

ВЛИЯНИЕ НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ДВИГАТЕЛЯ И НАБЛЮДАТЕЛЯ ПРИ БЕЗСЕНЗОРНО УПРАВЛЕНИЕ НА СИНХРОНЕН ДВИГАТЕЛ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Емил Рачев, Владислав Петров

Резюме: В работата е разгледано влиянието на параметрите необходими при настройка на безсензорно управление на синхронен двигател с постоянни магнити - управление без сензор за скорост на вала на двигателя. Приложено е следящо токово управление, като е разгледано не само влиянието на параметрите на двигателя върху наблюдателя за ъглово положение и скорост, но и влиянието и начина за настройка на токовите и скоростни регулатори.

Ключови думи: безсензорно векторно управление, синхронен двигател с постоянни магнити, следящо токово управление

INFLUENCE OF MOTOR AND OBSERVER PARAMETERS IN A SENSORLESS CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Emil Rachev, Vladislav Petrov

Abstract: The work is an overview of the impact of required parameters for implementing a sensorless field oriented control of a permanent magnet synchronous motor – operation without a speed sensor on the motor shaft. An analysis is made not only on the impact of motor parameters on the used sliding-mode observer but also on the topology and parameters of the current and speed controllers.

Keywords: sensorless vector control, permanent magnet synchronous motor, sliding-mode observer

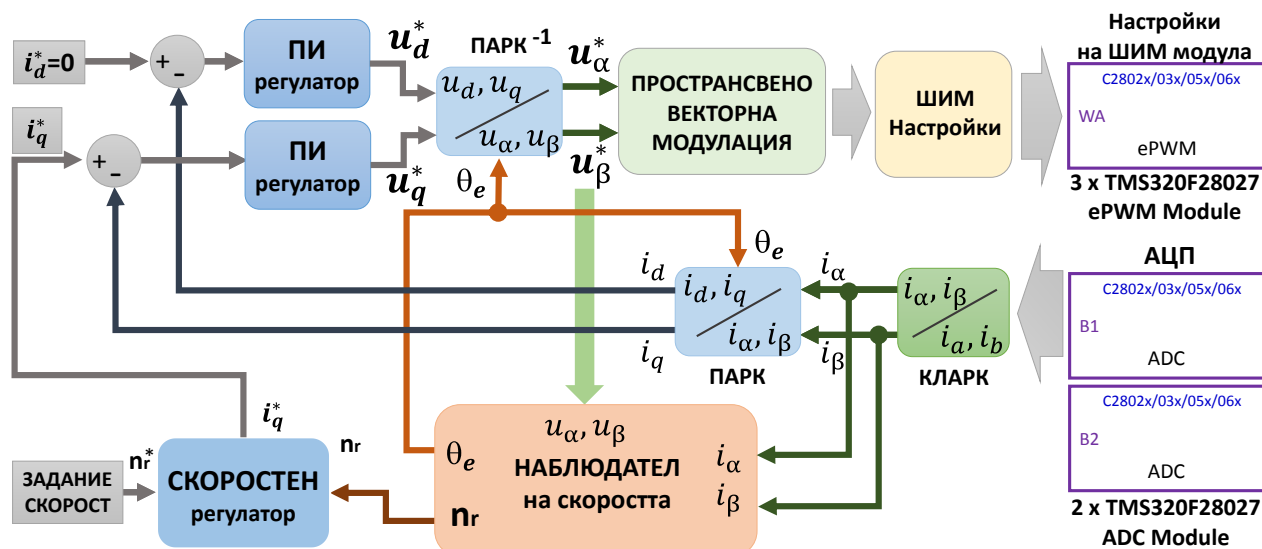
1. Въведение

При векторното управление се налага използването на сензор за положение и скорост на ротора. След развиване на метода инженерите започват да търсят начини за елиминиране на сензора за положение и скорост. Това обаче се оказва сериозен проблем през годините и въпреки, че към настоящия момент водещи фирми в областта предлагат сигнални процесори с вградени наблюдатели за положение, работата в тази посока не е напълно решена и все още безсензорното управление не може напълно да покрие качествата на управление със сензор на вала на двигателя.

Един от водещите производители на специализирани микропроцесори - Texas Instruments (TI), внедри безспорно един от най-успешните наблюдатели на скоростта, ъгъла и потока в серията процесори C2000, ориентирана към управление на електрически двигатели, който нарекоха InstaSPIN®. Модулът InstaSPIN е уникален по рода си инструмент, интегриран в процесорите на TI, който позволява реализация на безсензорно управление както за синхронни, така също и за асинхронни (индукционни) двигатели. Разбира се първият основен недостатък е в това, че InstaSPIN е патентован и „заклучен“ в ROM паметта на микроконтролера и на практика неговата математическа основа остава загадка за потребителя. Освен това, самите TI поясняват, че работата на InstaSPIN е по-успешна при синхронни двигатели и има своите особености при асинхронните двигатели, което по същество се потвърждава в достоверните научни изследвания, публикувани до момента. В InstaSPIN е интегрирана процедура за диагностика на двигателя, но тя има някои проблеми при двигатели с вътрешно разположени магнити и самите TI твърдят, че ще допълнят функционалността в следващи версии на InstaSPIN. В тази връзка в настоящия доклад се цели създаване на гъвкава изследователска среда, която да послужи като база за бъдещи изследвания в областта на векторното управление и по-специално техниките за елиминиране на сензора за скорост и положение на ротора, приети да се наричат безсензорно управление [2], [4], [5], [6].

2. Безсензорно векторно управление

Блоквата схема на реализираното векторно управление на СДПМ е показана на фиг. 1.



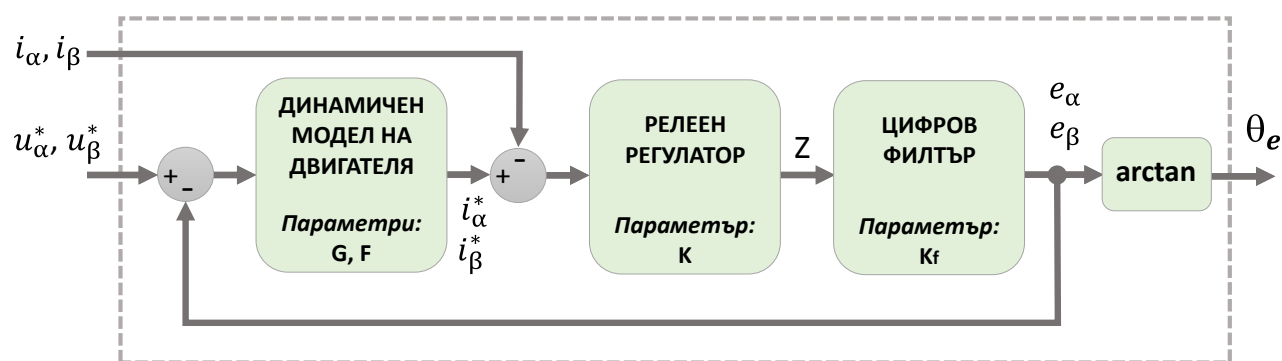
Фиг. 1 Блокова схема на безсензорно векторно управление (ВУ) на синхронен двигател с постоянни магнити (СДПМ); $i_d, i_q, i_\alpha, i_\beta, u_d, u_q, u_\alpha, u_\beta$ – моментни стойности на съставките на тока и напрежението в d, q и α, β координати

В същността си алгоритъмът на управление не се различава от този на класическо векторно управление с използване на сензор за скорост [1], като изключим това, че в метода за управление е интегриран наблюдател, който опре-

деля ъгъла и скоростта на ротора. При управлението на СДПМ в общия случай се задава нулева стойност на тока по оста d. Стойност на тока $i_d = 0$ означава, че управлението не създава магнитен поток от статора, а потокът се създава от магнитите в ротора. Също така управляващият алгоритъм не се стреми да отслабва магнитното поле. При високи скорости се налага отслабване на магнитното поле в ротора, което при повърхностно разположени магнити е трудна задача. Отслабването на полето, чрез въвеждане на $i_d \neq 0$ се явява удачно при неявнополюсна конструкция на ротора с вътрешно разположени магнити. При неявнополюсни машини, дори в режим на работа до обявената скорост, е възможно оптимизиране на съставката на тока по оста d с цел постигне на оптимална работа на двигателя, което зависи от конструкцията на ротора. В общия случай обаче, до обявената скорост, се приема $i_d = 0$.

3. Наблюдател на скоростта

Наблюдателят на скоростта и положението на ротора е представен с блокова схема на фиг. 2. Измерените статорни токове, трансформирани в статична α - β координатна система - i_α , i_β , се сравняват с изчислените стойности на тока в α - β координатна система, получени от динамичния модел на двигателя.



Фиг. 2 Принципната блокова схема на реализирания наблюдател

Динамичният модел на двигателя сравнява зададените напрежения u_α^* и u_β^* с изхода цифровия филтър (фиг.2), който се явява електродвижещото напрежение, с неговите съставки по осите α - β - e_α , e_β .

Ъгловото положение на ротора θ_e се определя както следва:

$$e_\alpha = -\psi_f \omega_e \sin(\theta_e) \text{ и } e_\beta = \psi_f \omega_e \cos(\theta_e) \Rightarrow \theta_e = \arctan(-e_\alpha/e_\beta), \quad (1)$$

където ψ_f е потокосцеплението на статорната намотка получено от постоянните магнити, а ω_e е електрическата кръгова честота.

Динамичният модел на двигателя представлява дискретна реализация на уравненията за равновесие на напреженията по осите α - β с параметри:

$$F = e^{-\frac{R_s T}{L_s}} \text{ и } G = \frac{1}{R_s} \left(1 - e^{-\frac{R_s T}{L_s}} \right), \quad (2)$$

където R_s и L_s са активно съпротивление и статорна индуктивност; t – време на дискретизация.

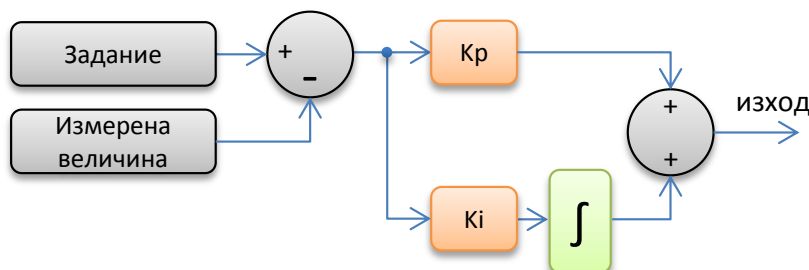
Параметрите на двигателя могат да се определят по няколко различни подхода, като в настоящия отчет е приета методика, предложена в [8] даваща отлични резултати. По-важно е да се отбележи, че при моделиране и изследване на синхронния двигател, в математическия модел участват редица параметри, в това число и касаещи уравнението за движение на ротора, потокосцепление и електродвижещо напрежение в следствие на магнитите в ротора. В случая динамичният модел в наблюдателя има за цел да моделира опростено двигателя, давайки неговата токова реакция при подаване на съответното напрежение. Времеконстантата на предавателната функция, която моделира двигателя в този случай е $T_s = L_s / R_s$.

Определянето на електродвижещото напрежение става на база на релейния регулатор, с коефициент на настройка K – фиг. 2. След релейния регулатор се използва цифров нискочестотен филтър, като с K_f се определя неговата критична честота.

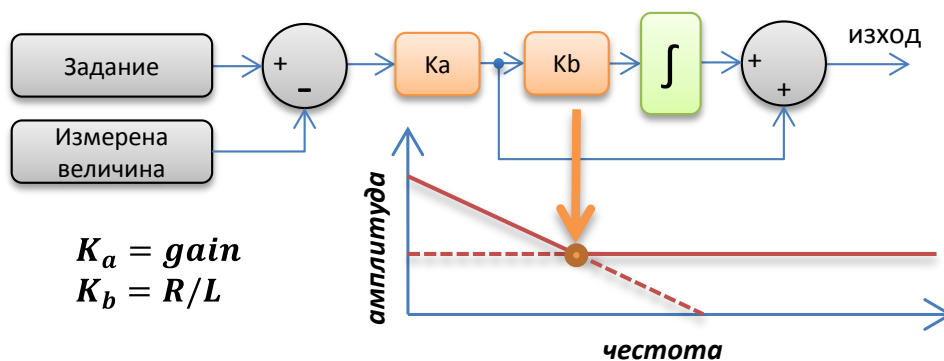
4. Влияние на параметрите на двигателя върху токовите регулатори

При безсензорно управление е важно да се отбележи, че настройката както на токовите, така също и на скоростните регулатори се оказва критична за устойчивостта на системата, което не е валидно в такава степен при класическо векторно управление. При управление със сензор за скорост/положение, настройката на регулаторите може да варира в доста по-широки граници, без нарушаване на устойчивостта. Важно е да се има предвид настройката на токовите регулатори трябва да бъде съобразена със собствената електрическа времеконстанта на двигателя, така че регулаторите да не се опитват да форсират или забавят естествените процеси в двигателя. Това разбира се варира в определени граници. Именно в тази връзка обвързването на константите на регулаторите с параметрите на двигателя и тяхното по-точно определяне е от ключово значение при безсензорно векторно управление.

При безсензорно управление се оказва удачно използването не на паралелен тип регулатор, а на регулатор от последователен тип – фиг.3 и фиг. 4.



Фиг. 3 Паралелен регулатор

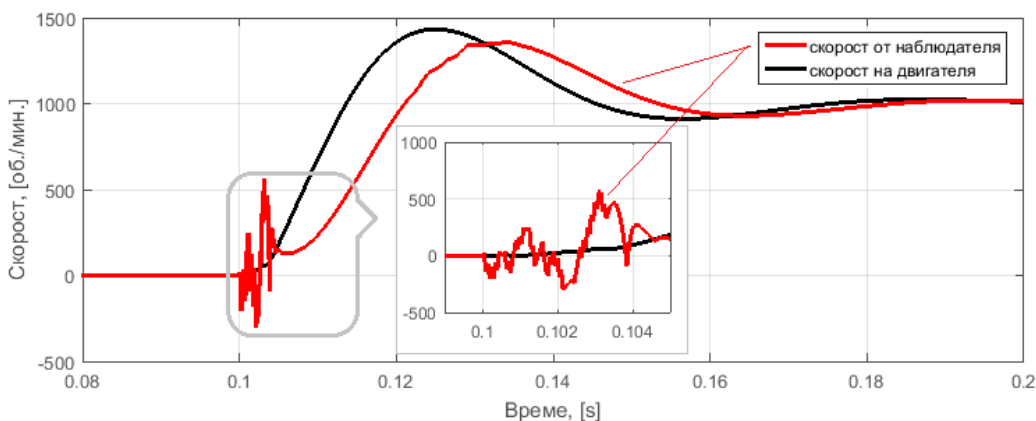


Фиг. 4 Последователен регулатор

При използването на последователен регулатор константата K_a влияе едновременно и на пропорционалната и на интегралната съставка. Константата K_b се определя на база на електрическата времеконстанта и веднъж настроена би следвало да не се променя. При необходимост от забързване или забавяне на регулаторите се борави единствено с K_a . При съвременните електрозадвижвания обикновено се въвеждат процедури за самодиагностика и определяне на необходимите параметри за управлението в стартова процедура, заложена в алгоритъма за управление. По-подробна и пълна информация за начина на определяне и влияние на параметрите на регулаторите е дадена в [5].

5. Параметри на наблюдателя

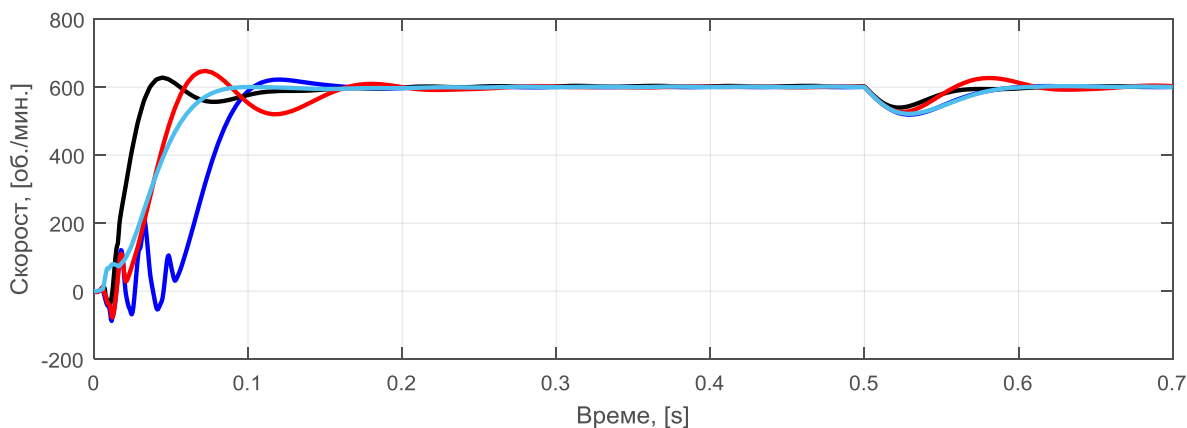
Основните проблеми при реализация на безсензорно управление са свързани със стартирането, динамиката и устойчивостта при ниски скорости. На фиг.5 е демонстрирано как изглежда скоростта, получена от наблюдателя и действителната скорост:



Фиг. 5. Скорост на двигателя и скорост, изчислена от наблюдателя – шум при ниски скорости

Начинът на настройка на скоростните регулатори също би следвало да бъде съобразен със задвижването, но в този случай времеконстантата на двигателя е механичната времеконстанта зависи не само двигателя, но и от присъединената инерционна маса на задвижвания орган, гъвкавостта на съединителя и динамиката на товара. Това значително усложнява настройката на задвижването

особено при стартовата процедура, където наблюдателят внася смущения в получения сигнал за ъгъл и скорост – фиг.5. В повечето случаи това налага специални мерки обикновено свързани с друг метод на работа при стартиране (най-често работа в отворена система без обратна връзка по скорост), с което се гарантира сигурно стартиране и включване на следящо токовото управление след това. Някои примери за стартиране без специална стартова процедура при различни настройки в наблюдателя са показани на фиг.6.



Фиг. 6. Стартиране и натоварване при различни настройки на наблюдателя

10. Заключение

Настройката на токовите и скоростните регулатори се оказва критична при безсензорно управление, което не е валидно в такава степен при класическо векторно управление. Именно в тази връзка обвързването на константите на регулаторите с параметрите на двигателя и тяхното по-точно определяне е от ключово значение при безсензорно векторно управление.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vas, P., “Sensorless Vector and Direct Torque Control”, Oxford University Press, 1998
- [2] Рац Е., Векторно управление на електрически машини, Авангард Прима, София 2010
- [3] Chou T.Y., Liu T.H., Cheng T.T., “Sensorless micro-permanent magnet synchronous motor control system with a wide adjustable speed range”, Electric Power Applications, IET , Volume: 6 , Issue: 6, 2012
- [4] Bobek, V., “PMSM Electrical Parameters Measurement”, Freescale Semiconductor Application Note, AN4680, Rev. 0, 02/2013
- [5] Wilson, D., “Teaching your PI controller to behave”, Texas Instruments, Web Series, 07/2015

Автори: Емил Рачев, гл. ас. д-р, катедра „Електрически Машини” при ТУ - София, *e-mail:* ehra@tu-sofia.bg; Владислав Петров, маг. инж., докторант в ТУ-София.