

С.Л. ГОРЯЩЕНКО, К.Л. ГОРЯЩЕНКО, Е.Ю. ВЖЕЩ
Хмельницький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СИНХРОННОГО ДВИГУНА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Синхронний двигун знайшов своє застосування в системах керування та різноманітних двигунах. Проте, двигун на постійних магнітах недостатньо описаний в сучасній літературі. В роботі представлено аналіз роботи моделі синхронного двигуна на постійних магнітах та його системи керування.

Ключові слова: синхронний двигун, Matlab, Simulink.

S.L. HORIASHCHENKO, K.L. HORIASHCHENKO, E.U. VJESCH
Khmelnitsky National University

MODEL OF SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS IN MATLAB

Motors utilize a lot of power in the whole world. Reducing of power consumption required not only for high-power motors like for factory's motors. On other side low-power motors are very common for personal use. Main types of home-type motors are asynchronous.

Synchronous motor with permanent magnets (PMSM) is known long time. In Ukraine this type of motor does not used wide enough. Synchronous motors require less power to provide enough work as well known asynchronous motor. It is shown what PMSM require control hardware to provide rotor soft start, movement and stop. Three control schemas known for now. But only encoder control gives adequate start of synchronous motor. In article it is shown model of control with encoder with variable load. PMSM allow to archive constant speed rise, fast reaction of rotor load. Output torque of PMSM automatically adjusted with supply voltage and current with stable rotations.

In article it is shown

Keywords: synchronous motor, control, encoder.

Вступ

Зростання у всьому світі уваги до захисту навколишнього середовища, збереження енергії та інших видів ресурсів призвело до зростання уваги екологічності не тільки промислового обладнання, а також і домашнього обладнання. Зрозуміло, що домашні пристрої володіють значно меншими енергетичними показниками. Проте широке розповсюдження побутової техніки вимагає інтенсивного аналізу в цій області. Частка енергоспоживання побутового обладнання складає за різними оцінками до 40% від сукупної потужності, що виробляється різними технічними засобами.

Розвиток систем автономного енергоспоживання за рахунок таких джерел, як сонячна енергія, енергія вітру або гідроелектроенергетика ставить необхідним зменшення потужності обладнання при збереженні такого ж рівня корисних властивостей. Одним з найбільших споживачів енергії в побутових приладах є двигун. В широко розповсюджених асинхронних двигунах не використовується інтелектуальні системи керування, а також є недосяжними механічних показники, такі як:

- 1) високі механічний момент на роторі двигуна, в тому числі на низьких обертах;
- 2) висока щільність потужності на об'єм двигуна.

В синхронних двигунах досяжна зміна швидкості у широких межах.

Змінна швидкість обертання використовується в сучасних побутових пристроях, таких як холодильники та пральні машини, в різноманітних міксерях. В цих пристроях характерні низькі швидкості обертання та високий момент під час старту та початку роботи. Техніки виявлення позиції ротору для цих систем дозволяють отримати високі показники працездатності. Електронні керовані трифазні контролери забезпечують досягнення високих показників ефективності.

Вперше у кінці 1960-х років було представлено векторне керування (або так зване керування полем) для асинхронних двигунів. Застосування цієї новітньої технології дозволило отримати швидкий відгук в тяговому зусиллі, яке порівняне з машинами постійного струму. На кінець 2018 року техніки керування отримали широке застосування та стали широко застосовуваними у великій кількості рішень.

Для векторного керування синхронних машин потрібна інформація щодо позиції ротора. Зазвичай позиція ротору визначається позиційним енкодером, резольвером або сенсорами на ефекті Хола. За цією технологією датчик обертання встановлено безпосередньо на роторі без додаткових елементів передачі обертів. Одночасно з цим потужність передається безпосередньо на робочий пристрій. В результаті така концепція дозволила отримати швидкий динамічний відгук за тягою та одночасно зменшити акустичний шум, зменшити рівень вібрації, а також досягти суттєвого зменшення споживаної потужності, що призвело до суттєвого зростання часу роботи системи.

До особливостей таких систем слід віднести високе значення механічної тяги при нульовій швидкості або "утримання" ротору. Також особливою властивістю є постійна потужність при широкій зміні діапазону швидкостей. А тому синхронний двигун на постійних магнітах має працювати не тільки на номінальній швидкості, а також забезпечувати сталу потужність і на більших швидкостях.

Основна частина

Отже, для забезпечення параметрів роботи побутової техніки використовуються як однофазні, так і трифазні двигуни.

До класичних двигунів відносяться:

- однофазні асинхронні двигуни;
- однофазні універсальні двигуни.

До сучасних двигунів відносяться:

- трифазні асинхронні двигуни;
- трифазні синхронні двигуни.

Серед синхронних двигунів, синхронний двигун на постійних магнітах є єдиним варіантом трифазної машини. Статор такого двигуна має класичні трифазні обмотки. В роторі синхронного двигуна постійні магніти виконують таку ж саму дію, як і в класичній синхронній машині. Їх створення стало можливим за рахунок створення нових магнітних матеріалів, в тому числі із застосуванням рідкоземельних матеріалів.

Синхронний двигун на постійних магнітах володіє цілим рядом переваг для створення сучасної системи керування рухом. Використання постійних магнітів для створення потужного магнітного потоку в повітряному зазорі між ротором та статором дозволяє отримати високоефективний синхронний двигун на постійних магнітах.

Як відомо, в синхронному двигуні швидкість обертання визначається швидкістю обертання поля статора, яка називається синхронна швидкість. Синхронна швидкість ω_s визначається частотою живлення статора f_s , та кількістю полюсних пар p . Статор трифазної синхронної машини має зазвичай обмотки за синусоїдальним законом розподілу.

Коли ротор двигуна збуджується трифазною напругою живлення, виникає магнітне поле, що обертається в одну або іншу сторону залежно від порядку вхідних фаз. Приймається, що магнітне поле також розподілено за синусоїдальним законом розподілу.

Швидкість обертання N (синхронна швидкість) визначається (1).

$$N = \frac{120f_s}{P}, \quad (1)$$

де f_s – частота змінної напруги, Гц;
 P – кількість полюсів;

Проблеми запуску синхронного двигуна

У випадку синхронного двигуна на постійних магнітах, одна з принципових проблем – початок руху з невідомої позиції. Початок руху за невідомої позиції ротору може призвести до певного оберненого руху ротору до моменту співпадіння полів ротору та статора. Зі зростанням потужності двигуна це може призвести навіть до пошкодження двигуна або до проблем з стартовими струмами. Такий стан є неприйнятним для багатьох випадків застосування. Так, якщо синхронний двигун використовується за умов первинного навантаження на ротор, наприклад для кухонних ліфтів, це може призвести до пошкодження не тільки двигуна, але й механізму в цілому, не кажучи за пошкодження вантажу.

Тому, коли початкове положення ротору є недоступним перед початком обертання, завжди слід використати певну процедуру запуску для досягнення безпечного початкового обертання. В літературі виділяють такі можливі процедури початку руху, як:

- початок руху за умов відомого стартового положення ротору (керування з оберненим зв'язком);
- керування за простим принципом "напруга-частота"; (керування без оберненого зв'язку);
- визначення положення ротору за певним алгоритмом.

Перший метод керування є найбільш зручним з точки зору забезпечення точності та швидкості визначення позиції магнітного поля в просторі. Це може бути досягнуто використанням зворотного зв'язку для виявлення позиції валу ротору для контролера керування поля. Проте надійність цього методу може бути недостатня за наявності навантаження на валу ротора. Синхронний двигун з двополюсним статором має рівну кількість обертів дроту на фазу. Потік магнітного поля ротора можна прийняти сконцентрованим по d -вісі, поки по вісі q потік буде нульовим. Такий стан також є у індукційних двигунів з непрямым векторним керуванням. Також приймається відсутність втрат. Також приймається постійність потоку поля ротора у визначеній точці простору. Змінність температури ротора впливає на магнітний потік, але в довготривалому інтервалі приймається як несуттєва. Немає необхідності використовувати рівняння напруги на роторі як для індукційного двигуна, оскільки джерело магнітного поля є магніти ротора, а отже й коливання потоку у довготривалому інтервалі є несуттєвими.

Математична модель синхронного двигуна

В моделі синхронного двигуна використано рівняння статора індукційного двигуна та взаємодія з ротором через магнітний потік. Позиція магнітів ротору визначена конструкцією самого ротора, причому незалежно від напруг та струму статора. Визначеним є також миттєве значення наведеної ЕРС, а отже стають відомими струми статора та момент сили ротора. Проте тут аналогія з асинхронним двигуном завершується. Потоки магнітного поля ротора не є незалежними. Вони визначаються у взаємодії з напругами та струмами статора. Коли розглядаються опорні площі ротора, це означає, що еквівалент



Рис. 1. Інкрементний енкодер

площин q та d перетворюються на відповідні опорні площі, що призводять до обертання та визначають швидкість обертання ротору. В синхронному двигуні різниця між магнітним полем ротора та статора є нульовою. Саме тому двигун і отримав свою назву – синхронний. Відповідно площі q та d ротора та площі q та d статора мають фіксований фазовий зсув один до одного.

Рівняння, що пов'язують магнітні потоки:

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

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

де R_q та R_d – опори квадратурної площини (quadrature) та прямої (direct-axis) площини витків статора.

Тут та далі використовується опір R_s , а для q та d площин магнітний потік статора зв'язаний з потоком ротора рівняннями:

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

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

Проте самоіндукція статора в площинах q та d дорівнює L_s тільки коли магніти ротора мають електричний кут у 180° . Це має значення, коли вісі магніту та міжполярні вісі є різними. Коли положення обмоток статора (наприклад, d площина) у співрозміщенні з полем магніту ротора, сила відштовхування є максимальною: магнітне відштовхування магніту є майже таким, що і відштовхування через повітряний зазор. А тому індуктивність є найменшою в цей час. Тоді індуктивність приймається як індуктивність прямої площини L_d . В цей час площина q обмоток направлена на міжполярний шлях ротора, магнітний потік не визначається магнітами, оскільки знаходиться в точці мінімального рівня потоку. Тому відштовхування є мінімальним, а індуктивність максимальною. Індуктивність q площини відома як L_q .

Оскільки магніти ротора та площі направлення обмоток статора q та d визначено в просторі, так що індуктивність не міняється суттєво залежно від положення ротора. Тоді, для обрахунку потоку втрат статора у q та d площинах, струми ротора та статора потрібні. Збудження у постійних магнітах може бути промодельоване, прийнявши постійним струм джерела, i_{fr} . Потік ротора розміщено у d площині, тому струм ротора у d площині є i_{fr} . Струм в q площині приймається рівним нулю, прийнявши, що немає потоку в цій площині. Тоді потоки можуть бути описані як:

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

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

де L_m – взаємна індукція між обмотками статора та магнітами ротора.

Якщо підставити ці вирази у вирази напруги статора, це дає такі вирази як:

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

Електромагнітний момент визначається як:

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

який, використавши підстановку потоків у термінах індуктивності та струму, буде наступним:

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

тут потік втрат ротору буде

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

Моделювання синхронного двигуна в середовищі Matlab

Для моделювання синхронного двигуна використано середовище Simulink в Matlab. На рис. 2 показана модель керування синхронним двигуном з оберненим зв'язком.

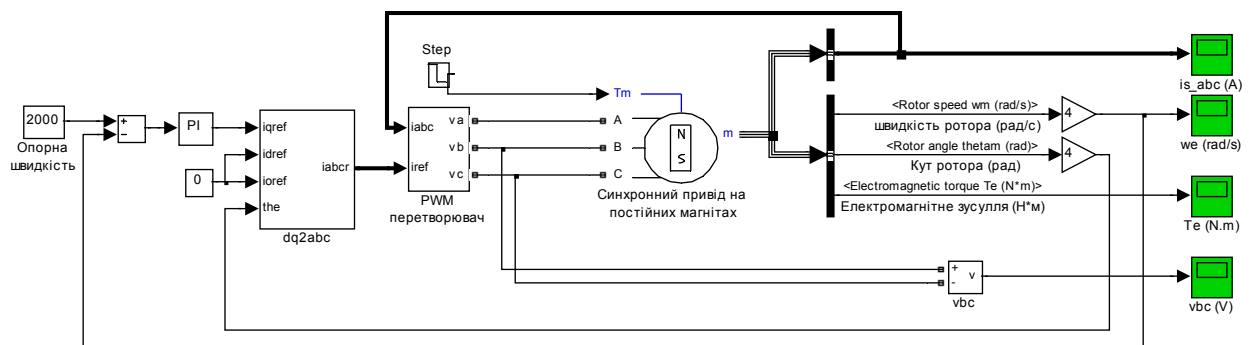


Рис. 2. Модель керування синхронним двигуном у середовищі Matlab Simulink

Задачею моделювання є дослідження зміни струмів та імпульсів керування для забезпечення задачі запуску двигуна, вихід його на робочу швидкість та утримування моменту на валу ротора.

Рис. 2 містить синхронний двигун на постійних магнітах, частота обертання якого визначається сигналами керування від PWM перетворювача. У свою чергу, PWM перетворювач генерує вихідний сигнал на основі інформації щодо струмів споживання двигуна, поточної швидкості двигуна та поточної позиції ротора. PI контролер визначає швидкість реакції системи на зміну обертання на основі часів інтегрування та диференціювання стану вхідного сигналу – поточної швидкості та відмінності її від опорної. Якщо час інтегрування є великим, тоді система повільно реагує на зміну швидкості. Це особливо важливо при динамічній зміні навантаження на валу двигуна. При короткому часі інтегрування навпаки досягається висока швидкість реакції на зміну сигналу. Диференціальна частина часу вимірювання визначає

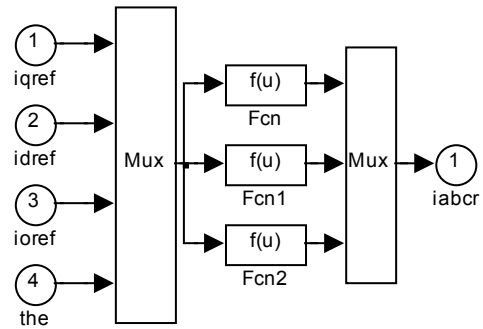


Рис. 3. Блок db2abc

швидкість зміни вихідного сигналу на основі різницевої інформації. Велике значення може призвести до флуктуацій та відповідного биття при обертанні, особливо на початку обертання ротора. На рис. 3 показано структурну схему блоку db2abc, що виконує перетворення стану 2-х

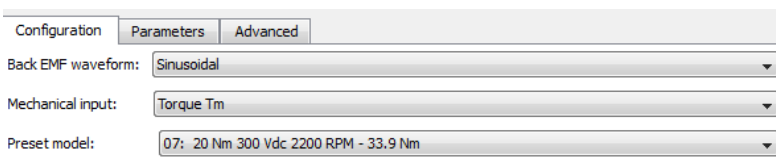


Рис. 4. Вибір передвстановленого типу двигуна

полюсного двигуна (q та b площини) у 3-фазний сигнал.

Наявна в середовищі Matlab Simulink модель двигуна має ряд попередньо встановлених типів двигунів. Так, для моделювання обрано двигун з тягою 20 Нм та максимальною швидкістю обертання 2200 об/хв. На рис. 5 показано параметри, що відповідають стану двигуна та визначають його енергетичні показники.

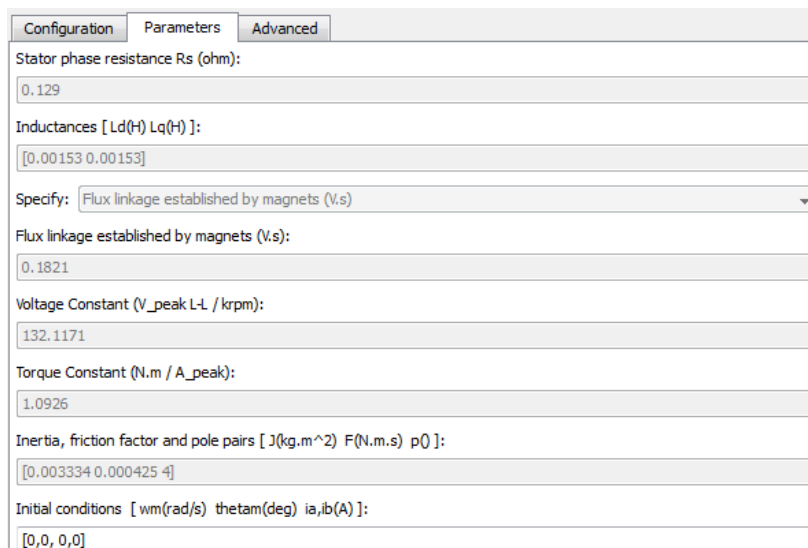


Рис. 5. Сторінка з електричними параметрами моделі двигуна

В моделюванні досліджено відгук системи на вплив зміни навантаження на ротор через 0.02 секунд часу моделювання. Відповідно, на рис. 6, рис. 7 та рис. 8 показано зміну струму живлення двигуна, швидкість зміни частоти обертання та механічної тяги.

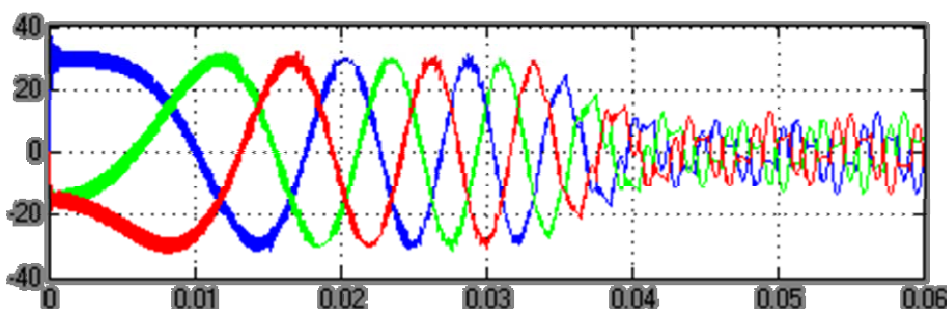


Рис. 6. Графік зміни струму живлення двигуна

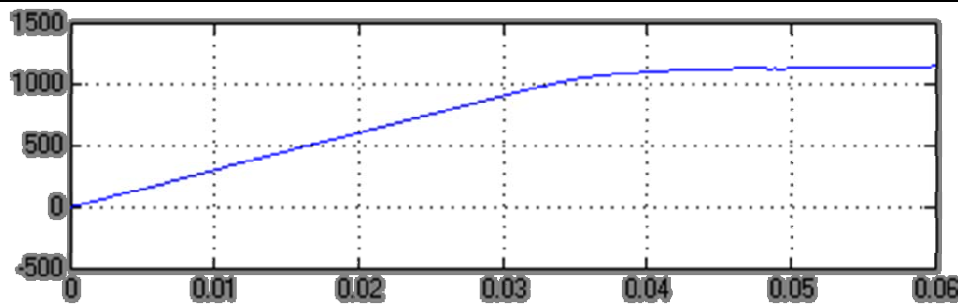


Рис. 7. Графік зміни швидкості обертання

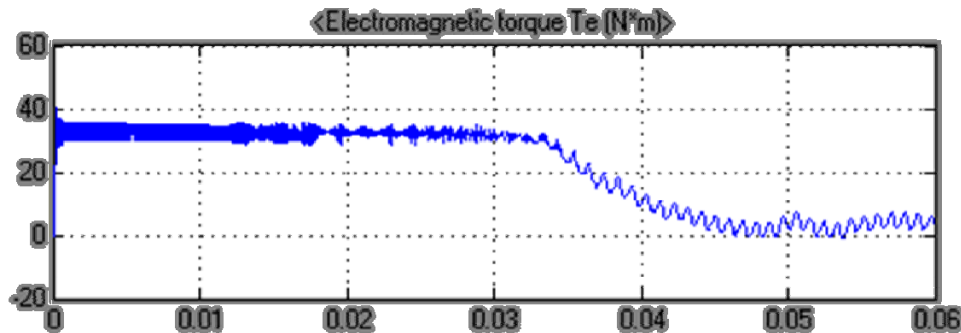


Рис. 8. Зміна механічної тяги на роторі двигуна

Висновки

Отже, в результаті зміни навантаження на двигун, система керування забезпечує сталість швидкості наростання частоти обертання двигуна незалежно від зміни навантаження, а тому синхронний двигун забезпечує сталість механічних показників руху незалежно від зміни навантаження та обертання. При цьому напруга та струм керування двигуном динамічно змінюються для забезпечення вихідних показників.

Література

1. EI Shahat, A, "Universal PM Synchronous Motor Drive System for Automotive Applications". Department of Electrical and Computer Engineering, Ohio State University, USA, JES 2010 on-line: journal.esrgroups.org/jes
2. Kanakaraj, J.: Electrical Machines and Appliances Theory, A Publication under Government of Tamilnadu Distribution of Free Textbook Programme, Tamil Nadu Textbook Corporation, College Road, Chennai - 600 006. (2011).
3. Balazovic Peter; Sensorless PMSM Control for an H-axis Washing Machine Drive, Designer Reference Manual, Freescale Semiconductor, Inc. (2010) <http://www.freescale.com>
4. Daniel Fita; Field Weakening Control of PMSM, Master Thesis, School of Graduate Studies of Addis Ababa University, Department of Electrical and Computer Engineering. (2005)
5. Горященко К.Л. Тенденції розвитку сучасної силової елементної бази для керування пристроями легкої промисловості / К.Л. Горященко, С.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. – 2004. – № 5. – Ч.1. – С. 174-177
6. Krishnan; Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458 (2001).

References

1. EI Shahat, A, "Universal PM Synchronous Motor Drive System for Automotive Applications". Department of Electrical and Computer Engineering, Ohio State University, USA, JES 2010 on-line: journal.esrgroups.org/jes
2. Kanakaraj, J.: Electrical Machines and Appliances Theory, A Publication under Government of Tamilnadu Distribution of Free Textbook Programme, Tamil Nadu Textbook Corporation, College Road, Chennai - 600 006. (2011).
3. Balazovic Peter; Sensorless PMSM Control for an H-axis Washing Machine Drive, Designer Reference Manual, Freescale Semiconductor, Inc. (2010) <http://www.freescale.com>
4. Daniel Fita; Field Weakening Control of PMSM, Master Thesis, School of Graduate Studies of Addis Ababa University, Department of Electrical and Computer Engineering. (2005)
5. Horiashchenko K.L., Horiashchenko S.L. Tendencii rozvitku suchasnoi silovoy elementnoy bazi dlya keruvannya pristroyami legkoy promislivosti. Khmelnytskyi. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences. 2004. Issue 5. Part 1. P. 174-177/
6. Krishnan; Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control, Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458 (2001).

Рецензія/Peer review : 17.10.2018 р.

Надрукована/Printed :25.11.2018 р.

Стаття рецензована редакційною колегією