

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Савеленко І. В., Плешков П. Г.

Кіровоградський національний технічний університет

Запропоновано алгоритм визначення швидкості обертання ротора синхронного двигуна з постійними магнітами, який дозволяє відмовитися від використання датчика, що механічно пов'язаний з ротором. Проведено дослідження перехідних режимів СДПМ за розглянутим алгоритмом та системою диференціальних рівнянь для СДПМ.

**Постановка проблеми.** Поява нових високоенергетичних магнітних матеріалів з високими магнітними характеристиками і відносно низькою вартістю [1] обумовила широке впровадження в технологічних комплексах і системах синхронних машин з постійними магнітами (СДПМ). Розвиток функціональних можливостей мікропроцесорних контролерів для автоматичного керування технологічними процесами дозволило створити якісні регульовані електроприводи (ЕП) змінного струму [2]. В існуючих системах автоматичного керування ЕП для визначення частоти обертання застосовують тахогенератори [2], які мають значну похибку вимірювання на малих швидкостях і в динаміці, що впливає на якість управління. Тому розроблення систем керування СДПМ без використання давачів вимірювання швидкості обертання ротора є актуальною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасний стан розвитку ЕП з СДПМ характеризується їх широким розповсюдженням в багатьох галузях промисловості. Це, висуває більш жорсткі вимоги до точності автоматичного керування ЕП з СДПМ, а саме більш точного визначення швидкості СДПМ, як на низьких, так і на високих частотах обертання, а також під час перехідних режимів роботи двигуна [4]. Для запуску СМ системи автоматичного керування (САК) необхідно знати точне положення ротора [2]. За відсутності датчика положення найпростіше рішення - подати напругу на одну з фаз статора і дочекатися, поки ротор зорієнтується по полю [3]. Але, при розбіжності положення полюсів ротора і фази статора, ротор може прийняти невірне положення. Так як в початковий момент пуску ротор знаходиться в нерухомому стані, проти е.р.с., яка дозволяє визначити його положення, дорівнює нулю. Всі відомі методи [1] визначення початкового положення ротора використовують спеціальний тестовий сигнал, який подається на статор машини, і спеціальний алгоритм аналізу відгуку на нього. Методи визначення початкового положення ротора без використання тахогенераторів: метод подачі сигналу високої частоти; ШІМ-метод; метод імпульсів струму.

Вірно визначити положення ротора можливо лише при застосуванні методу імпульсів струму [3], який є оптимальним для САК ЕП з СДПМ без датчиків контролю положення ротора.

**Мета статті.** В даній статті розглядаються алгоритми визначення кутової швидкості  $\omega$  як функції електричних змінних  $\omega = f(I_a, I_b, I_c, U_a, U_b, U_c, U_f, I_f)$ , а також параметрів мережі і машини  $\omega = f(L_{fs}, L_s, L_r, L_f, L_{fr}, L_{sr}, R_s, R_r, R_b)$ , де  $I_a, I_b, I_c$  - струми статора,  $U_a, U_b,$

$U_c$  - напруги фаз статора,  $U_f, I_f$  - напруги і струми в обмотці збудження,  $L_{fs}, L_{fr}, L_{sr}$  - індуктивності взаємодукції,  $L_s, L_r, L_f$  - індуктивності обмоток статора, ротора, збудження відповідні опори обмоток  $R_s, R_r, R_b$ .

Миттєві значення струмів статора перетворюються до  $d$ - $q$  системи координат за допомогою математичних рівнянь та інформації про становище ротора.

**Основні матеріали дослідження.** Розглянемо систему диференціальних рівнянь, що описує СДПМ в  $d$ - $q$  системі координат:

$$\begin{cases} U_{sd} = I_{sd}R_d + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq}\omega; \\ U_{sq} = I_{sq}R_q + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd}\omega; \\ U_f = I_fR_f + \frac{dI_f}{dt}; \\ 0 = I_{rd}R_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ 0 = I_{rq}R_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}; \end{cases} \quad (1)$$

де  $I_{sd} \dots I_f$  - проекції векторів струмів на вісь  $d$ ;

$I_{sq}, I_{rq}$  - проекції векторів струмів на вісь  $q$ ;

$\psi_{sd} \dots \psi_f$  - проекції потоків зчеплення на вісь  $d$ ;

$\psi_{sq}, \psi_{rq}$  - проекції потоків зчеплення на вісь  $q$ ;

$\omega$  - швидкість обертання СДПМ.

Потокозчеплення в СД представлені:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s I_{sd} + I_f L_{sb} + I_{rd} L_{sr} \\ \psi_f = L_{sf} I_{sd} + I_f L_b + I_{rd} L_{br} \\ \psi_{rd} = L_{sr} I_{sd} + I_f L_{fr} + I_{rd} L_r \\ \psi_{sq} = L_s I_{sq} + I_{rd} L_{sr} \\ \psi_{rq} = L_{sr} I_{sq} + I_r L_r \end{cases} \quad (2)$$

Подальший розрахунок будемо виконувати у відносних одиницях, які після алгебраїчних перетворень рівняння системи (2) приймають вигляд:

$$\begin{cases} I_{rd} R_{rd} = -\frac{d\psi_{rd}}{dt}; \\ \psi_f = I_{sd} X_{ad} + I_f X_f + I_{rd} X_{ad}; \\ \psi_{rd} = I_{sd} X_{ad} + I_f X_{ad} + I_{rd} X_{ed}; \end{cases} \quad (3)$$

Із системи рівнянь (3) визначаємо поточозчеплення та струм ротора СПДМ  $\psi_{rd}$  и  $I_{rd}$ :

$$I_{rd} = \frac{1}{X_{ad}} \psi_{rf} - I_{sd} - \frac{X_f}{X_{ad}} I_f \quad (4)$$

$$\psi_{rd} = X_{ad} I_{sd} + X_{ad} I_f + \frac{X_{ed}}{X_{ad}} \psi_{rf} - X_{ed} I_{sd} - \frac{X_{id} X_f}{X_{ad}} I_f \quad (5)$$

Після проведення математичних перетворень та диференціювання рівнянь (4) і (5) відносно  $I_{sd}$  отримаємо:

$$I_{sd} = e^{-kt} (c - \int Q(t) e^{kt} dt) \quad (6)$$

За значеннями струму, що визначаються  $I_f(t)$  за показами давачів струму, можна визначити  $\psi_{rf}(t)$  з рівняння (1) і розрахувати значення похідної  $dI_f/dt$ , але при цьому виникає досить вагома похибка, що впливає на подальші розрахунки.

Для усунення даної похибки представимо інтеграл  $\int Q(t) e^{kt} dt$  в наступному вигляді:

$$\int Q(t) e^{kt} dt = U(t) e^{kt} - \int U(t) e^{kt} dt$$

де

$$U = \int Q(t) dt = \\ = Z_1 \int \psi_{rf}(t) dt + Z_2 \int I_f(t) dt + Z_3 \psi_{rf}(t) + Z_4 I_f(t)$$

В рівнянні (6) при початкових умовах пуску СПДМ  $c=0$  враховуючи вищесказане, отримаємо:

$$\int Q(t) e^{kt} dt = U(t) e^{kt} - \int U(t) e^{kt} dt \quad (7)$$

Всі інтегральні значення у виразі (7) визначаються методом Рунге-Кутта за відомим алгоритмом [5].

Для програмної реалізації алгоритму (7) нами була використана мова програмування Паскаль. В ній врахована система диференціальних рівнянь, що визначає електричні параметри для розрахунку швидкості струму  $I_{sd}$  і виконаний розрахунок струму згідно алгоритму (7) за допомогою системи диференціальних рівнянь. Знаючи складову вектора струму статора  $I_{sd}$  і значення вектора струму статора  $I_s$  можна визначити значення кута вибігу ротора  $\theta$ . Струм  $I_s$  знаходиться за виразом  $I_s = \sqrt{I_{s\alpha}^2 + I_{s\beta}^2}$ , де  $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$  - відповідні проекції вектору  $I_s$  на вісі  $\alpha, \beta$  системи координат, що пов'язана з трифазною системою координат статора наступними співвідношеннями:

$$I_{s\alpha} = I_a - \frac{1}{3} I_b - \frac{1}{3} I_c,$$

$$I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_b - \frac{1}{\sqrt{3}} I_c.$$

Косинус кута вибігу ротора  $\cos\theta = I_{sd} / I_s$ . Знаю-

чи  $\theta$  в будь-який момент часу можна визначити значення кутової частоти обертання.

Результати розрахунку перехідних процесів в СПДМ при пуску та визначення швидкості обертання за запропонованим алгоритмом наведені на рис. 1 - 6.

На рис.1-2 приведені графіки перехідного процесу в фазі А статора та його проекції на вісь  $d$ .

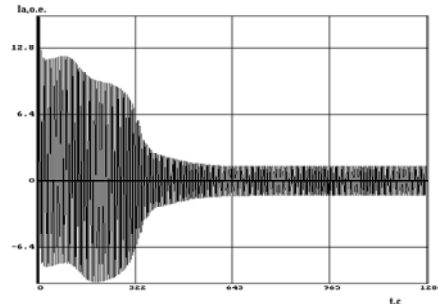


Рисунок 1 – Машинограма струму статора у фазі А

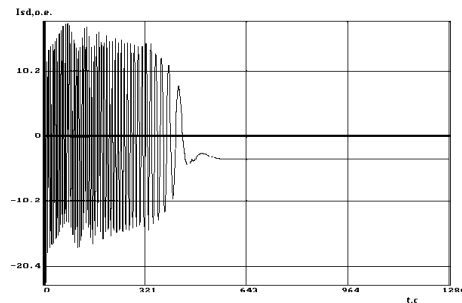


Рисунок 2 – Машинограма проекції вектора струму статора на вісь  $d$ .

В результаті диференціювання виразу для визначення  $\theta$  за швидкістю мають місце ряд відхилень від дійсного значення швидкості, у вигляді голчастих функцій (рис.3), кількість і значення яких залежить від вибору кроку інтегрування. Усунення цих відхилень було здійснене за допомогою визначення середнього значення розрахункової швидкості за досить малий період часу за виразом:

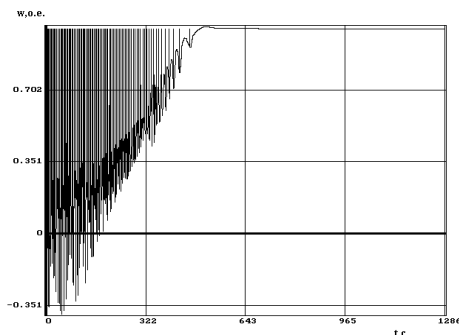


Рисунок 3 – Машинограма кутової швидкості обертання, що розрахована за запропонованим варіантом

$$\omega_{sr} = \int_0^T \frac{\omega dt}{T} \Big|_{T \rightarrow H},$$

де  $H$  - крок інтегрування.

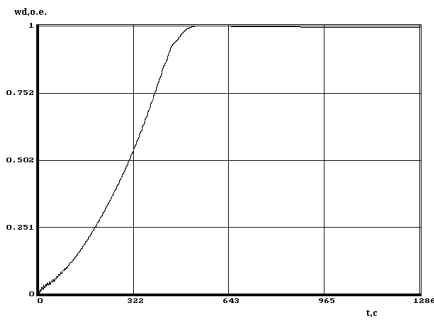


Рисунок 4 – Машинограма швидкості обертання СДПМ.

Таким чином, отримано графік перехідного процесу за швидкістю (рис. 5), який практично повністю збігається з графіком перехідного процесу по змодельованій швидкості (рис. 4). При цьому, точність розрахунку швидкості в будь-який момент часу не залежить від вибору кроку інтегрування, що є важливим, тому що в реальних системах на зменшення кроку інтегрування накладаються обмеження, викликані інертністю датчиків, електричних підсилювачів системи.

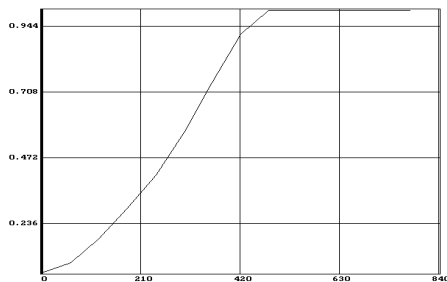


Рисунок 5 – Машинограма швидкості обертання (згладжена функція рис. 3)

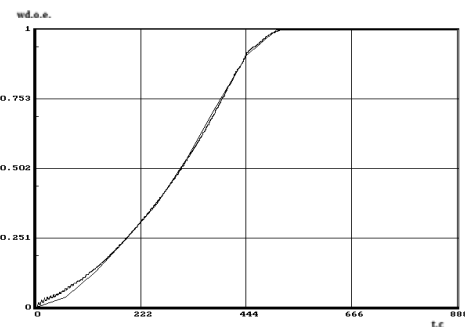


Рисунок 6 – Машинограми розрахунку по запропонованому алгоритму керування швидкості обертання (рис. 5) та при рішенні системи рівнянь СДПМ (рис.4).

Як видно, з графіка на рис. 6, що описує динаміку швидкості СД при пуску, похибка розрахунку в середньому постійна і досить мала - порядку 1,25%. При використанні даного алгоритму розрахунку швидкості можна повністю відмовитися від тахогенератора. В цьому випадку помітно зменшується апаратна частина системи керування, але ускладнюється програмне забезпечення. До складу програми алгоритму управління необхідно додати модулі розрахунку кута повороту вала і швидкості СДПМ.

**Висновки.** Покращення якості керування регульованого ЕП з СДПМ може бути досягнуто шляхом підвищення точності визначення швидкості обертання ротора за рахунок відмови від використання датчика швидкості обертання, що механічно пов'язаний з ротором СДПМ. Застосування в САК ЕП з СДПМ спеціалізованого контролера із розробленим алгоритмом дозволяє з високою точністю визначити швидкість обертання ротора, що значно розширює діапазон і покращує якість регулювання.

#### Список використаних джерел

1. Волков В.К. Анализ применения тихоходных синхронных двигателей с постоянными магнитами в составе солнечной батареи космического аппарата. XVI Междунар. научн. конфер. аспирант. мол. ученых "Современная техника и технологии". - С.394-396 с.
2. Synchronous motor control system. Kurakake Mitsuo, Schemato Keiji Fancu Ltd. Пат. 4629958. США
3. Jan Persson. Innovative standstill position detection combined with sensorless control of synchronous motors.- Lausanne, Switzerland.: École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), 2005.
4. С. Г. Воронин. Некоторые схемы и алгоритмы векторного управления синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов / С. Г. Воронин, Д. А. Курносов, А. С. Кульмухаметова // Электротехника, 2013 – №10 - С. 50-54.
5. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М. – Л.: Энергия, 1964. - 527 с.

#### Аннотация

### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Савеленко И. В., Плешков П. Г.

*Предложен алгоритм определения скорости вращения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами, который позволяет отказаться от использования датчика, который механически связан с ротором. Проведено исследование переходных режимов СДПМ за рассмотренным алгоритмом и системой дифференциальных уравнений для СДПМ.*

#### Abstract

### INCREASING THE ACCURACY OF VECTOR CONTROL A SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

I. Savelenko, P. Pleshkov

*Is proposed an algorithm for determining the rotational speed of the rotor of a synchronous motor with permanent magnets, which eliminates the use of the sensor is mechanically connected to the rotor. A study of transient states SMPM of the considered algorithm and a system of differential equations for the SMPM.*