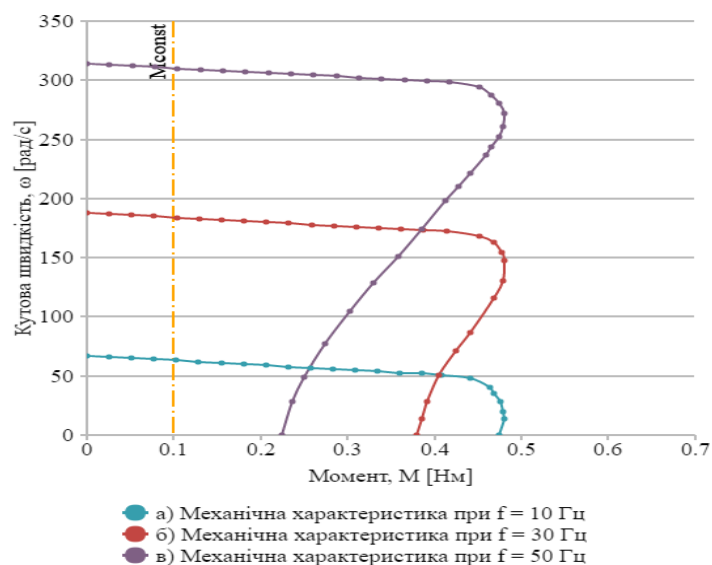


Рис. 1. Зведений графік залежності швидкості обертання магнітного поля статора від моменту при частотному регулюванні,

ВИСНОВКИ

В сучасних системах управління та автоматики широкого застосування знаходять асинхронні двигуни. Зважаючи на актуальність теми та важливість ґрунтовного аналізу матеріалу, насамперед, для студентів ВНЗ, а також для молодих науковців і фахівців промисловості, авторами статті була запропонована оригінальна розробка невитратного емулятора лабораторного стенду, алгоритму і програмного засобу для глибокого вивчення та дослідження виконавчих асинхронних мікродвигунів при різних способах регулювання частоти обертання без використання спеціалізованої високовартісної апаратури.

Створенню емулятора передували ряд необхідних і важливих етапів, а саме: аналіз математичних моделей АМД та методів управління двигунами; вибір та обчислення математичної моделі, для використання якої цілком достатньо параметрів, що наводяться в паспортних даних двигунів; розробка алгоритму та програмного засобу для реалізації емулятора.

При розробці стенду були враховані ключові принципи роботи асинхронних двигунів, сучасні методи розробки програмного забезпечення та інтерфейсу користувача, візуального представлення даних.

Завдяки зручному та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу емулятора користувач має можливість задавати параметри конкретного виконавчого АМД, режими його роботи та емулювати необхідні штучні характеристики двигунів, оцінюючи характер та динаміку змін параметрів при різних методах регулювання.

Обґрунтованість створення емулятора, насамперед, обумовлюється значною витратністю виготовлення реального лабораторного макету в умовах сьогодення. До того ж, застосування системи моделювання Matlab в створенні віртуального стенду надає широкі можливості.

Розроблені віртуальні програми для дослідження характеристик АМД не потребують значних обчислювальних потужностей та запускаються без використання складного програмного забезпечення як на комп'ютері, так і на будь-якому сучасному смартфоні.

Отримані практичні результати підтверджують реальну ефективність запропонованого підходу до всебічного дослідження виконавчих асинхронних мікродвигунів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Барало О. В. Автоматизація технологічних процесів і систем автоматичного керування Навчальний посібник. – Київ: «Аграрна Освіта», 2010. – 506 с.
2. Мілих В.І., Іваненко В.М. Дослідження асинхронних двигунів // - Навчальний посібник, - Друкарня НТУ «ХПІ» - Харків, 2007. – 154 с.
3. Вдовин С.С. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей – 3-е изд.,

- перераб. и доп. – М.: Энергия. Москва. Отделение, 2008. – 96 с.
4. Федосов Б.Т. Пособие по курсовому и дипломному проектированию на тему: Идентификация объектов управления. Примеры моделей технических объектов управления. Асинхронный двигатель. – Режим доступа: <http://model.exponenta.ru/bt/>.
 5. ИНТЕХНИКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intechnics.ru/article16.htm>.
 6. Dovidkam [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dovidkam.com/remont/elektrika/regulyuvannya-oborotiv-asinxronnogo-dvigunaso%D1%97mi-rukami-sxema-video.html>.
 7. Васюра А.С. Електромашинні пристрої систем управління і автоматики, ч. 1 і 2. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 271 с.
 8. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: Лабораторные работы на ПК. – СПб.: Корона принт, 2003. — 256 с.
 9. Комп'ютерна програма «Лабораторний стенд для дослідження механічних характеристик виконавчих асинхронних двигунів», Авторське право на твір, Слободян Р. В., Васюра А.С.

REFERENCES

1. Baralo O. V. Avtomatyzatsiya tekhnolohichnykh protsesiv i system avtomatychnoho keruvannya Navchal'nyy posibnyk. – Kyiv: «Ahrarna Osvita», 2010. – 506 s.
2. Milykh V.I., Ivanenko V.M. Doslidzhennya asynkhronnykh dvyhuniv // - Navchal'nyy posibnyk, - Drukarnya NTU «KHPI» - Kharkiv, 2007. – 154 s.
3. Vdovyn S.S. Rehulyrovanye chastoty vrashchenyya asynkhronnykh dvyhateley – 3-e yzd., pererab. y dop. – М.: Énerhyya. Moskva. Otdelenye, 2008. – 96 s.
4. Fedosov B.T. Posobye po kursovomu y dyplomnomu proektyrovanyyu na temu: Ydentyfykatsyya ob'ektov upravlenyya. Prymery modeley tekhnicheskyykh ob'ektov upravlenyya. Asynkhronnyy dvyhatel'. – Rezhym dostupu: <http://model.exponenta.ru/bt/>.
5. YNTEKHNYKS [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://www.intechnics.ru/article16.htm>.
6. Dovidkam [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://dovidkam.com/remont/elektrika/regulyuvannya-oborotiv-asinxronnogo-dvigunaso%D1%97mi-rukami-sxema-video.html>.
7. Vasyura A.S. Elektromashynni prystroyi system upravlinnya i avtomatyky, ch. 1 i 2. Navchal'nyy posibnyk. – Vinnytsya: VNTU, 2013. – 271 s.
8. Herman-Halkyn S.H., Kardonov H.A. Élektrycheskye mashyny: Laboratornye raboty na PK. – SPb.: Korona prynt, 2003. — 256 s.
9. Komp'yuterna prohrama «Laboratornyy stend dlya doslidzhennya mekhanichnykh kharakterystyk vykonavchykh asynkhronnykh dvyhuniv», Avtors'ke pravo na tvir, Slobodyan R. V., Vasyura A.S.

Надійшла до редакції 12.09.2017 р.

СЛОБОДЯН РОМАН ВІТАЛІЙОВИЧ – магістрант ФКСА, кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

ВАСЮРА АНАТОЛІЙ СТЕПАНОВИЧ – професор, кафедра автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.