

БЕЗДАТЧИКОВЕ ВЕКТОРНЕ КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Толочко О.І., д.т.н., проф., Бурмельов О.О., студент

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Одним з перспективних класів електричних машин для електроприводів є синхронні двигуни зі збудженням від постійних магнітів (СДПМ). СДПМ володіють унікальним поєднанням властивостей, недосяжним для інших типів електричних машин (асинхронних, колекторних машин постійного струму, індукторних), а саме – високою енергетичною ефективністю, підвищеними динамічними властивостями, та гарними масо-габаритними показниками. Помітний прогрес у виробництві магнітів та технології конструювання роторів привів до помітного зниження вартості СДПМ, а різноманіття сучасних магнітних матеріалів і магнітних систем дозволяє гнучко і ефективно проектувати СДПМ із заданими параметрами. Використання новітніх досягнень в областях силової і інформаційної електроніки дозволяє реалізовувати складні алгоритми керування та ідентифікації. До складу систем керування СДПМ входить вузол датчика положення ротора (ДПР), що робить конструкцію значно дорожчою і передбачає наявність провідного зв'язку цього вузла з електронним перетворювачем який керує роботою СДПМ. Крім того, сучасною тенденцією при розробці систем керування приводами змінного керування є забезпечення можливості їх роботи в бездатчиковому режимі навіть при наявності ДПР. Існує багато алгоритмів оцінювання швидкості та кутового положення ротора СДПМ за інформацією про напругу та струм статора [1-3]. Кожний із них має свої недоліки та переваги. Зазвичай точність оцінювання механічних координат зростає за рахунок ускладнення алгоритму розрахунку. Тому актуальним є питання удосконалення систем керування синхронними двигунами зі збудженням від постійних магнітів без ДПР без значного ускладнення алгоритму оцінювання швидкості та кутового положення ротора.

Мета роботи – дослідження системи бездатчикового векторного керування синхронним двигуном з постійними магнітами з визначенням механічних координат за складовими напруги та струму статора у нерухомій ортогональній системі координат та її удосконалення.

Матеріали дослідження. В роботі [4] приведено класифікацію у відповідності з якою методи визначення швидкості машин змінного струму підрозділяються на п'ять груп:

- 1) неадаптивні методи, в яких швидкість визначається безпосередньо через виміряні напруги і струм статора, і методи, засновані на визначенні швидкості через розраховані частоти напруги живлення і роторної ЕРС;
- 2) адаптивні методи, які орієнтовані на замкнуті системи регулювання електропривода, в яких адаптація застосована для підвищення точності вимірювальної системи;

3) методи, засновані на конструктивних особливостях двигуна, в цьому випадку використовується інформація, що несе в собі, наприклад, крива намагнічування машини.

4) нелінійні методи, що базуються на теорії нейронних кіл;

5) методи, що використовують для підвищення точності оцінювання додаткові високочастотні сигнали або іншу додаткову інформацію.

В даній статті розглянуто один з найбільш простих неадаптивних методів, заснований на формах математичного описання електричних машин змінного струму. В основу побудови схеми бездатчикового визначення швидкості покладено векторне математичне описання синхронного двигуна у нерухомій системі координат:

$$U_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt}, \quad (1)$$

$$U_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}, \quad (2)$$

де скалярні значення напруг і струмів по осях α і β можуть бути отримані шляхом відомих координатних перетворень по вимірним миттєвим значенням фазних напруг і струмів.

Прийmemo форму ЕРС двигуна синусоїдальною, тоді миттєві значення проекцій потокозчеплення містять інформацію про дійсне кутове положення осі намагніченості ротора відносно осі α і можуть бути записані виразами:

$$\psi_{s\alpha} = \psi_{pm\alpha} + L_s i_{s\alpha}, \quad (3)$$

$$\psi_{s\beta} = \psi_{pm\beta} + L_s i_{s\beta}, \quad (4)$$

де $\psi_{pm\alpha} = \cos(\theta_e)$; $\psi_{pm\beta} = \sin(\theta_e)$; θ_e – електричний кут повороту валу двигуна; $\psi_{pm} = const$ – потокозчеплення постійних магнітів.

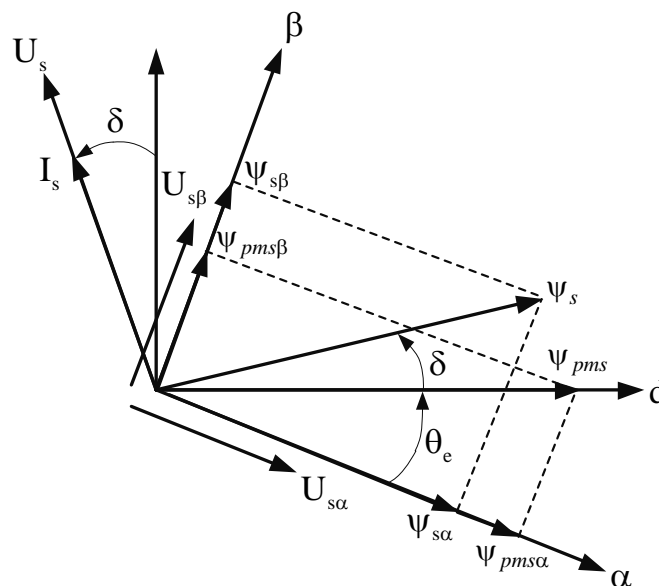


Рисунок 1 – Векторна діаграма синхронного двигуна

Згідно з векторною діаграмою синхронного двигуна, що представлена на рис.1, кутове положення θ_e може бути визначене такими співвідношеннями:

$$\operatorname{tg}(\theta_e) = \frac{\Psi_{pm\beta}}{\Psi_{pm\alpha}}, \quad \theta_e = \operatorname{arctg}\left(\frac{\Psi_{pm\beta}}{\Psi_{pm\alpha}}\right) \quad (5)$$

Механічна швидкість ротора ω визначається як похідна від кутового положення θ_e . Структурну схему реалізації даного алгоритму наведено на рис.2.

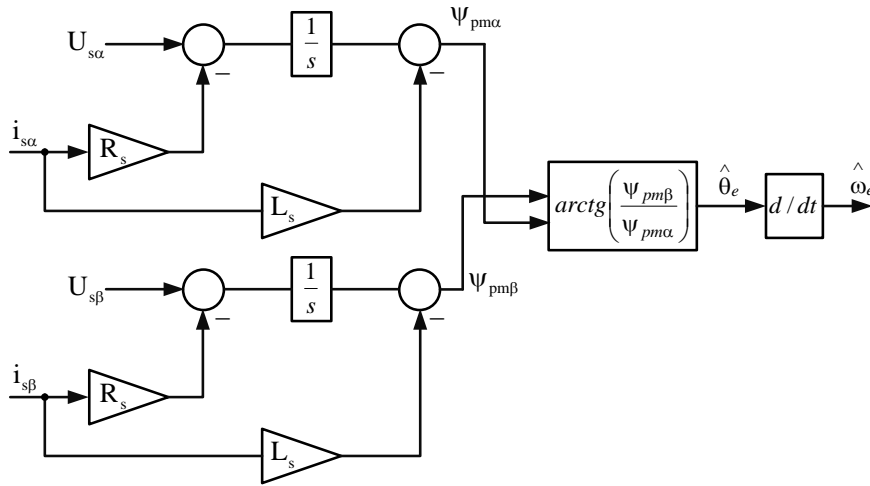


Рисунок 2 – Структурна схема реалізації оцінювання кутового положення синхронного двигуна

Процедура диференціювання кутового положення θ_e вносить суттєву похибку у результуючу форму сигналу швидкості ω_e , що призводить до нестабільної роботи системи.

В [1] пропонується варіант первинного визначення швидкості, після якого шляхом інтегрування знаходиться кутове положення валу двигуна θ_e . Згідно з векторною діаграмою (рис.1) справедливе наступне співвідношення:

$$\operatorname{tg}(\theta_e + \delta) = \frac{\Psi_{\beta}}{\Psi_{\alpha}}, \quad (7)$$

Після диференціювання рівняння (7) отримаємо:

$$\sec^2(\theta_e + \delta) \cdot \frac{d(\theta_e + \delta)}{dt} = \frac{\Psi_{s\alpha} \cdot \Psi'_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot \Psi'_{s\alpha}}{\Psi_{s\alpha}^2}, \quad (8)$$

де

$$\sec^2(\theta_e + \delta) = \frac{\Psi_s^2}{\Psi_{s\alpha}^2}, \quad (9)$$

$$\Psi_s = \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2}. \quad (10)$$

Після підстановки (9) у (8) отримаємо рівняння для оцінки швидкості двигуна:

$$\hat{\omega}_e = \frac{d(\hat{\theta}_e + \delta)}{dt} = \frac{(U_{s\beta} - i_{s\alpha} R_s) \cdot \Psi_{s\alpha} - (U_{s\alpha} - i_{s\beta} R_s) \cdot \Psi_{s\beta}}{\hat{\Psi}_s^2}, \quad (11)$$

В [1] та [3] стверджується, що у рівнянні (11) можна знехтувати кутом між компонентами потокозчеплення ψ_s та ψ_{pm} , що є невірним. В цьому випадку система керування буде коректно оцінювати швидкість лише в статичних режимах роботи двигуна. Для усунення похибки оцінювання швидкості в динамічних режимах роботи двигуна, врахуємо в рівнянні (11) компоненти похідних струмів $i_{s\alpha}$ та $i_{s\beta}$:

$$\hat{\omega}_e = \frac{d\hat{\theta}_e}{dt} = \frac{\left(U_{s\beta} - i_{s\alpha} R_s - \frac{di_{s\alpha}}{dt} L_s \right) \cdot \psi_{pm\alpha} - \left(U_{s\alpha} - i_{s\beta} R_s - \frac{di_{s\beta}}{dt} L_s \right) \cdot \psi_{pm\beta}}{\hat{\psi}_{pm}^2} \quad (12)$$

Для усунення похибок, що вносить операція диференціювання струмів, компоненти $\psi_{pm\alpha}$ та $\psi_{pm\beta}$ у рівнянні (12) розрахуємо за методом представленим на рис. 2. Кутове положення ротора визначається шляхом інтегрування сигналу швидкості. Структурну схему реалізації запропонованого алгоритму представлено на рис. 3.

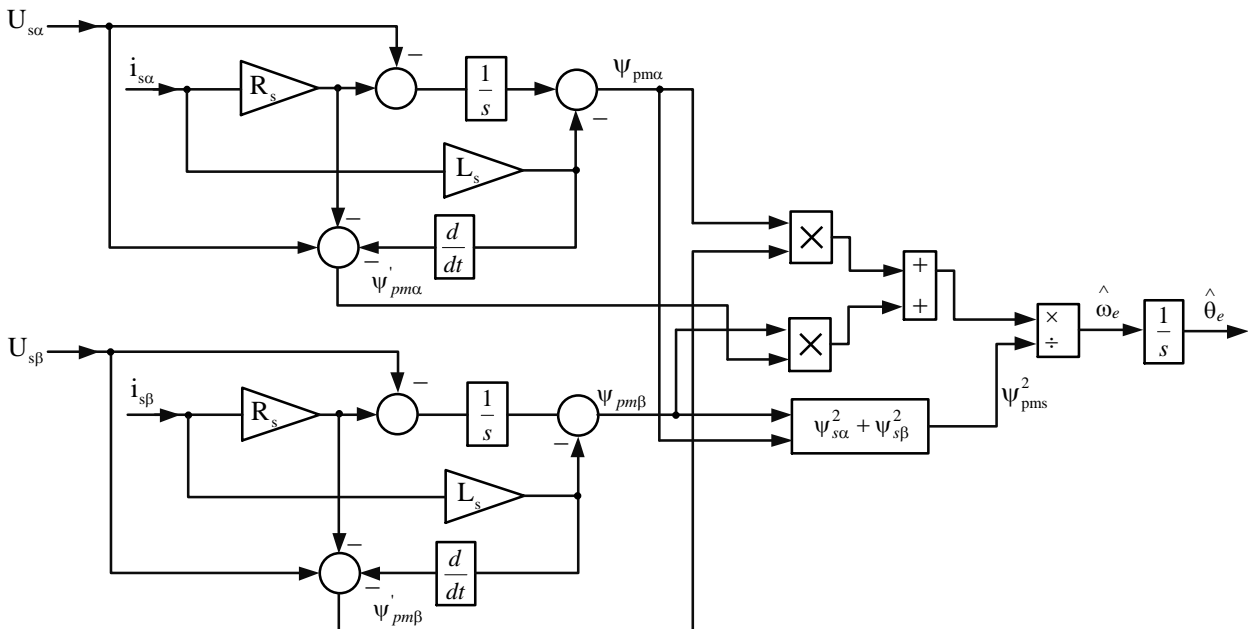


Рисунок 3 – Структурна схема реалізації оцінювання швидкості синхронного двигуна

При відсутності ДПР або при його несправності на вхід регулятора швидкості та блоків перетворення координат заводяться оцінені значення швидкості та кутового положення.

Відомо, що розглянуті вище рівняння оцінювання механічних координат базуються на моделі напруг електричної машини і в реальних умовах можуть коректно використовуватись тільки на швидкостях вищих за мінімальну швидкість двигуна, котра складає приблизно 5% від номінальної швидкості, коли в двигуні генерується достатня для вимірювання величина ЕРС [3]. Це означає, що при бездатчиковому векторному керуванні запуск двигуна, як правило, здійснюється за законами розімкнутого частотного керування і після

досягнення двигуном необхідної швидкості здійснюється перемиканням на алгоритми векторного керування.

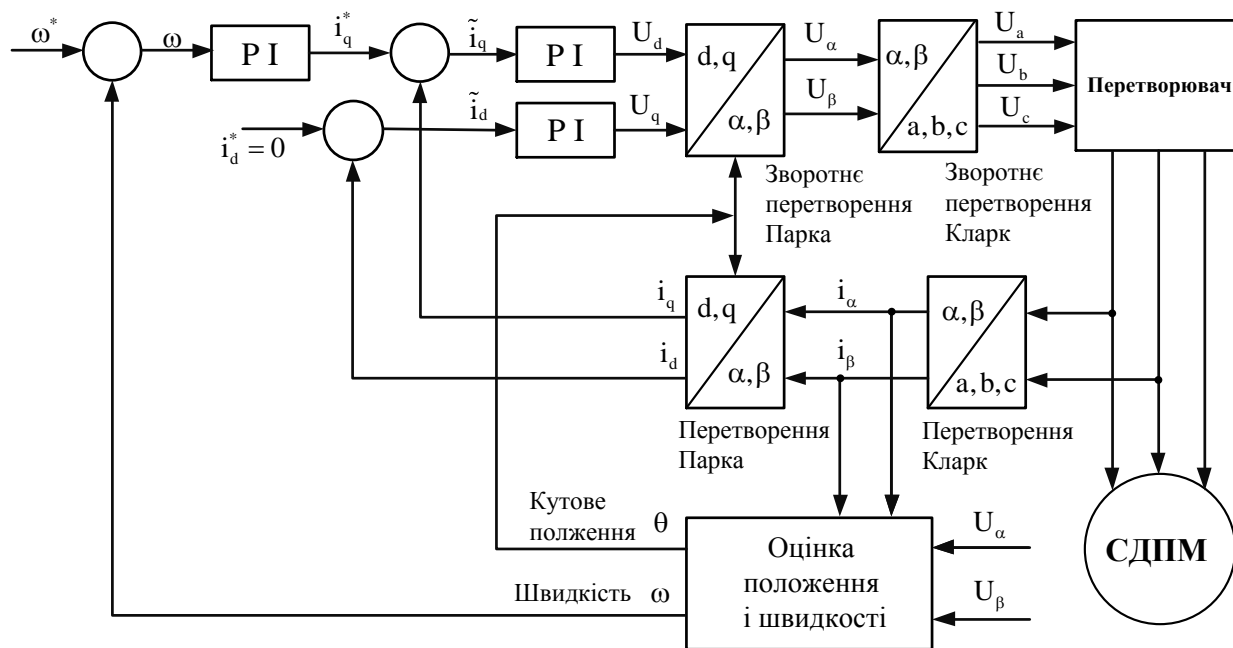


Рисунок 4 – Загальна структурна схема реалізації бездатчикового векторного керування СДПМ

Висновки. У статті досліджено три способи визначення швидкості і кутового положення синхронного двигуна з постійними магнітами, заснованих на формах математичного описання електричних машин змінного струму. Виявлено, що перший спосіб є небажаним, через необхідність диференціювання вихідного сигналу кутового положення. Другий спосіб не забезпечує стабільну роботу двигуна через наявність похибок оцінювання швидкості в динамічних режимах роботи. Третім способом є запропонований алгоритм усунення похибки, шляхом врахування в формулі обчислення швидкості (11) компонент похідних від струмів статора. На основі розробленого алгоритму побудовано систему бездатчикового векторного керування, де оцінені величини використовуються системою керування на вході регулятора швидкості та блоків перетворення координат.

Перелік посилань

1. Bose V.K.: Modern Power Electronics and AC drives. Pearson Prentice Hall International, London, 2002. –P. 522-524.
2. Клиначев Н.В. Определение углового положения ротора синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов / Н.В. Клиначев, Н.Ю. Кулёва, С.Г. Воронин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика, 2014. –Т. 14. –№ 2. –С. 49–54.
3. Mukhtar A.: High Performance AC Drives. Modelling, Analysis and Control. Springer-Verlag London Limited, 2010. – P.123-125.
4. Schröder D. Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen / Dierk Schröder. – Berlin; Heidelberg : Springer, 2009. – S. 1172.