

ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0002-7034-8702](https://orcid.org/0000-0002-7034-8702)e-mail: kostyakst@ukr.net**СТЕЦЬОК ВІКТОР**

Хмельницький національний університет

e-mail: sv_rt@i.ua**ГОРЯЩЕНКО СЕРГІЙ**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0000-0001-6623-2523](https://orcid.org/0000-0001-6623-2523)e-mail: tn7@ukr.net**ЛИСИЙ АНДРІЙ**

Хмельницький національний університет

ORCID ID: [0009-0001-0065-9740](https://orcid.org/0009-0001-0065-9740)e-mail: Andrii.lysyi1@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Анотація - Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) відомі давно. В Україні цей тип двигунів використовується недостатньо широко. Синхронні двигуни потребують менше енергії для забезпечення достатньої продуктивності, ніж добре відомі асинхронні двигуни. Показано, якого обладнання потребують синхронні двигуни для забезпечення плавного пуску, руху та зупинки ротора.

Наразі відомі три схеми керування двигунами: вольт-частотне (VF), бездатчикове векторне керування (SVC) та векторне керування (VC). Але тільки керування еncoderом при VC-керуванні забезпечує адекватний запуск синхронного двигуна. PMSM дозволяють архівувати постійне збільшення швидкості, швидко реагувати на навантаження ротора. Вихідний крутний момент PMSM автоматично регулюється напругою і струмом живлення при стабільних обертах.

У статті наведено результати порівняння існуючого двигуна PMSM з еncoderом з використанням драйвера векторного керування та віртуальної моделі PMSM зі змінним навантаженням.

Ключові слова -- синхронний двигун, керування, еncoder, векторне керування

HORIASHCHENKO KOSTYANTYN, STETSUK VIKTOR, HORIASHCHENKO SERHIY, LYSYI ANDRIY
Khmelnyskyi National University

MODELLING AND TESTING OF SYNCHRONOUS MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS

Permanent magnet synchronous motors (PMSM) have been known for a long time. In Ukraine, this type of motors is not used widely enough. Synchronous motors require less energy to provide sufficient performance than the well-known induction motor. It shows what PMSM require control equipment to ensure smooth rotor start, motion and stop.

Three schemes like Volt-Frequency (VF), Sensorless Vector Control (SVC) and Vector Control (VC) to control motors are currently known. But only the control of the encoder at VC control type ensures an adequate start of the synchronous motor. PMSM allow you to archive a constant increase in speed, a quick response to the rotor load. The output torque of the PMSM is automatically regulated by the supply voltage and current with stable rotations.

The article shows results of comparing existing PMSM motor with an encoder with use of Vector Control Driver and virtual model of PMSM with a variable load. In the mathematical model of a synchronous motor, the equation of the stator of an asynchronous motor is used, which takes into account the interaction with the rotor through the magnetic flux. The position of the rotor magnets is determined by the rotor design itself, regardless of the stator voltages and currents. The instantaneous value of the induced electromotive force (EMF) is also determined, which makes it possible to determine the stator currents and the rotor torque.

Permanent Magnet Synchronous Motors (PMSMs) are widely used in machinery such as elevators, shredders, and conveyors due to their ability to "hold position" when the motor brakes are off, with the load supported solely by the PMSM motor itself. The high-speed response of the frequency converter together with the control system ensures a constant rate of increase in the motor speed regardless of load changes. Thus, the synchronous motor maintains stable mechanical characteristics regardless of changes in load and rotation frequency. At the same time, the motor voltage and current are dynamically adjusted to ensure the desired output performance

Keywords — synchronous motor, control, encoder, vector control

Вступ

Зростаюча увага до захисту навколишнього середовища, енергозбереження та раціонального використання ресурсів у всьому світі призвела до посилення уваги до екологічності не лише промислового обладнання, а й побутових приладів. Очевидно, що побутові прилади демонструють значно нижчі показники енергоспоживання. Однак широке використання побутових приладів зумовлює необхідність всебічного аналізу в цій сфері. За різними оцінками, на побутову техніку припадає до 40% всієї енергії, що генерується різними технічними засобами.

Поява систем автономного енергоспоживання, що використовують такі джерела, як сонячна, вітрова або гідроелектроенергія, зумовлює необхідність зменшення потужності обладнання при збереженні того ж рівня функціональності. Одним із значних споживачів енергії в побутовій техніці є двигун.

Асинхронні двигуни, які зазвичай використовуються, не мають інтелектуальних систем керування, і

мають такі механічні характеристики, як:

1. Високий механічний крутний момент на роторі двигуна, навіть на низьких швидкостях.
2. Висока щільність потужності на одиницю об'єму двигуна.

Тому для задоволення експлуатаційних вимог побутової техніки використовуються як однофазні, так і трифазні двигуни. Нижче наведено приклади класичних і сучасних типів двигунів, що використовуються в цих приладах:

Класичні двигуни включають в себе:

- Однофазні асинхронні двигуни.
- Однофазні універсальні двигуни.

Сучасні двигуни в тому числі:

- Трифазні асинхронні двигуни.
- Трифазні синхронні двигуни.

У синхронних двигунах можна досягти широкого діапазону зміни швидкості. Здатність змінювати швидкість обертання ротора має важливе значення для сучасних побутових приладів, таких як холодильники, пральні машини, міксери та різноманітні конвеєри. Ці пристрої зазвичай вимагають низьких швидкостей обертання і високого крутного моменту під час запуску і роботи.

Особливістю таких двигунів є високе механічне тягове зусилля на нульовій швидкості або в режимі утримання ротора. Крім того, ці двигуни демонструють постійну вихідну потужність у широкому діапазоні швидкостей. Тому синхронний двигун з постійними магнітами повинен не тільки працювати на номінальній швидкості, але й забезпечувати постійну потужність на більш високих швидкостях.

Для досягнення векторного керування синхронними двигунами необхідна інформація про положення ротора. Залежно від бажаної роздільної здатності використовуються різні методи. Рішення з низькою роздільною здатністю можуть використовувати енкодер положення, рішення з середньою роздільною здатністю - резольвер або датчики на основі ефекту Холла, а рішення з високою роздільною здатністю, як правило, покладаються на оптичні датчики.

На рисунку 1 показано оптичний енкодер з 1024 імпульсами на оборот.



Рис. 1. Інкrementний енкодер компанії FENAC, Туреччина

У цій технології датчик обертання встановлюється безпосередньо на ротор без необхідності використання додаткових передавальних елементів. При цьому потужність передається безпосередньо на робочий пристрій. Ця концепція, відома як "прямий привід", забезпечує швидку динамічну реакцію, зменшення акустичного шуму, зниження рівня вібрації та значне зниження енергоспоживання. Ці покращення сприяють значному збільшенню часу роботи системи.

Технічні засоби, що використовуються для визначення положення ротора в цих системах, дозволяють досягти високопродуктивних результатів. Трифазні контролери з електронним керуванням відіграють вирішальну роль у досягненні високих показників ефективності.

Основна частина

Серед синхронних двигунів синхронний двигун з постійними магнітами - єдиний варіант, який відноситься до категорії трифазних машин. Статор такого двигуна складається з традиційних трифазних обмоток. У роторі синхронного двигуна з постійними магнітами постійні магніти виконують ту ж функцію, що і в звичайній синхронній машині. Розробка нових магнітних матеріалів, включаючи використання рідкоземельних матеріалів, дозволила створити ці постійні магніти.

Синхронний двигун з постійними магнітами (див. рис. 2) має ряд переваг для розробки сучасних систем керування рухом, таких як [5]:

1. Зменшена вага.
2. Компактний розмір.
3. Усунення масла, що призводить до скорочення часу на технічне обслуговування.

4. Низька швидкість обертання ротора (наприклад, 120 об/хв для швидкості автомобіля 1 м/с).
5. Високий крутний момент.
6. Здатність до рекуперації енергії, що дозволяє відновлювати до 30% енергії.
7. Здатність утримувати автомобіль на нульовій швидкості з меншим виділенням тепла в порівнянні з асинхронними двигунами.



Рис. 2. Модель двигуна CLS6-A компанії CLINDAS, Туреччина

Дійсно, використання постійних магнітів в синхронних двигунах з постійними магнітами дозволяє генерувати потужний магнітний потік в повітряному зазорі між ротором і статором, що призводить до високоефективної роботи двигуна.

Наприкінці 1960-х років для асинхронних двигунів було впроваджено векторне керування (також відоме як керування по полю або FC), що дозволило швидко реагувати на тягове зусилля, порівнянне з машинами постійного струму [2]. З часом методи керування набули широкого застосування і використовувалися в багатьох сферах аж до кінця 2018 року.

У синхронному двигуні швидкість обертання визначається швидкістю поля статора, відомою як синхронна швидкість. Синхронна швидкість (ω_s) визначається частотою живлення статора (f_s) і кількістю пар полюсів (p). Зазвичай обмотки статора трифазної синхронної машини з'єднані за синусоїдальним законом розподілу (див. рис. 3).

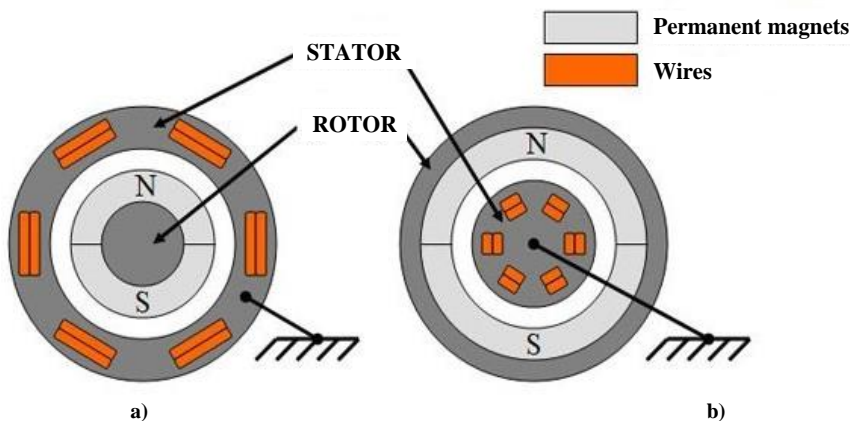


Рис. 3. Магніти в синхронних двигунах [6].

Коли на ротор двигуна подається трифазна напруга живлення, генерується обертове магнітне поле, яке обертається в певному напрямку в залежності від послідовності входних фаз. Передбачається, що магнітне поле також розподіляється за синусоїдальним законом розподілу.

Швидкість обертання двигуна, позначена як N (синхронна швидкість), визначається рівнянням (1), яке пов'язує синхронну швидкість з частотою живлення статора і кількістю пар полюсів:

$$N = \frac{120 f_s}{p} \tag{1}$$

де N - синхронна швидкість в обертах за хвилину (об/хв).
 f_s - частота живлення статора в герцах (Гц).

p - кількість пар полюсів у двигуні.

Це рівняння дозволяє розрахувати синхронну швидкість на основі частоти живлення статора і кількості пар полюсів.

Проблеми пуску синхронних двигунів

Синхронні двигуни можуть зіткнутися з певними проблемами під час процесу запуску. Ось деякі поширені проблеми, пов'язані із запуском синхронних двигунів:

Високий пусковий струм: Синхронні двигуни зазвичай споживають високий пусковий струм, що може спричинити падіння напруги та вплинути на стабільність електричної системи. Високий пусковий струм може викликати занепокоєння, особливо в тих випадках, коли одночасно запускаються декілька синхронних двигунів.

Відсутність можливості самозапуску: На відміну від асинхронних двигунів, синхронні двигуни не мають можливості самозапуску. Потрібні зовнішні засоби, щоб вивести двигун на синхронну швидкість, перш ніж він почне працювати синхронно із заданою частотою.

Початкове збудження: Синхронні двигуни потребують початкового збудження магнітного поля ротора перед запуском. Це може бути досягнуто за допомогою зовнішнього джерела постійного струму або допоміжної обмотки, відомої як "демпферна обмотка" [4] для створення початкового магнітного поля.

Для подолання цих проблем застосовуються такі методи запуску, як використання поні-двигунів, запуск за допомогою зовнішніх приводів або використання спеціалізованого пускового обладнання, такого як пускачі синхронних двигунів або статичні перетворювачі частоти.

У випадку синхронного двигуна з постійними магнітами однією з фундаментальних проблем є початок руху з невідомого положення. Початок руху з невідомого положення може призвести до тимчасового зворотного руху ротора, поки поля ротора і статора не вирівнюються.

Ця проблема стає критичною зі збільшенням потужності двигуна і може призвести до пошкодження двигуна або проблем з пусковими струмами. Такі умови неприйнятні для багатьох застосувань. Наприклад, у сценаріях, де синхронні двигуни використовуються з навантаженням на первинний ротор, наприклад, у кухонних ліфтах, це може призвести до пошкодження не тільки двигуна, але й усього механізму, включаючи вантаж.

Математична модель синхронного двигуна

У математичній моделі синхронного двигуна використовується рівняння статора асинхронного двигуна, що враховує взаємодію з ротором через магнітний потік. Положення магнітів ротора визначається самою конструкцією ротора, незалежно від напруг і струмів статора. Також визначається миттєве значення індукованої електрорушійної сили (ЕРС), що дозволяє визначити струми статора і крутний момент ротора.

Однак на цьому аналогія з асинхронним двигуном закінчується. У синхронному двигуні магнітні потоки ротора не є незалежними, а визначаються у взаємодії з напругами і струмами статора. При розгляді систем відліку ротора це означає, що еквівалентні площини q і d трансформуються у відповідні системи відліку, які індують обертання і визначають швидкість ротора.

У синхронному двигуні різниця між магнітними полями ротора і статора прагне до нуля, тому двигун називається синхронним. В результаті площини q і d ротора і площини q і d статора мають фіксований фазовий зсув відносно одна одної.

Рівняння, що зв'язують магнітні потоки, мають вигляд [1]:

$$v_{qs}^r = R_q i_{qs}^r + p \lambda_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (2)$$

$$v_{ds}^r = R_d i_{ds}^r + p \lambda_{ds}^r - \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (3)$$

де R_q та R_d - опори квадратурної площини та площини прямої осі гілок.

Тут і далі використовується опір R_s , а для площин q і d магнітний потік статора пов'язаний з потоком ротора рівняннями [1]:

$$\lambda_{qs}^r = L_s i_{qs}^r + L_m i_{qs}^r \quad (4)$$

$$\lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r + L_m i_{ds}^r \quad (5)$$

Однак самоіндукція статора в областях q і d дорівнює L_s тільки тоді, коли магніти ротора мають електричний кут 180° . Це важливо, коли магнітні та міжполюсні осі відрізняються.

Коли положення обмоток статора (наприклад, площина d) збігається з магнітним полем ротора, сила відштовхування максимальна: магнітне відштовхування магніту майже таке ж, як і відштовхування через повітряний зазор. І тому індуктивність в цей час найменша.

Тоді за індуктивність приймається індуктивність прямої площини L_d . В цей час площина q обмоток спрямована до траєкторії інтерполяції ротора, магнітний потік не визначається магнітами, тому що він знаходиться в точці мінімального рівня потоку. Тому відштовхування мінімальне, а індуктивність максимальна. Індуктивність q площини відома як L_q .

Оскільки магніти ротора і напрямки обмоток статора q і d визначені в просторі, то індуктивність істотно не змінюється в залежності від положення ротора. Тоді для розрахунку потоку втрат статора в площинах q і d потрібні струми ротора і статора.

Збудження в постійних магнітах можна змоделювати, припускаючи постійний струм джерела, i_{fr} . Потік ротора розміщений в площині d , тому струм ротора в площині d дорівнює i_{fr} . Струм в площині q

приймається рівним нулю, припускаючи, що в цій площині немає потоку. Тоді потоки можна описати як:

$$\lambda_{qs}^r = L_q i_{qs}^r \quad (6)$$

$$\lambda_{ds}^r = L_d i_{ds}^r + L_m i_{fr}^r \quad (7)$$

де L_m - взаємна індукція між обмотками статора і магнітами ротора.

Підстановка цих виразів у вирази для напруги статора дає наступні вирази:

$$\begin{pmatrix} v_{qs}^r \\ v_{ds}^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_q + L_q p & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_d + L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs}^r \\ i_{ds}^r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_r L_m i_{fr}^r \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Електромагнітний момент визначається як:

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r) \quad (9)$$

яка, використовуючи підстановку потоків в термінах індуктивності та струму, буде такою:

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{af} i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{qs}^r i_{ds}^r) \quad (10)$$

тут потік втрат ротора буде мати вигляд

$$\lambda_{af} = L_m i_{fr} \quad (11)$$

Результати моделювання для синхронного двигуна потужністю 1кВт показано на рис.4.

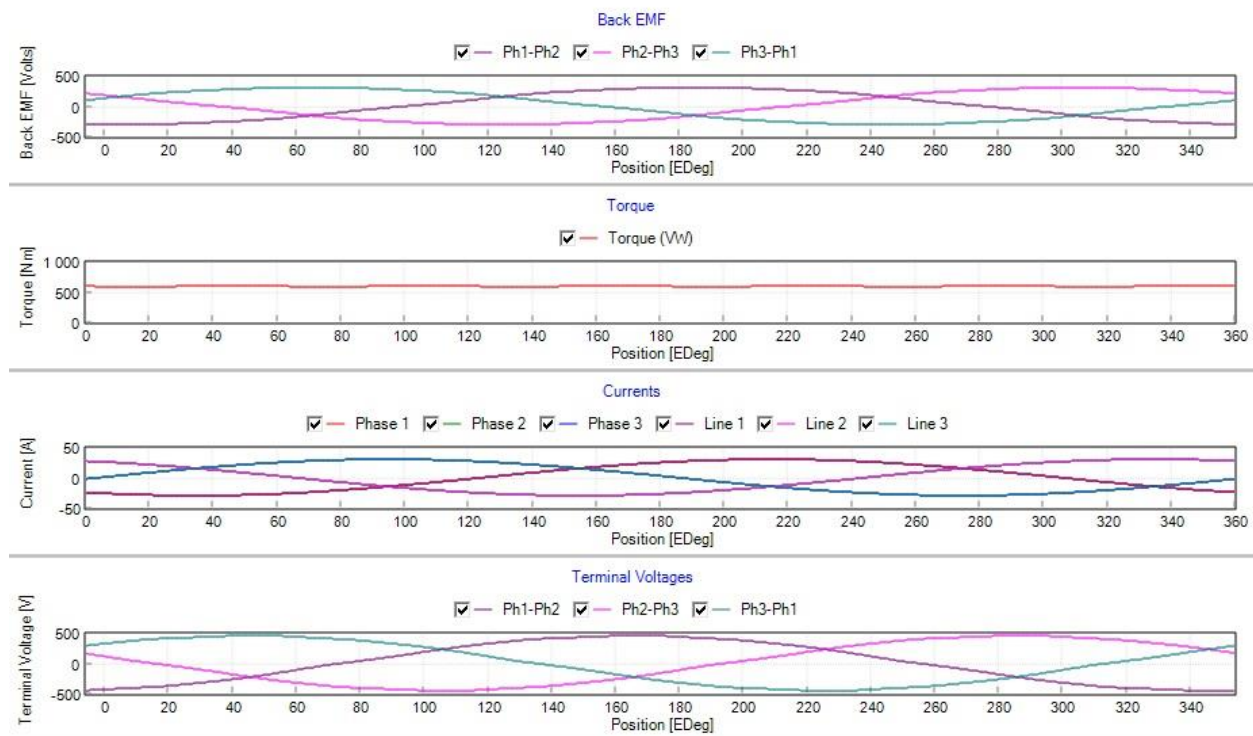


Рис. 4. Графіки втрат, моменту, струмів та напруги змодельованого двигуна

Висновки

Двигуни, що використовуються в цьому дослідженні, відносяться саме до промислових двигунів. Синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) широко застосовуються в таких механізмах, як ліфти, подрібнювачі, конвеєра, завдяки їх здатності "утримувати положення", коли гальма двигуна вимкнені, при цьому навантаження підтримується виключно самим двигуном PMSM. Високошвидкісна реакція перетворювача частоти разом із системою керування забезпечує постійну швидкість збільшення частоти обертання двигуна незалежно від зміни навантаження. Таким чином, синхронний двигун підтримує стабільні механічні характеристики незалежно від зміни навантаження і частоти обертання. Одночасно напруга і струм двигуна динамічно регулюються для забезпечення бажаних вихідних показників.

Література

1. Шахат Е.І. Універсальна система приводу синхронного двигуна з асинхронним двигуном для автомобільних застосувань / Факультет електротехніки та комп'ютерної інженерії, Університет штату Огайо, США, JES 2010 on-line: journal.esrgroups.org/jes

2. Канакарадж, Дж. Теорія електричних машин і приладів / публікація в рамках програми уряду Тамілнаду з розповсюдження безкоштовних підручників, Корпорація підручників Тамілнаду, Коледж Роуд, Ченнаї - 600 006, (2011).

3. Мусял Януш. Діагностика багаточастотних структур і композитних деталей методом багаточастотного фазового детектування / Януш Мусял, Сергій Горященко, Костянтин Горященко та Йоанна Вільчарська // MATEC Web of Conferences 332, 01020 (2021) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133201020>

4. Мусял Януш. Моделювання діагностики технічного стану кабельних ліній та систем електропостачання/ Януш Мусял, Костянтин Горященко, Сергій Горященко та Роберт Поласік// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202135101008>

5. Мусял Януш. Автоматичний діагностичний пристрій з вимірюванням відстаней до пошкоджень комбінованим імпульсно-фазовим методом/ Януш Мусял, Костянтин Горященко, Сергій Горященко Микола Шица// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202135101010>

References

1. E.I. Shakhat, A. "Universalna systema pryvodu synkhronnoho dvyhuna z asynkhronnym dvyhunom dlia avtomobilnykh zastosovan". Fakultet elektrotekhniki ta kompiuternoi inzhenerii, Universytet shtatu Ohaio, SShA, JES 2010 on-line: journal.esrgroups.org/jes

2. Kanakaradh, Dzh.: Teoriia elektrychnykh mashyn i prykladiv, publikatsiia v ramkakh prohramy uriadu Tamilnadu z rozpovsiudzhennia bezkoshtovnykh pidruchnykiv, Korporatsiia pidruchnykiv Tamilnadu, Koledzh Roud, Chennai - 600 006, (2011).

3. Diahnostyka bahatosharovykh struktur i kompozytnykh detalei metodom bahatoshatotnoho fazovoho detektuvannia / Yanush Musial, Serhiy Horiashchenko, Kostiantyn Horiashchenko ta Yoanna Vilcharska // MATEC Web of Conferences 332, 01020 (2021) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133201020>

4. Modeliuvannia diahnostryky tekhnichnoho stanu kabelnykh liniy ta system elektropostachannia/ Yanush Musial, Kostiantyn Horiashchenko, Serhiy Horiashchenko ta Robert Polasik// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202135101008>

5. Avtomatychnyi diahnostychnyi prystrii z vymiriuvanniam vidstanei do poshkodzhen kombinovanyim impulsno-fazovym metodom/ Yanush Musial, Kostiantyn Horiashchenko, Serhiy Horiashchenko ta Mykola Shytsa// MATEC Web of Conferences 351, 01008 (2021) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202135101010>