



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**Електротехнически факултет
Катедра „Електрически машини“**

Маг. инж. Владислав Емилов Петров

**БЕЗСЕНЗОРНО УПРАВЛЕНИЕ НА СИНХРОНЕН
ДВИГАТЕЛ С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2.Електротехника, електроника и автоматика

Научна специалност: Електрически машини

Научен ръководител: доц. д-р Пламен Ризов

Научен ръководител: гл.ас. д-р Емил Рачев

СОФИЯ, 2021г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електрически машини“ към Електротехнически Факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 03.11.2020 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 22.02.2021 г. от 15:00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед №: ОЖ-5.2-117 от 12.11.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. проф. д-р Захари Зарков – председател
2. проф. д-р Емил Рац
3. проф. д-р Ганчо Божилов
4. доц. д-р Пламен Ризов
5. доц. д-р Димитър Сотиров

Рецензенти:

1. проф. д-р Емил Рац
2. проф. д-р Захари Зарков

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет на ТУ-София, блок №12, кабинет № 12427

Дисертантът е редовен докторант към катедра „Електрически машини“ на Електротехнически факултет. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Владислав Петров

Заглавие: Безсензорно управление на синхронен двигател с постоянни магнити.

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Методите за безсензорно управление (управление без сензор за скорост на вала) на променливотокови двигатели са предмет на сериозно изследване през последните две десетилетия. Възможността за отстраняване на сензора за скорост е привлекателна не само от гледна точка на икономичност, но и от гледна точка на надежност на електрозадвижванията. Редица автори предлагат разнообразни подходи с прилагане на механизми за математическо определяне на скоростта и ъгълът на ротора. Често тези методи са сложни и изискват сериозни ресурси от вградените системи, в които се интегрират. Благодарение на рязкото развитие в микропроцесорната техника през последните 10-15 години, подобни вградени системи стават все по-достъпни от гледна точка както на цена, така също и от изобилие на съпътстващи инструменти за реализиране на програмното осигуряване. Всичко това, в съвкупност с постоянно завишаващите се изисквания към ефективността, дава основа за изследването в дисертационния труд. В работата са разгледани редица въпроси свързани с изграждане, симулиране и внедряване на алгоритъм за безсензорно векторно управление за синхронен двигател с постоянни магнити.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Целта на дисертационния труд е създаване на алгоритъм за безсензорно векторно управление за синхронни двигатели с постоянни магнити.

За постигане на целта на работата се поставят и следните **задачи**:

- Избор на подходящ наблюдател на положение и скорост;
- Избор на микропроцесор и среда за програмиране и симулации;
- Изграждане на симулационни модели на системата двигател-управление;
- Изграждане на умален лабораторен стенд, за ниско напрежение, за нуждите на разработката;
- Практическа реализация на безсензорно управление на база на избрания микропроцесор;
- Изследване на управлението и оптимизиране на стартовия процес, предвид основните проблеми на безсензорното управление при ниски скорости;
- Изграждане на алгоритъм, защитаващ задвижването при застопоряване на ротора.

Научна новост

1. Създаден е симулационен модел на безсензорно векторно управление на СДПМ със следящо-токов наблюдател за скоростта и позицията на ротора.

2. Предложен е подход за преобразуване на алгоритъма за безсензорно управление на СДПМ от симулационен модел към модел, подходящ за реализация на микроконтролери.

3. Проведен е анализ по отношение на влиянието на параметрите на двигателя върху работата на наблюдателя и токовия и скоростния регулатор и е предложена концепция за прилагане на следящо-токов наблюдател при синхронни двигатели с явнополюсна и неявнополюсна конструкция.

4. Създадена и интегрирана е процедура за осигуряване на плавно стартиране от нулева скорост с адаптивен преход от скаларно към безсензорно векторно управление на СДПМ.

5. Създадена и интегрирана е защитна функция за възстановяване на управлението след застопоряване на ротора на СДПМ при безсензорно управление.

Практическа приложимост

Разработеният алгоритъм с безсензорно векторно управление за СДПМ, е подходящ за задвижвания с товарна характеристика тип вентилатори, компресори и помпи. На база на разработената система е възможно алгоритъма за управление да бъде доусъвършенстван, с което приложимостта на задвижването да бъде разширена за множество различни по характер товари.

Апробация

Етапи от дисертационния труд са разглеждани и обсъждани на:

1. VI-th CONFERENCE OF FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING “EF 2014”

2. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)

3. X Научна конференция БулЕФ 2018, 2018, България, Созопол

4. 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)

5. 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 6 научни статии, от които 1 е самостоятелна и са публикувани в български и международни реферирани издания.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от 157 страници, като включва резюме, увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 100 литературни източници, като 96 са на латиница и 4 на кирилица. Работата включва общо 113 фигури. Номерата на фигурите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ОСНОВИ НА РАБОТАТА И ПРОУЧВАНЕ

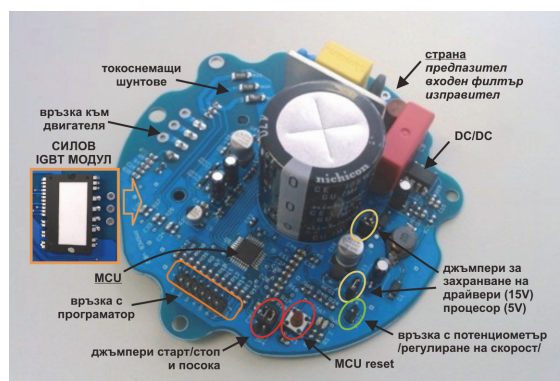
Основният проблем, поставен в дисертацията, е провокиран от предходна задача, в която се налага разработване на електрозадвижване с безсензорно векторно управление на СДПМ на база на специализиран микроконтролер и минимален хардуер. Целта е да се заменят досега използваните асинхронни двигатели във вентилаторна инсталация, с по-ефективни, синхронни двигатели с постоянни магнити – фиг. 1.1. Тъй като режимът на работа е непрекъснат в целият експлоатационен период на задвижването, става ясно че повишаването на ефективността чрез използването на по-ефективен двигател е естествена стъпка която води до високо качество и икономичност на бъдещи подобни инсталации.

Замяната със СДПМ обаче налага използването на управляваща електроника със специализиран алгоритъм за управление. Основните изисквания, които бяха поставени към тази електроника са:

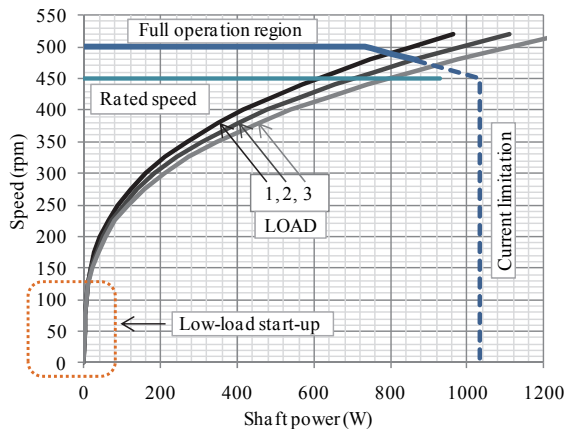
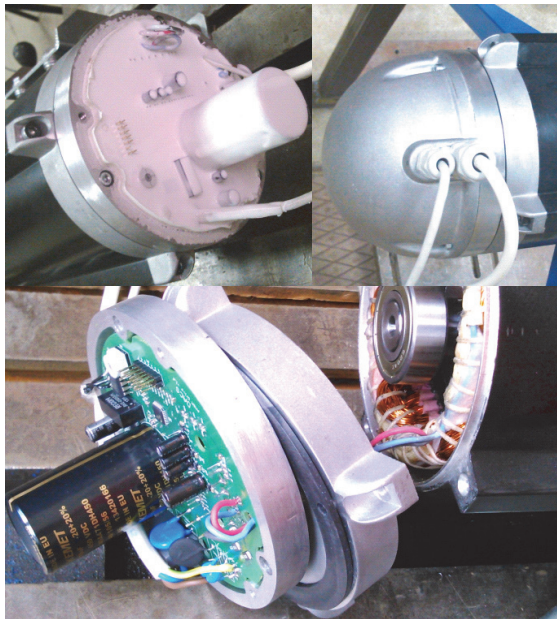
- минимална цена, което налага работа без сензор за скорост на вала;
- работа в мощностен диапазон до 550W, с възможност за претоварване до 900W;
- минимален размер и възможност за вграждане в двигателя, което определи и решението да се използва вграден силов модул вместо дискретно изпълнен инвертор – фиг. 1.2.;
- работа при максимална ефективност в целият диапазон на натоварване, което е реализирано чрез използването на алгоритъм за безсензорно векторно управление;
- надеждност, което включва необходимите токови защиты, защита от пренапрежения, както и галванична изолация на входовете даващи задания за старт/стоп, посока на въртене и задание за скорост. Електрониката трябва да е и механично защитена от влага и работа в среда с висока киселинност. Това налага използването на специален компаунд, с който електрониката се залива, след като е монтирана в двигателя – фиг. 1.3



Фиг 1.1. Промислен вентилатор с мощност 550W



Фиг. 1.2. Прототипен вариант на преобразувател за вграждане в двигателя



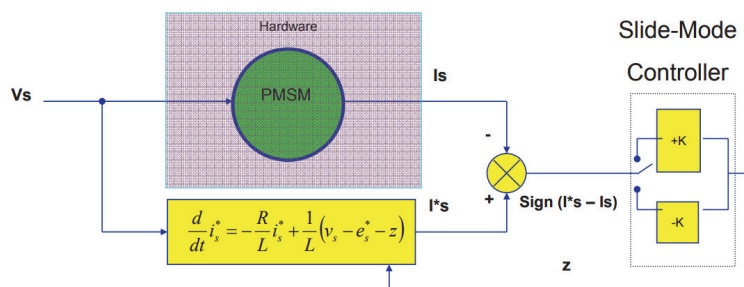
Фиг. 1.3. Преобразувател, вграден в двигател, характеристики на товара и зона на работа на задвижването

Това направи разработеното електрозадвижване невъзможно за производство в текущия си вид. Освен че е необходимо да се избере нов микроконтролер и да се пренапише софтуера отначало, е нужно да се преработи и голяма част от хардуера в зависимост от наличната периферия на избрания контролер. Това очерта две възможни посоки – *смяна с друг аналогичен продукт* или *реализация на отворен алгоритъм за наблюдателя и управлението, който лесно може да се прехвърля на различни микроконтролери*. Така описаният проблем поставя въпроса за проучване на възможните решения за създаване на алгоритъм за безсензорно векторно управление, приложим във вентилационни системи, за компресори и помпи, реализиран в отворен код и в подходяща среда, с оглед лесно прехвърляне на вградения софтуер за микропроцесора на продукти на различни производители.

В използваният микроконтролер на фирма *Fairchild Semiconductor*, предварително е реализирана рамка за векторно управление (във второ физическо ядро на процесора), както и два метода за безсензорно определяне на скоростта и ъгълът на ротора. Използването на този микроконтролер позволи бързото разработване на софтуер, тъй като голяма част от алгоритъма за същинското управление е вече наличен, при това на ниска цена. Освен това в пакетът за разработване на софтуер, MCDS (Motor Control Development System), има и редица инструменти, които спомагат за бързата настройка на параметрите в наблюдателя, процедурата по първоначално ориентиране на ротора, първоначалното развъртане и др.

Основен проблем, явил се на следващ стадий от разработката, бе свързан с обстоятелството, че фирмата производител на микроконтролера *Fairchild Semiconductor*, продаде микроконтролера на друга фирма, която го използва само за фирмени цели и процесорът изчезна от пазара.

Един от най-успешните и практично приложим вариант на адаптивен наблюдател е следящо-токово управление, работещо с опростен модел на двигателя и използване на релеен регулатор – SMO (Sliding-Mode Observer). SMO наблюдателят е много подобен на MRAS, но използва по-проста математическа основа, както и релеен регулатор. SMO базирано безсензорно управление прилагат почти всички фирми на пазара – Texas Instrument, Microchip, Infineon, Freescale (и двете вече собственост на NXP), Fairchild и др. Характерно за токовият SMO наблюдател е, че сравнява директно токовете на двигателя, трансформирани в статична координатна α, β система, с токовете получени от адаптивен модел на машината.



Фиг. 1.16 – Следящо-токово управление

Изводи

Глава 1 е разделена на две части. В първа част е поставена основата на проблема. Разгледана е предходна за дисертационния труд разработка на безсензорно векторно управление на СДПМ за промишлена вентилация. Представени са експериментални резултати, които уточняват изискванията към електрозадвижвания за подобен тип проложения. Необходимостта от разработката изложена в дисертационният труд, произлиза от редица фактори, свързани с недостатъци в работата на използваният алгоритъм. Освен това, допълнителна предпоставка за реализирането на цялостен алгоритъм за управление, произтича от фактът че използваният микроконтролер, с вграден, но заключен алгоритъм за безсензорно управление, бива изтеглен от пазара. Във втора част от Глава 1 е направено проучване на някои от методите използвани за безсензорно управление на електрически машини с постоянни магнити. Обърнато е внимание на методи, които са често използвани от големи производители. В допълнение е проучена и научната литература във връзка с ключови етапи от внедряването на алгоритъм за безсензорно векторно управление. Тези етапи включват първоначална ориентация на d-q координатната система, стратегии за плавно стартиране с различни алгоритми, включително и скаларно, без обратна връзка по скорост. На база на направеното проучване, е взето решение за целите на работата да бъде реализирано безсензорно векторно управление със следящо-токов наблюдател - SMO. За първоначална ориентация на ротора е използвана стратегия, с прилагане на статичен пространствен вектор на тока. За да се изпълни изискването за плавно стартиране, със задание тип рампа, е разработен втори алгоритъм, базиран на скаларно управление, без обратна връзка по скорост, тип U/f.

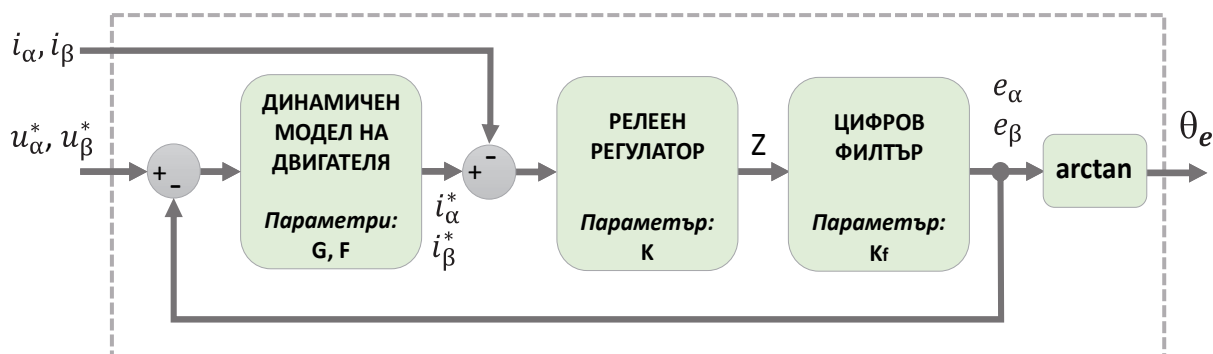
ГЛАВА 2 - БЕЗСЕНЗОРНО ВЕКТОРНО УПРАВЛЕНИЕ СЪС СЛЕДЯЩО-ТОКОВ НАБЛЮДАТЕЛ

В настоящата глава от работата е представено векторно управление с прилагане на следящо-токов наблюдател с релеен регулатор – SMO (Sliding-Mode Observer). В хода на изложението са представени симулационни изследвания в среда MATLAB/Simulink. Подчертано важна характеристика на Глава 2 е подход за реализация на симулационен модел на управлението, използващ математически апарат, възможно най-близък до приложимия към сигналния процесор. След установяване на достоверност на симулационните резултати, в следващите глави от работата програмните модели се използват за синтезиране на подходящи техники за овладяване на стартовия процес, старт по рампа и защита от застопорен ротор.

Направеното проучване показва, че един от най-приложимите, както и третиран в литературата подходи за безсензорно управление на СДПМ е с прилагане на следящо-токов наблюдател с релеен регулатор – SMO. Това насочва и началото на работата в търсене на подходящ вариант за реализация на SMO безсензорно управление, като първите задачи са намиране на подходяща среда за изграждане на софтуера за управление и подходящ микропроцесор. Логично, би следвало да се избере микроконтролер и да се използва собствената му среда за изграждане на вградения софтуер. Тук обаче се намесва и фактора, че в хода на изследването неминуемо ще се прибегне до необходимостта от симулационни изследвания. Тогава най-удачно би било изграждане на софтуера за микроконтролера и симулациите да стават в една и съща среда.

Средата MATLAB/Simulink се разви значително в последните години, като едно от основните и преимущества са интегрираните инструменти за генериране на вграден софтуер за голям брой микропроцесори, налични на пазара. Въпреки, че в MATLAB са налични пакети за работа с всички по известни производители на микропроцесори, в хода на проучването става ясно, че процесорите от серия C2000 на Texas Instruments, специализирани за управление на електрически двигатели, е едни от най-развитите на пазара. Разбира се и други производители предлагат подходящи процесори, но предимството в последните версии на серията C2000 е наличието на интегрирания наблюдател InstaSPIN. Това дава възможност за добра база за сравнение в хода на работата.

Наблюдателят на скоростта и положението на ротора е представен с блокова схема на фиг. 2.7. 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. 2.7. Принципната блокова схема на реализирания наблюдател

Динамичният модел на двигателя работи на база на напрежението на двигателя. Особеното в случая е, че това напрежение не се налага да бъде измервано директно, а се използват заданията в α - β координатна система. Напрежения u_α^* и u_β^* се подават към модула за реализация на пространствено-векторна модулация. След съответните хардуерни настройки, на практика сигналите се подават директно към драйверите на силовите транзистори. Може да се счита, че зададеното напрежение u_α^* , u_β^* съответства на напреженията u_α , u_β , които биха могли да се получат при измерване на фазните напрежения на двигателя и трансформирането им с трансформацията на Кларк. При директно измерване на напреженията се получават и други нежелани ефекти – шумове, необходимост от използване на филтри, който внасят неминуеми амплитудни и фазови грешки, както и като цяло проблемното измерване на широчинно-импулсно модулирано напрежение. Въпреки това трябва да се отчете, че директно зададените напрежение u_α^* , u_β^* не отчитат някои ефекти свързани с превключването на транзисторите и деформирането на линейното напрежение към машината. В голяма част от случаите (особено при високоволтови инвертори с IGBT транзистори) е редно тези ефекти да се имат предвид и да се отчетат, преди подаването на напреженията към наблюдателя.

Динамичният модел на двигателя сравнява напреженията u_α^* , u_β^* с изхода на наблюдателя (след цифровия филтър – фиг.2.7.), който се явява електродвижещото напрежение, с неговите съставки по осите α - β - e_α , e_β .

Целта на това да се определя електродвижещото напрежение произтича от следните уравнения:

$$e_\alpha = -\psi_f \omega_e \sin(\theta_e) \text{ и } e_\beta = \psi_f \omega_e \cos(\theta_e) \Rightarrow \theta_e = \arctan\left(\frac{-e_\alpha}{e_\beta}\right). \quad [2.14]$$

Според горните уравнения електрическият ъгъл на ротора, от който може да се определи ъгловото му положение, а от там и скоростта се определя директно от електродвижещото напрежение, получено от наблюдателя.

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

$$I_s(n+1) = FI_s(n) + G(U_s(n) - E(n)), \quad [2.15]$$

където

$$I_s = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, U_s = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}. \quad [2.16]$$

$$F = e^{-\frac{R_s t_s}{L_s}}, \quad G = \frac{1}{R_s} \left(1 - e^{-\frac{R_s t_s}{L_s}} \right) \quad [2.17]$$

В горните уравнения: R_s – активно съпротивление на статорната намотка; L_s – осреднена статорна индуктивност (приведена към α - β координатна система); t_s – време на дискретизация.

Параметрите на двигателя могат да се определят по няколко различни подхода, като е приета методика, предложена в литературата, даваща отлични резултати. Начинът на определяне на параметрите, необходими за наблюдателя е представен в Глава 3, като е отелено внимание и на влиянието на параметрите върху алгоритъма за управление.

Определянето на електродвижещото напрежение става на база на релейния регулатор, с коефициент на усилване K . Изходът Z на релейния регулатор е:

$$Z(n+1) = K \text{sign}(I_s^*(n) - I_s(n)), \quad [2.18]$$

където

$$I_s^* = \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix}, \quad I_s = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad \text{sign} = \begin{cases} 1 & \text{при } (I_s^* - I_s) > 0 \\ 0 & \text{при } (I_s^* - I_s) = 0 \\ -1 & \text{при } (I_s^* - I_s) < 0 \end{cases} \quad [2.19]$$

За коефициент K често се избират високи стойности, като целта е максимално бързо да се коригират големи грешки в изчислението на ЕДН. След намаляването на грешката под определена стойност (5-10%), коефициент K може да бъде драстично намален.

След релейния регулатор е изпозван цифров нискочестотен филтър, с уравнение:

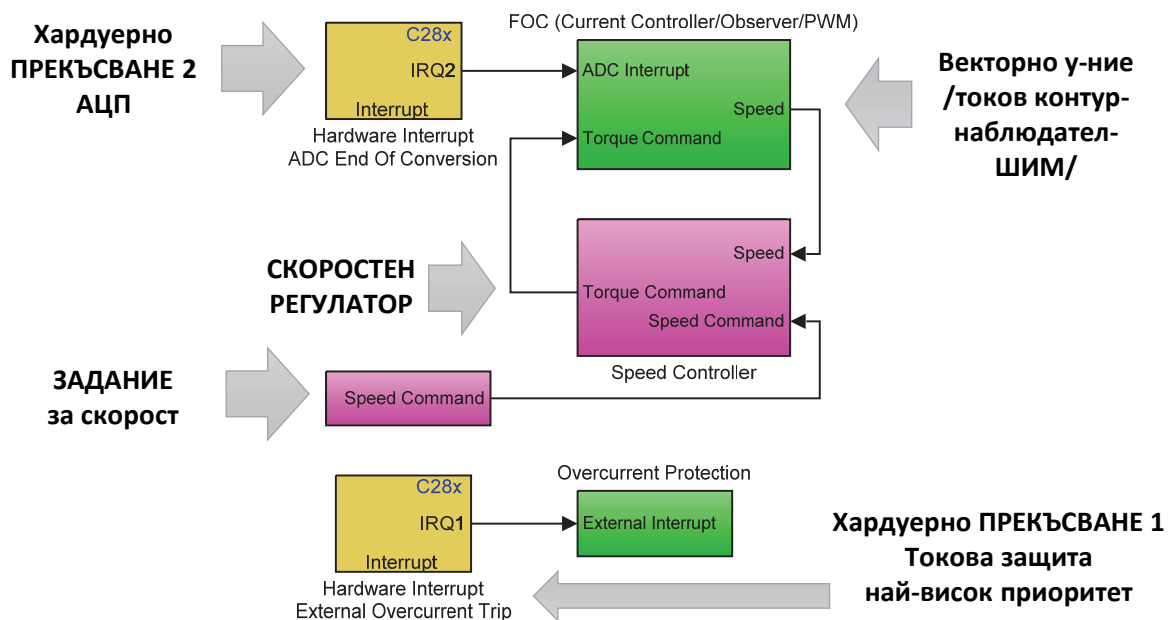
$$E(n+1) = E(n) + 2\pi f_0 (Z(n) - E(n)),$$

където f_0 е граничната честота на филтъра.

Програмна реализация с перспектива за реализация на микроконтролер

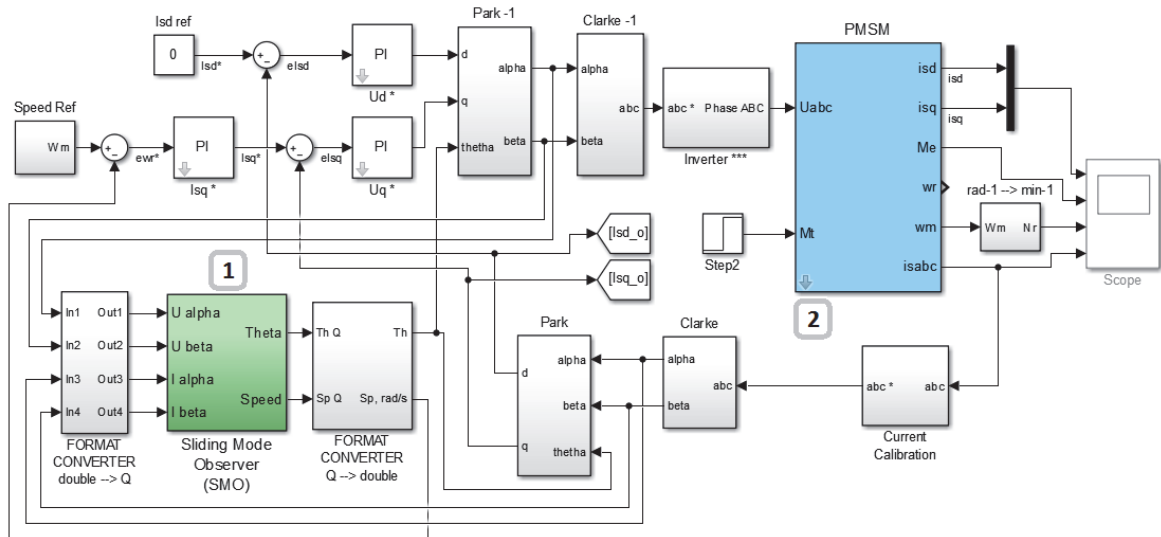
Стратегията в конкретиката на настоящата работа е да се създаде модел на описаното в точка 2.4. управление, като наблюдателя от Simulink се прехвърли директно във вида си предназначен за генериране на програмен код и се интегрира в симулационен модел на системата управление-двигател в Simulink. За тази цел трябва да се направи една *адаптация на математическия апарат, предназначена за генериране на програмен код за микроконтролера и програмното моделиране в Simulink.*

Използването и преобразуването на програмен модел към софтуер за вградена система налага определени трансформации в алгоритъма за управление свързани с начина на работа на микропроцесора – обвързване на работата на аналогово-цифровите преобразуватели (АЦП) с честотата на ШИМ (широчинно-импулсна модулация); генериране и приоритет на прекъсванията и др. На фиг.2.14. е показан общ вид на програмен модел реализиран в Simulink, който е готов за програмиране във вградена система.



Фиг.2.14 MATLAB/SIMULINK като среда за генериране на програмен код

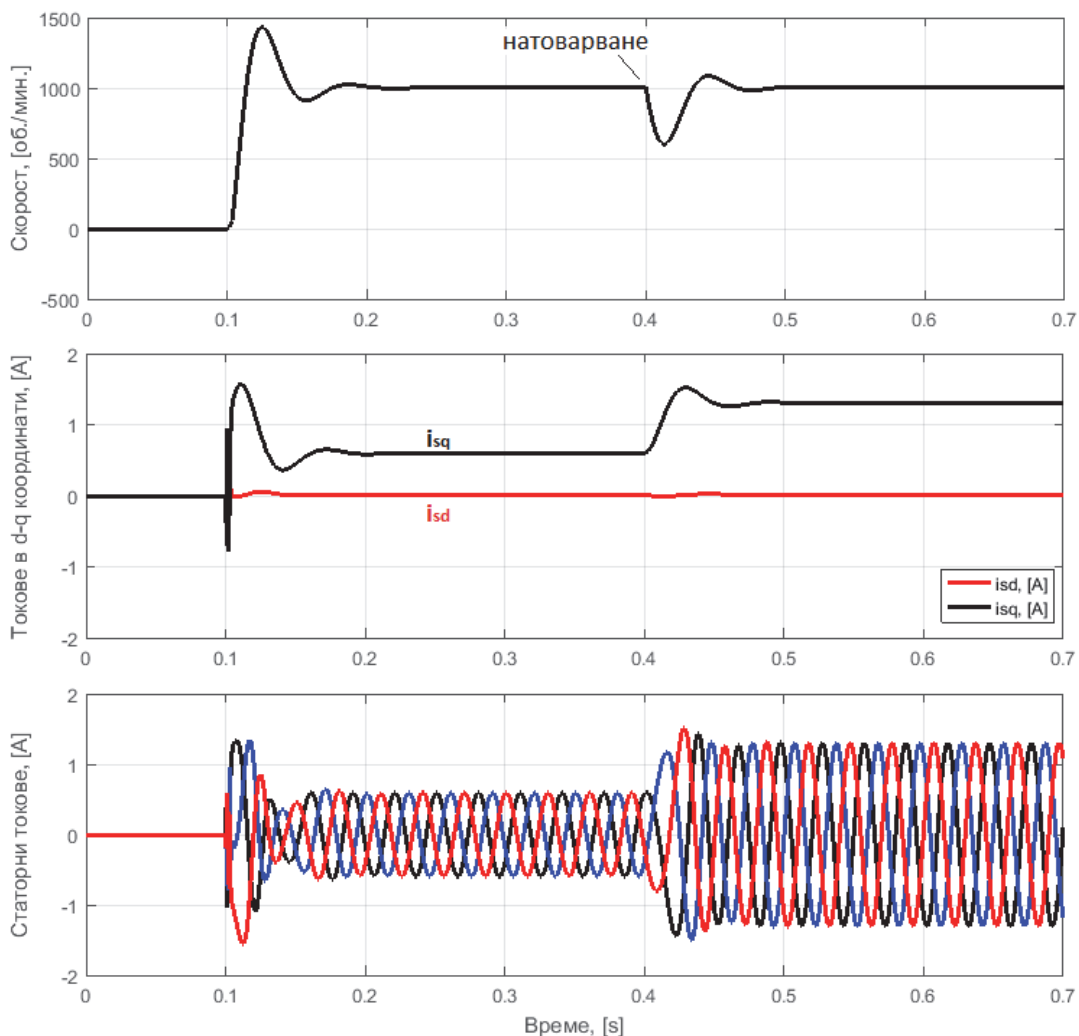
Програмният модел на безсензорно векторно управление е показан на фиг. 2.19. В модела е интегриран наблюдателят, който работи в управлението, описано в точка 2.4. Особеното е, че тъй като се използва микропроцесор с формат на числата с фиксирана запетая, математическите операции, се осъществяват в т.н. „Q“ формат.



Фиг. 2.19. Програмен модел в SIMULINK на безсензорно векторно управление с наблюдател на ъгъла и скоростта на ротора

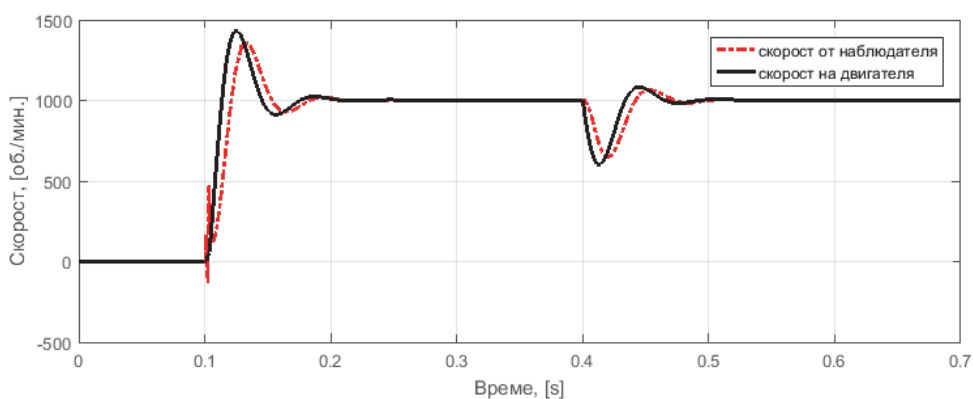
За тази цел в програмния модел представен на фиг. 2.19., преди и след наблюдателя „1“ са добавени блокове за трансформация на величините от математическия модел, реализиран с математическите инструменти на Simulink. Освен това, за да се имитира работа на алгоритъма на управление в относителни единици, както е на действителната хардуерна платформа, е добавен блок за калибриране на токовете, отнесени към максималният ток. Това се отнася и за всички останали величини – задания за скорост, напрежение и ограничения на регулаторите. Това гарантира, че настройките в токовете и скоростните регулатори са идентични на тези в реалното управление.

Симулационни резултати от модела, представен на фиг. 2.19. са показани на следващите фигури. На фиг. 2.20 е показан преходният процес по развъртане на двигателя, установяване на скоростта и натоварването. Показани са скоростта, съставките на статорния ток в координатна система **d-q**, ориентирана по ротора на двигателя и трите фазни статорни тока. Както се вижда от фиг. 2.19. съставката на тока по оста **d** се поддържа около нулата, като има известно разколебаване в преходния процес. Пререгулирането на фиг. 2.20. е сравнително голямо, което се дължи на малкия инерционен момент на двигателя, като не е взета под внимание инерционната маса и присъединената към двигателя механика. По същественото в случая е доближаване на поведението на симулационния модел до това на действителното управление.

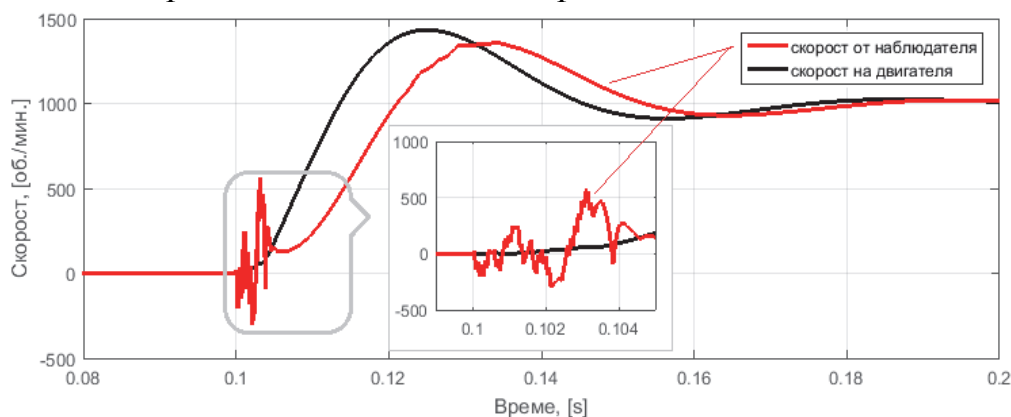


Фиг. 2.20. Симулационни резултати от програмния модел в SIMULINK на безсензорно векторно управление с наблюдател на ъгъла и скоростта на ротора

Както бе многократно споменато в работата, по същество основният проблем на методите за безсензорно управление остава устойчивата работа и динамика при ниски скорости и скорости около нулата. В тази връзка на фиг. 2.21. и фиг. 2.22 е показана скоростта на двигателя и скоростта, която изчислява наблюдателя. Може да се забележи, че в областта на ниските скорости наблюдателя създава известни грешки, под формата на шум в сигнала за скоростта. Това води до влошаване на динамиката на електрозадвижването. От съществено значение за преодоляване на тези проблеми е правилната настройка на параметрите на наблюдателя. Голямо влияние върху динамичните качества оказва и настройката на скоростните и токовите регулатори, въвеждането на подходяща, задължително бърза рампа на ускорение на заданието за скоростта при чисто SMO управление и други.



Фиг. 2.21. *Скорост на двигателя и скорост, изчислена от наблюдателя*



Фиг. 2.22. *Скорост на двигателя и скорост, изчислена от наблюдателя – шум при ниски скорости*

Изводи към „Глава 2“

Изследването, описано в Глава 2, е изцяло симулационно. Като важен резултат, с претенция за принос, може да се отбележи, че изграденият и моделиран алгоритъм на наблюдателя на положение и скорост е напълно приложим за реализацията на микропроцесор. Изводите по отношение на работоспособността на алгоритъма в симулационна среда имат за цел да насочат внимание на работата в недостатъците на алгоритъма и мерките за тяхното преодоляване.

Основните проблеми, които се забелязват в етапа на симулационното изследване са свързани с работата в областта на ниските скорости, както и в динамичното поведение на задвижването. Очертават се също проблеми, свързани с настройката на токовете и скоростните регулатори, които се изразяват в по-тесен диапазон на изменение на възможните параметри за осигуряване на устойчива работа. Като цяло изследвания наблюдател позволява по-малка възможност за реализиране на висока динамика спрямо векторно управление със сензор, което обаче не би следвало да се окаже критично, предвид конкретиката на приложението – задвижвания с вентилаторна характеристика на товара.

ГЛАВА 3 – ХАРДУЕРНО ВНЕДРЯВАНЕ НА АЛГОРИТЪМ ЗА БЕЗСЕНЗОРНО ВЕКТОРНО УПРАВЛЕНИЕ

Основна задача в работата е избор на подходяща среда за реализация на софтуера за микроконтролер. В Глава 3 е представено изграждане на софтуерната част в средата на MATLAB/Simulink, като е използван процесор на фирма Texas Instruments от серия C2000. Основните причини за избора на Simulink, като основна среда за работа са няколко, по-важните от които са:

- една и съща среда за симулация и изграждане на вграден софтуер;
- софтуерна поддръжка за работа с хардуер и по-специално специализирани в областта на електрозадвижванията микропроцесори на различни фирми;
- богата поддръжка с конкретни примери, както за симулация, така също и за хардуерна реализация.

Изборът на процесор на фирма Texas Instruments се определя от факта, че един от най-комплексните алгоритми за безсензорно векторно управление е интегриран в последните процесори от серия C2000. Наблюдателят, с търговско наименование InstaSPIN[®], е **патентован и „заклучен“ в паметта на процесора**. Въпреки това, наличието на алгоритъма дава възможност за сравнение в процеса на работа по дисертацията, с актуален продукт с доказани качества.

При безсензорно векторно управление индуктивността на машината участва както в наблюдателя за определяне на позицията и скоростта на ротора, но и при определяне на константите на регулаторите в управлението. При вградени магнити индуктивността, измерена през статорната намотка на машината, зависи от положението на ротора. От позицията на управлението на машината е важно не само коректното определяне на индуктивността, но и търсенето на практичен метод за нейното измерване.

Индуктивностите L_{sd} и L_{sq} са комплексни параметри, зависещи от отделните фазни индуктивности на машината. Един от начините за дефиниране на L_{sd} и L_{sq} е чрез стойността на индуктивността между две линии на машината, при свързка звезда:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos\left(2\theta_e + \frac{\pi}{3}\right), \quad [3.1]$$

където θ_e електрическият ъгъл на ротора.

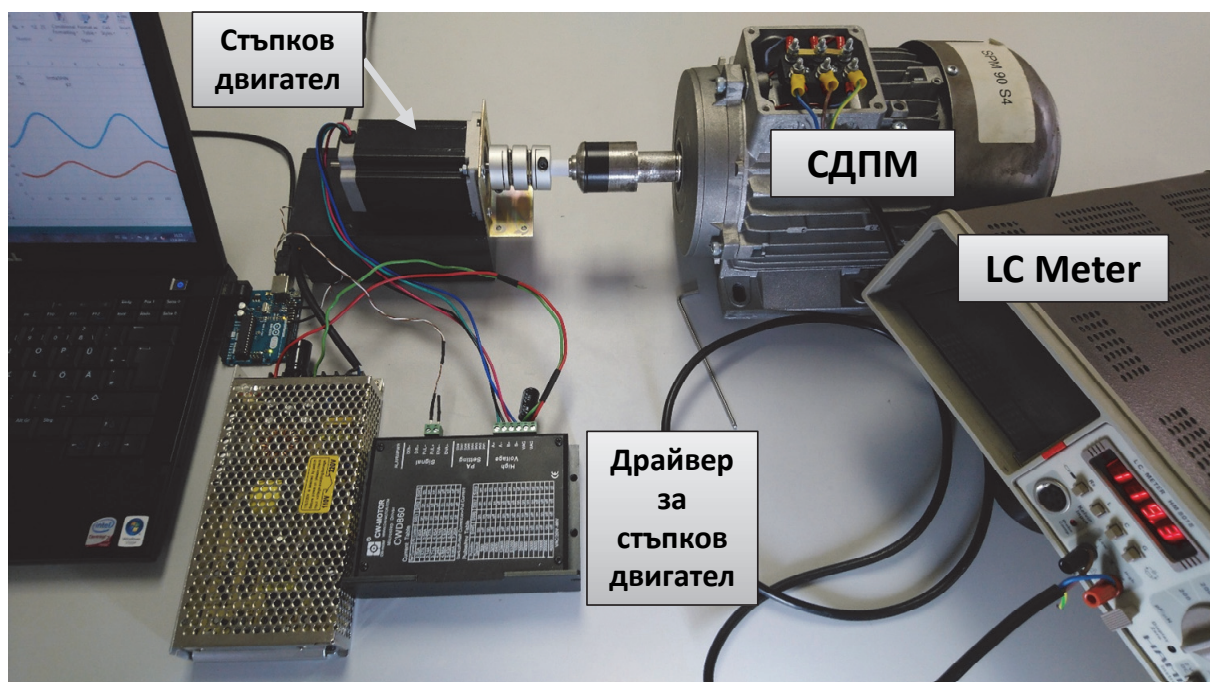
При повърхностни магнити, неявнополюсна конструкция:

$$L_d = L_q = \frac{L_{ab}}{2}. \quad [3.2]$$

При вградени в ротора магнити, явнополюсна конструкция:

$$L_d = \frac{\min(L_{ab})}{2}; \quad L_q = \frac{\max(L_{ab})}{2}. \quad [3.3]$$

Направено е сравнение между определянето на индуктивността с висок клас уред за измерване на индуктивността и определянето ѝ на база на вграден алгоритъм в развоен инвертор, базиран на опита на празен ход. Опитната постановка за провеждане на опита за измерване на разпределението на индуктивността при различни положения на ротора е показана на фиг. 3.5. Синхронен двигател с вътрешно разположени в ротора магнити е куплиран със стъпков двигател, който се управлява с подходящ драйвер. При преместване на ротора на определен ъгъл се измерва индуктивността на намотката в различни конфигурации.

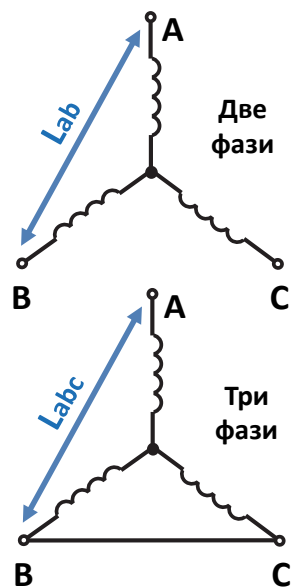


Фиг. 3.5. - Определяне на индуктивността при различни положения на ротора на синхронен двигател с вградени в ротора магнити

С използването на уравнения (3.3) и (3.4) и данни от направени измервания е съставена таблицата на фиг. 3.8, като са изчислени индуктивностите по надлъжната и напречната ос на полето, както и средните стойности. Дадени са също и стойностите измерени с развоен инвертор на Texas Instruments, както и проектните данни от CAD софтуера за проектиране на двигателите, дадени от проектанта.

Анализът на данните от фиг.3.8 показва, че индуктивността получена при захранване на две или три фази, има малка разлика. По интересно е, че средната стойност на индуктивността, получена от инвертора на TI е много близка до получените стойности от измерването с уред. Това може да се използва като основание да се смята, че методът е коректен

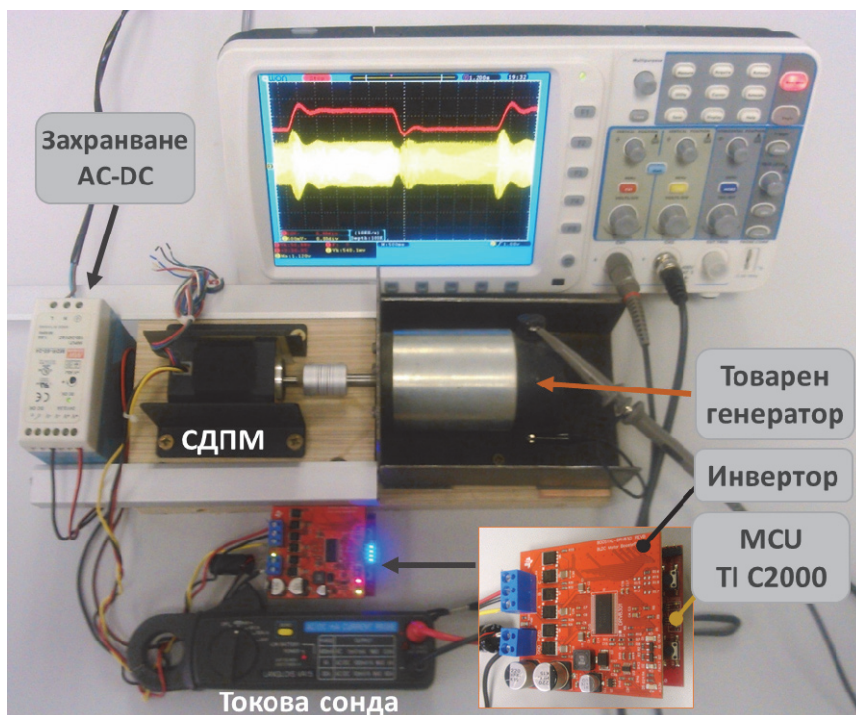
Две фази		Три фази	
Lab min	Lab max	Labc min	Labc max
[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
101	168,8	72	123,3
Ld	Lq	Ld	Lq
[mH]	[mH]	[mH]	[mH]
50,5	84,4	48	82,2
Средно		Средно	
67,45		65,1	
Измерване с InstaSPIN®			
	Ld=Lq *	67	mH
По проектни данни за двигателя			
	Ld	Lq	
	[mH]	[mH]	
	55	96	



Фиг. 3.8. - Данни за индуктивностите по осите на полето и осреднени стойности

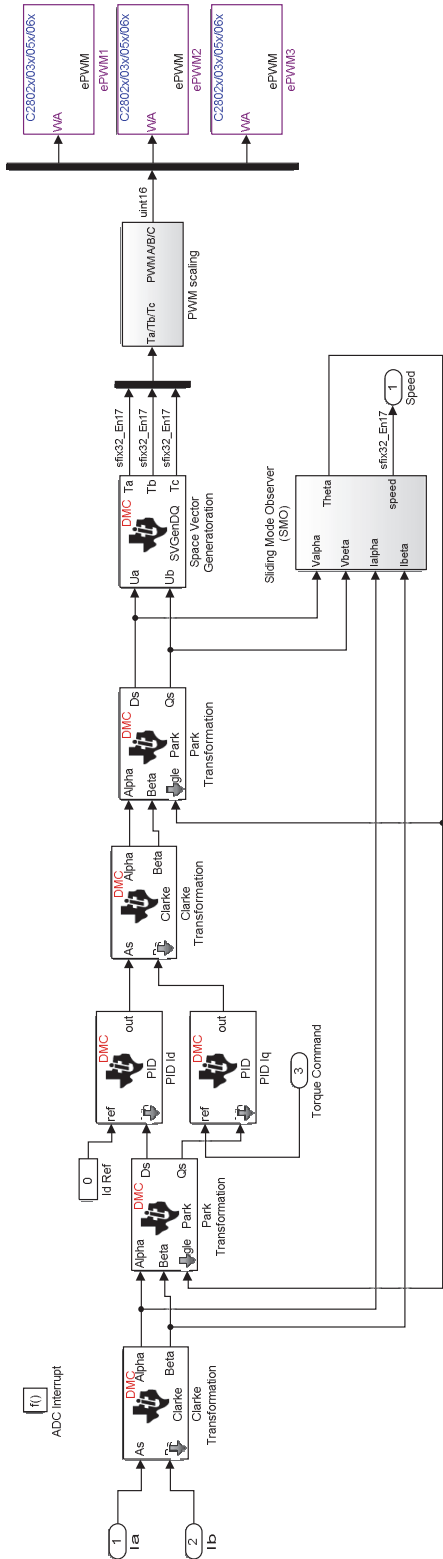
Внедряване на алгоритъма в микроконтролер

На база на направените изследвания и избран хардуер, е реализиран стенд за верификация на алгоритъма за безсензорно управление фиг.3.31.

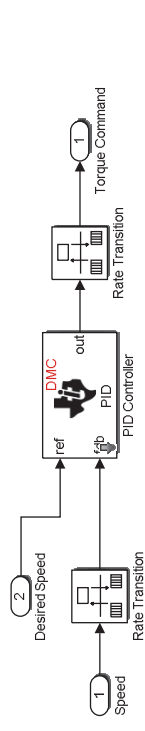


Фиг. 3.31. Снимка на реализирания стенд за управление на двигател за ниско напрежение

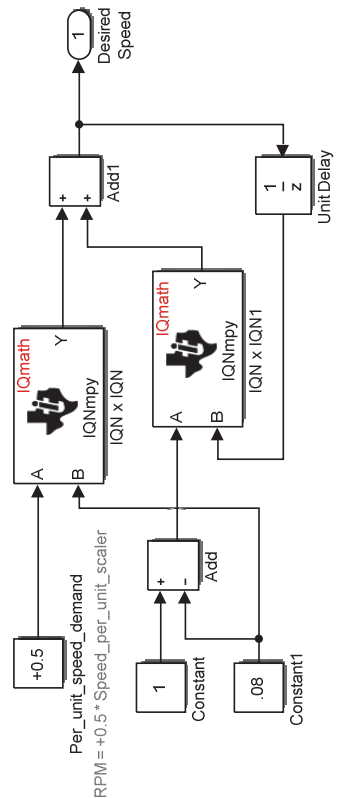
Блоквата диаграма на алгоритъма е представена на фиг.2.14. Основните подсистеми преработени във вид, подходящ за микроконтролер, са показани на фиг.3.32, фиг.3.33 и фиг.3.34. Токовият контур, заедно с наблюдателя работят с честота на ШИМ (20kHz), а подсистемата е обвързана, и се изпълнява, след като конверсията на АЦП приключи. Скоростният контур, от друга страна работи с много по-ниска честота – 100Hz



Фиг.3.32. Токов контур, Наблюдател на скорост и генериране на ШИМ

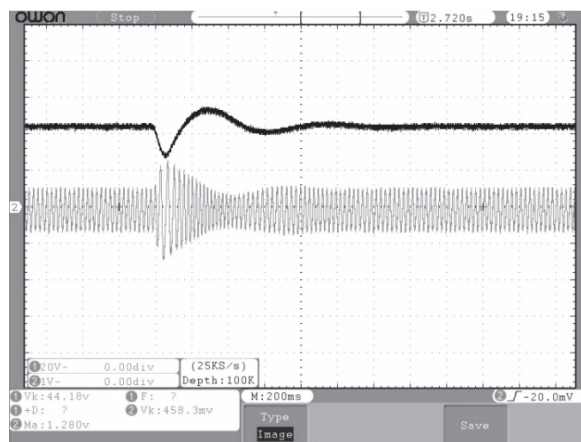
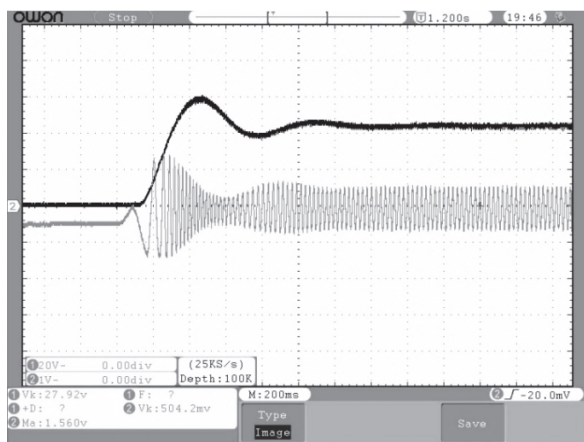


Фиг.3.33. Скоростен контур



Фиг.3.34. Задание за скорост и цифров филтър

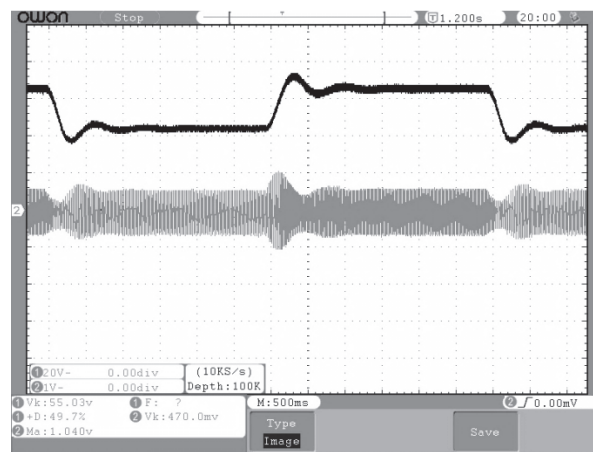
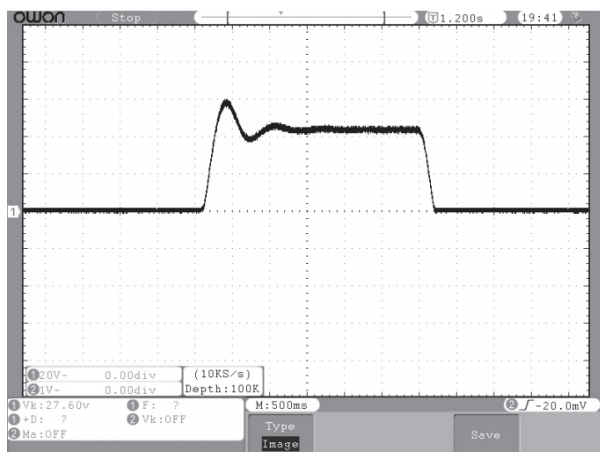
Осцилограми, демонстриращи качествата на управлението са представени на следващи фигури. Различните експерименти, които включват реакция на задание старт и старт/стоп (фиг.3.35а, фиг.3.36а), кратковременно натоварване и разколебаване на системата (фиг. 3.35б), промяна в заданието за скорост (фиг.3.36б), рязко и плавно натоварване (фиг.3.39), имат за цел да потвърдят устойчивата работа на управлението в един малък по мащаб и удобен за развойна работа стенд



а. Стартиране на двигателя

б. Моментно, кратковременно натоварване

Фиг. 3.35 Скорост (черно) и фазен ток (сиво) на СДПМ при безсензорно векторно управление

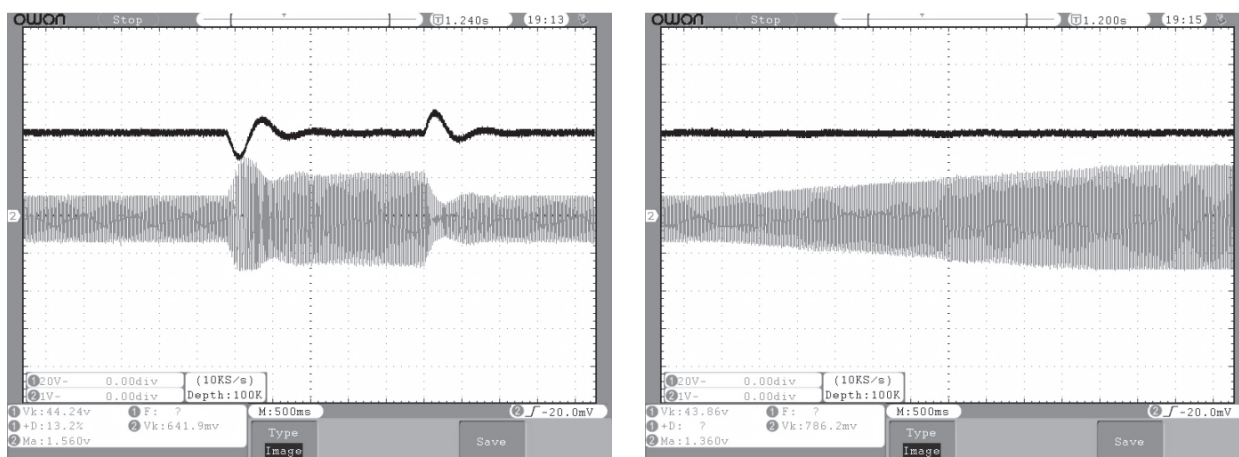


а.) старт/стоп

б.) задание с различни скорости

Фиг. 3.36 - Скорост (черно) и фазен ток (сиво) на СДПМ при безсензорно векторно управление – старт/стоп и променливо задание за скорост при празен ход

От фиг. 3.39 се вижда, че управлението поддържа устойчиво зададената скорост независимо от типа на натоварване – скокообразен или плавен.



а.) рязко натоварване

б.) плавно натоварване

Фиг. 3.39. Натоварване при безсензорно векторно управление на СДПМ - скорост (черно) и фазен ток (сиво)

Изводи към „Глава 3“

В Глава 3 програмният модел за безсензорно векторно управление на СДПМ е успешно доразвит във вариант, подходящ за програмиране на микроконтролер. Направени са експериментални изследвания които показват сходимост на практическата реализация със симулационният модел. В допълнение е разгледан и метод за определяне на необходимите за наблюдателя и токовете регулатори параметри на машината, като е направено сравнение между машина с явнополюсна и с неявнополюсна конструкция. Разгледани са и ключови елементи в реализацията на подобен алгоритъм - пространствено-векторна модулация, избор на конфигурация на ПИ регулаторите и определяне на параметрите им, хардуерен подбор за реализиране на управлението в лабораторен стенд за ниско напрежение.

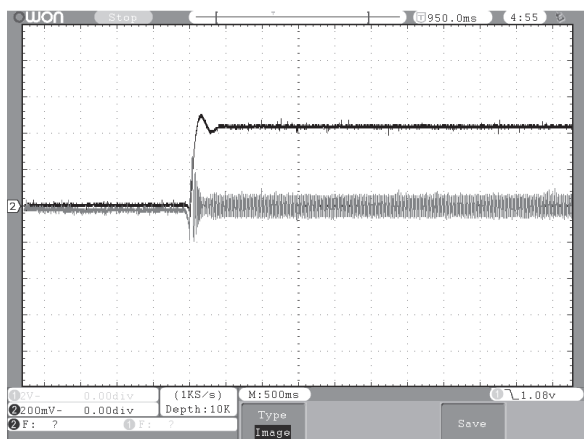
Основен недостатък на реализираното управление е че, както многократно беше споменато, съществуват редица проблеми в работата при ниски скорости, което се отразява още по съществено при задания за стартиране различни от стъпково. Друг недостатък е, че при така изграденият алгоритъм, ако настъпи голямо кратковременно претоварване или застопяване на ротора, по някаква причина, задвижването губи управляемост и се налага ръчното му рестартиране. Това от своя страна е абсолютно недопустимо в практическо приложение и тези въпроси са подробно разгледани в Глава 4.

ГЛАВА 4 – ИНТЕГРИРАНЕ НА СТАРТОВА ПРОЦЕДУРА И ЗАЩИТА ОТ ПРЕТОВАРВАНЕ НА ДВИГАТЕЛЯ

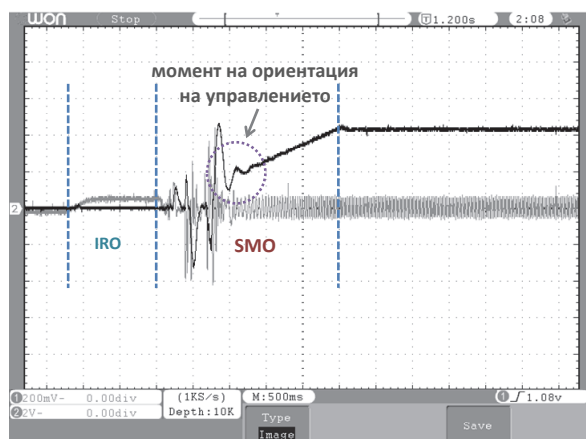
Една от основните функционалности на електрозадвижванията е управление на рампите на ускорени и спиране. В практиката е въведено понятието *рампа* на скоростта или *старт/стоп по рампа, задание по рампа*, което означава плавно, в повечето случаи линейно, нарастване на скоростта до установяване на заданието. Разбира се има различен вид рампи, с различна нелинейност според изискванията на товара, но в общия случай осигуряването на устойчиво стартиране на двигателя по линейно нарастване на заданието дава отлични резултати, имайки предвид, че в голям брой приложения работния орган не би следвало да се стартира рязко.

В Глава 4 са предложени две процедури – устойчиво и плавно стартиране, по рампа, с преход между скаларно и векторно управление и защита на алгоритъма от застопоряване на ротора. В първата част на Глава 4 е направен анализ на проблема с плавен старт при безсензорно управление с приложеният в работата наблюдател на положението и скоростта на ротора. Основно решение за плавен старт, по рампа, е комбинация на алгоритъм без обратна връзка по скорост със скаларно управление тип U/f , с превключване към безсензорно векторно управление над определена скорост. Изследванията обаче показват, че директният преход води до неминуеми преходни процеси, като в работата е проведен анализ по отношение на причините за тяхната поява. Ефектът се наблюдава в налични на пазара решения. Предложен е и е реализиран алгоритъм за плавен преход между стартовата процедура и алгоритъмът за безсензорно управление, който гарантира плавен старт с повторяемост на процеса. В края на работата е демонстрирана защитата от застопоряване на ротора, която възстановява работата на задвижването, в условия извън стартовата процедура

Старт по рампа при следящо-токово управление

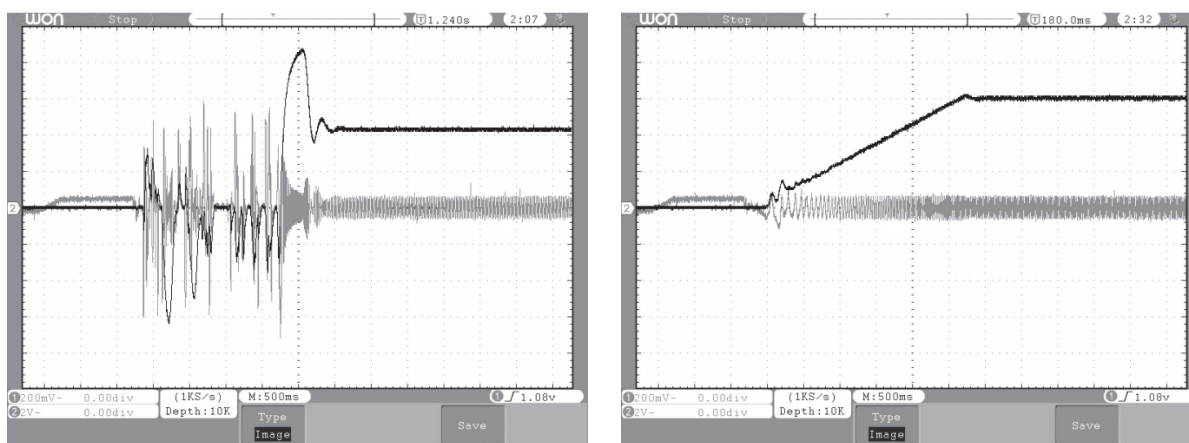


4.3 а.) директен старт



4.3 б.) старт със задание по рампа

Директното задаване на старт и старт по рампа при прилагане на SMO управление е демонстрирано на осцилограмите на фиг. 4.3. Трябва да се отбележи, че настройките на алгоритъма за управление и в двата случая са едни и същи. Единствената разлика е, че заданието за старт в единия случай е директно, в другия плавно, по рампа. На фиг.4.3б с IRO е отбелязан стадия на първоначална ориентация на ротора, следва старт с включен в обратната връзка SMO наблюдател. По същество стадият IRO представлява статично задание за пространствен вектор на тока. Първоначално управлението силно се разколебава, като в определен, случаен момент от време, наблюдателя се ориентира. Важно е да се каже, че процесът няма повтаряемост, като тук е даден един от случаите в които се стига до устойчива работа. Има случаи, в които това не е така и управлението изобщо не стартира. На фиг. 4.4 са дадени други два случая, в които управлението стартира със значително по-голяма неустойчивост и един рядък случай, в който успява да стартира сравнително устойчиво.



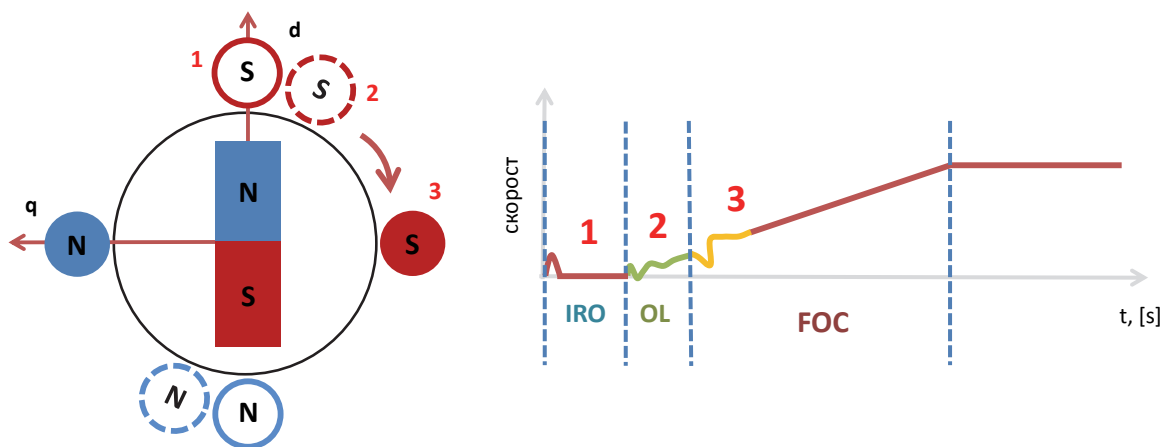
а.) силно неустойчив старт

б.) сравнително устойчив старт

Фиг. 4.4. Сравнение между различни случаи на старт по рампа при SMO безсензорно управление; черно – скорост; сиво – ток.

Често за работата на алгоритмите за управление се съди именно на база на реакцията на управлението на директно задание, позовавайки се на класическото изследване на динамичните системи със задание единична функция. В случая обаче се оказва, че това не е достатъчно и изследванията, демонстрирани на фиг. 4.3 и фиг. 4.4. показват, че безсензорното управление се нуждае от далеч по-сериозно прецизиране за работа при ниски скорости, освен реакция на задание тип единична функция. Това се потвърждава и от факта, че фирми внедряващи алгоритми за безсензорно управление, интегрират отделна стартова процедура и правят преход между режимите при ниски и по-високи скорости.

Прилагането на комбинирано управление при стартиране на двигателя скаларно и преход към векторно управление има един фундаментален проблем, който стилизирано е илюстриран на следващата фигура – фиг. 4.7

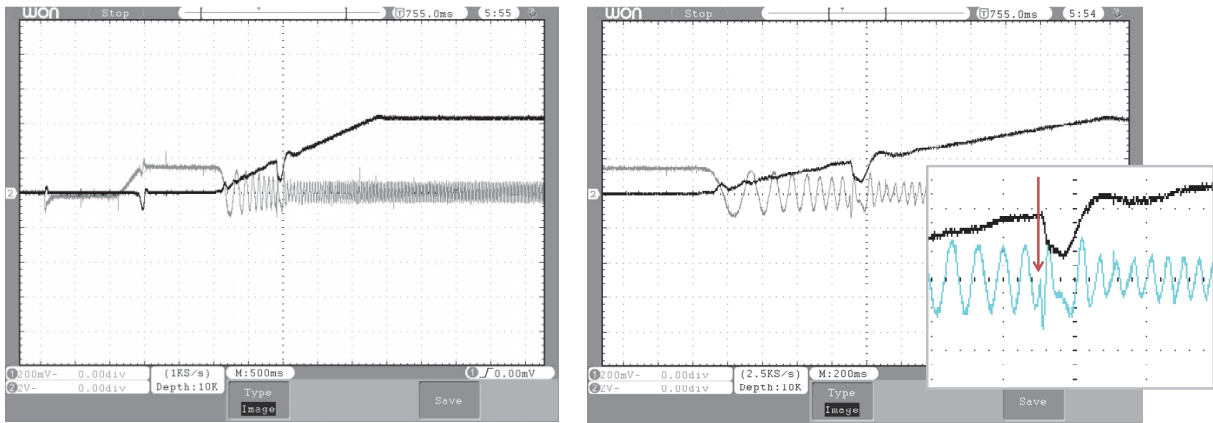


а.) положение на статорното поле спрямо ротора б.) скорост в процеса на развъртане по рампа

Фиг. 4.7. Преход между скаларно и векторно управление при стартиране със задание по рампа за скорост

Процедурата по стартиране започва с прилагане на статично поле, с цел първоначално ориентиране на ротора – позиция 1, фиг. 4.7а, IRO (initial rotor orientation). След като се приложи задание за нарастващ ъгъл, все още в отворена система, скаларно управление, без обратна връзка по скорост, магнитното поле повежда ротора, като в зависимост от задържащия момент, инерционния момент, натоварването и избраната стойност на тока, могат да се получат колебания в скоростта – позиция 2, фиг. 4.7б, OL (open loop). Основната причина за появата на тези колебания е задържащия момент, като при стартиране с малък товарен момент те преобладават като натоварване, както е случая в приложения тип вентилационна система, компресор, помпа.

При достигане на определена скорост, когато скоростния наблюдател даде адекватен сигнал за позиция се преминава от скаларно (OL) към безсензорно векторно управление (SMO), т.е. наблюдателя започва да участва в обратната връзка на управлението. Тук е и основният проблем на този преход – рязка промяна от позиция 2 към 3 – фиг. 4.7а. В този преход регулаторите в управлението създават неминуем преходен процес, като колебанието зависи от големината на грешката между изчисленият от SMO ъгъл и задаваният от скаларното управление. Практиката показва, че този преход често няма повторимост. Практически пример на така описаната постановка е даден на фиг.4.8. За да се достигне до експерименталните резултати, показани на фиг.4.8, първоначално стратегията за управление е реализирана на симулационен модел. Разширен е моделът от фиг.2.19 представен в Глава 2.



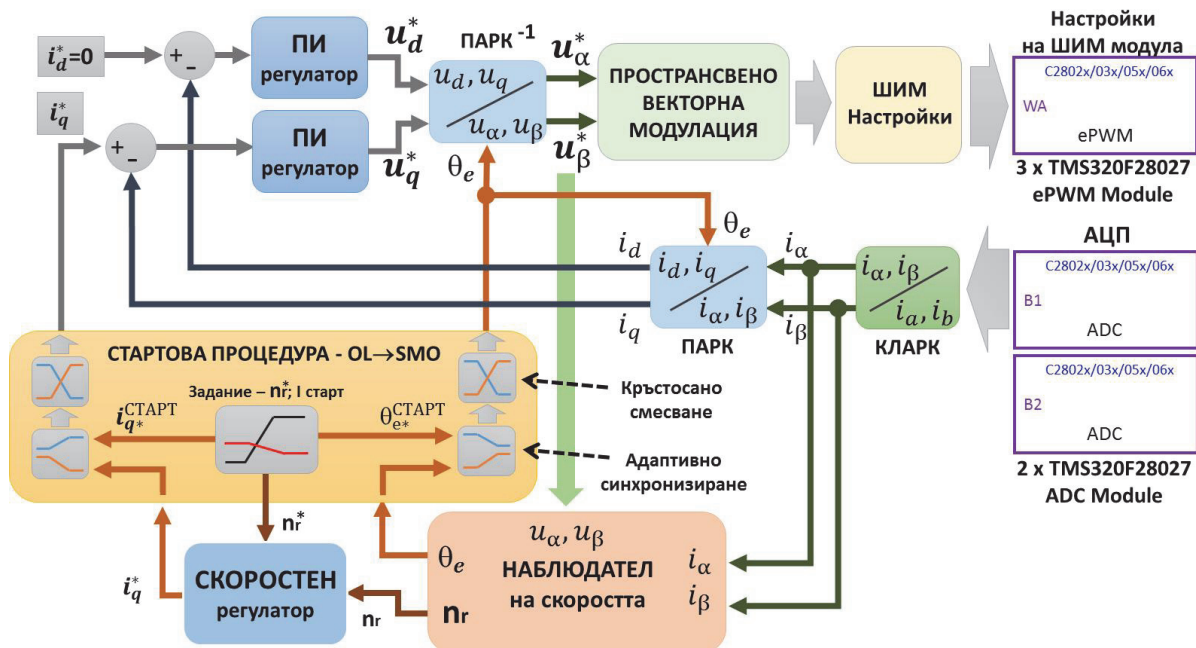
а.) скорост - черно, ток – сиво

б.) преход скалярно/векторно управление

Фиг. 4.8. Опитни резултати при стартиране по рампа и преход скалярно/безсензорно векторно управление

Синхронизиране на скалярно и векторно управление по време на стартовата процедура

Блоковата схема на предложеното управление е показана на фиг.4.12. Нейният базов вид, без добавяне на процедурата по стартиране, е показан на фиг.2.5 в Глава 2, като тук схемата е допълнена със стартова процедура, символично означена OL→SMO.



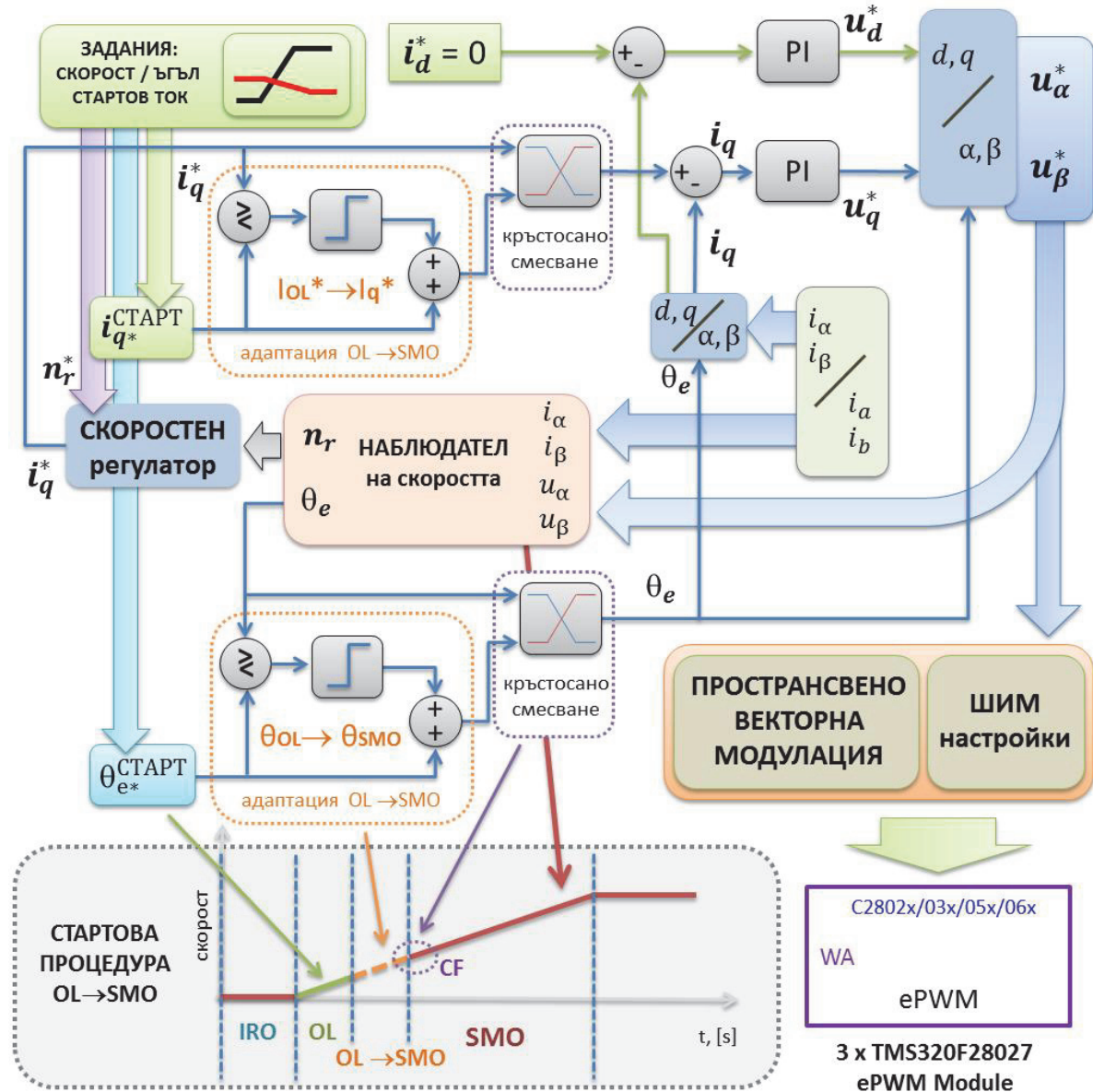
Фиг. 4.12. - Блокова схема на реализираното безсензорно векторно управление с интегрирана процедура по първоначално ориентиране и стартиране

Критериите за избора на точката на прехода са два:

- амплитудно синхронизиране на тока, зададен от старт процедурата и тока, получен от скоростния регулатор на база на все още неработещия в управлението наблюдател;
- фазово синхронизиране на ъгълът, зададен от стартовата процедура и ъгъла получен от наблюдателя.

При тази процедура се получава зона на плавен преход от единия към другия метод за управление, която даде отлични резултати на симулация, а в последствие и на практика.

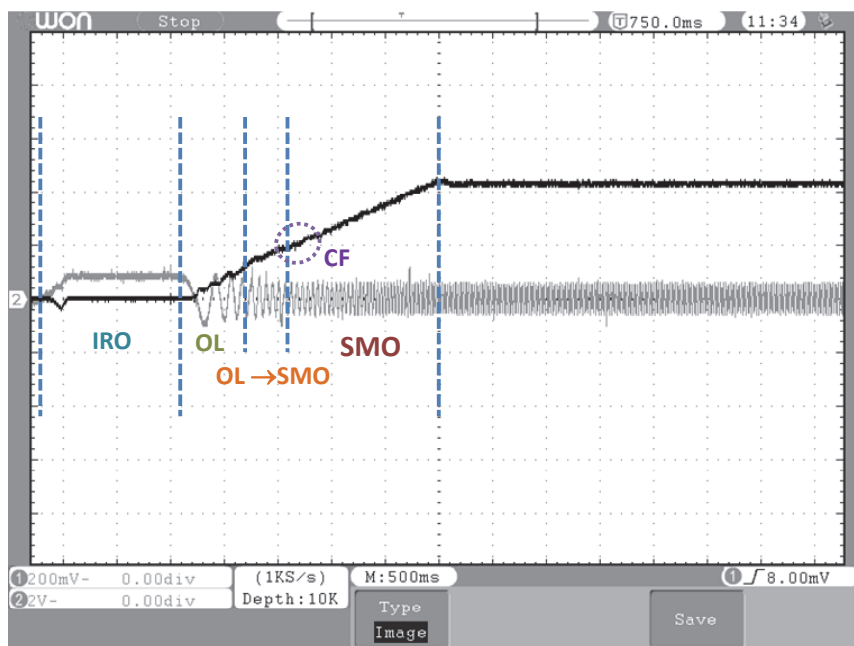
По-подробна блокова схема, даваща работата на метода е показана на фиг. 4.13.



Фиг. 4.13 Блокова схема на алгоритъма за адаптация между стартовата процедура със скалярно управление и безсензорно управление

В процедурата по стартиране се добавя още един стадий, който на схемата от фиг. 4.13 е показан като OL → SMO или преход от работа с отворена обратна връзка по скорост и режим със затворена обратна връзка по скорост, чрез информация за ъгъла и скоростта от SMO наблюдателя. Алгоритъмът едновременно адаптира фазово и амплитудно ъгъла и тока в двата режима, но освен това прави и кръстосан преход между двата режима.

На следващата фигура са показани реални експериментални резултати от процедурата на развъртане на двигателя по рампа за време около 2,5 секунди.



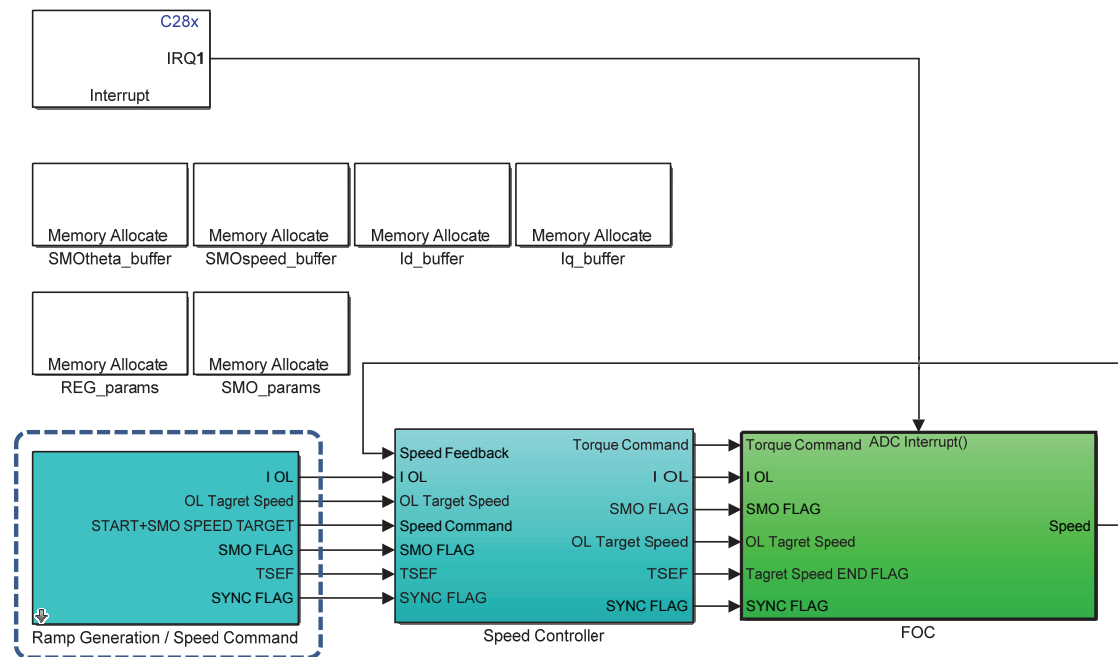
Фиг. 4.14 Стартиране по рампа - експериментални резултати при задание за старт по рампа – скорост и фазен ток на двигателя в четирите режима на заданието: IRO – предварителна ориентация на ротора; OL – старт без обратна връзка по скорост; OL→SMO – адаптация на OL старта към наблюдателя; CF – кръстосано смесване на тока и ъгъла; SMO - работа с обратна връзка по скорост, изчислена от наблюдателя

Сравнението на фиг. 4.8 и фиг. 4.14 показва ефекта от въвеждането на процедурата по адаптиране на стартовия процес към безсензорно векторно управление. Към настоящия момент процедурата на стартиране по рампа работи успешно, като стартовият ток е съобразен с първоначалния товарен момент. Предстои в бъдещи доработки на алгоритъма да се оптимизира работата, така че задвижването да тръгва със значително по-голям ток с цел намаляване на колебанията от задържащия момент, така че да се елиминират колебанията в зона OL. Изследванията върху задържащият момент, показват че неговото основно влияние е при скорости до около 5-10% от номиналната, като той се наслаждава със статичния товарен момент при стартиране и създава колебания в натоварването.

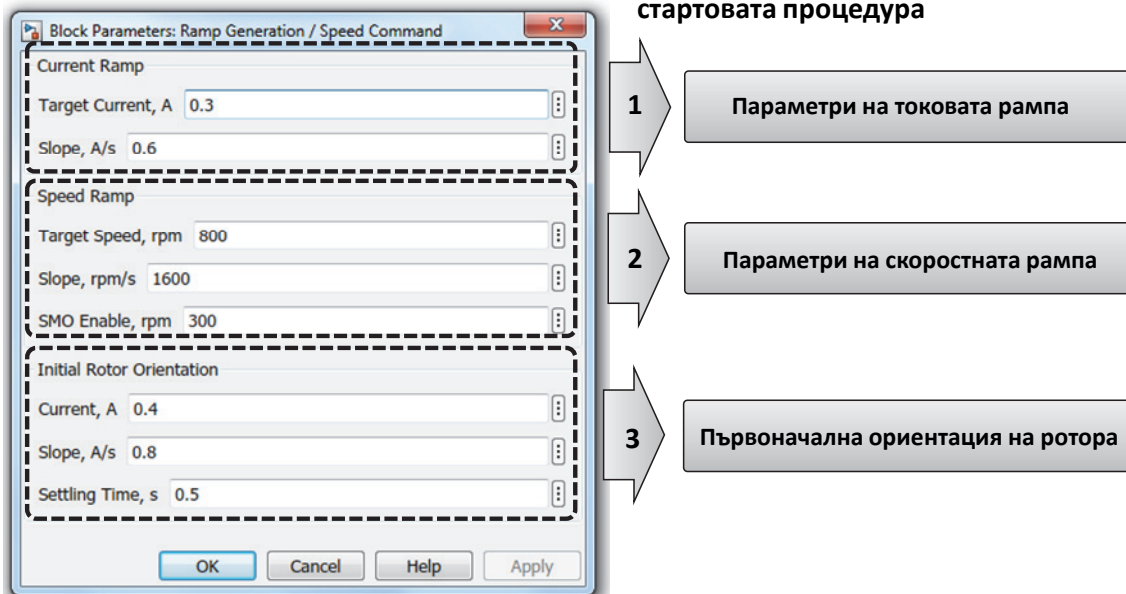
Софтуер за безсензорно векторно управление в MATLAB/Simulink за процесор на Texas Instruments серия C2000 – TMS320F28027

На фиг. 4.16 е показан общия изглед на софтуера за управление. Програмата за управление е реализирана в средата на MATLAB/Simulink със софтуерен пакет за работа със сигналните процесори на Texas Instruments. Софтуерът за управление на двигателя е организиран основно в три блока:

1. генериране на задания за скорост и управление на процеса по преход от стартовата процедура към безсензорно векторно управление - *Ramp Generation/Speed Command*
2. скоростен контур, работещ с ниска честота на дискретизация 100Hz - *Speed Command*
3. алгоритъм за векторно управление (FOC), който се тригерира асинхронно от периферията, в случая от хардуерния модул за широчинно-импулсна модулация, работещ с честота 20kHz.

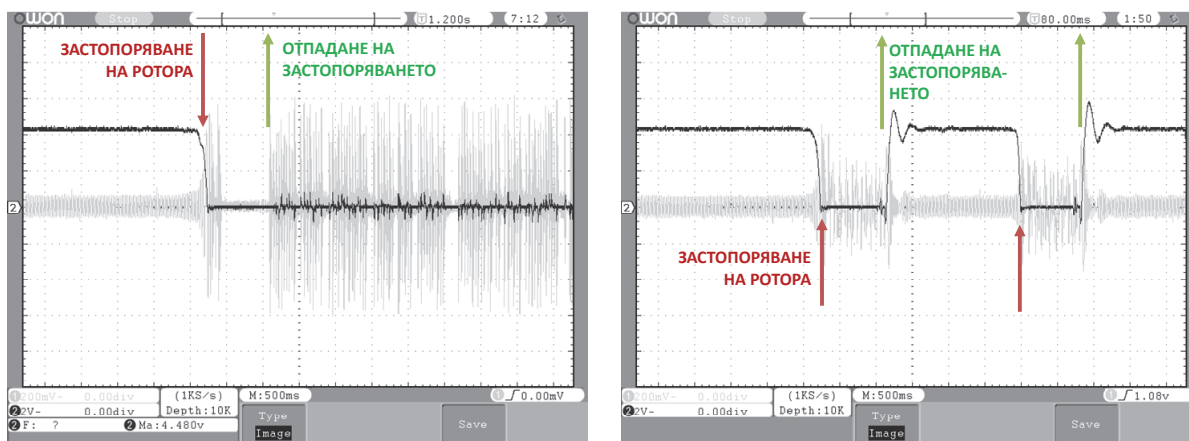


Маска в MATLAB/Simulink за настройка на стартовата процедура



Фиг. 4.16 Структура на софтуера за безсензорно векторно управление на синхронен двигател с постоянни магнити

След решаване на проблема с устойчивото стартиране по рампа, подчертано за приложения в които ниските скорости не са приоритетни, а е важен работен диапазон 20-100% от номиналната скорост (вентилация, компресори, помпи), се поставя въпроса за работата на двигателя при аварийно спадане на скоростта под 20% от номиналната, където наблюдателя работи неустойчиво. В този диапазон се предлагат различни техники, като тук е предложена техника, провокирана от функцията “force angle” в патентования наблюдател InstaSpin® на Texas Instruments. При него, под определена скорост двигателя влиза в режим на работа със статично задание за ъгъл, т.е. фиксирана ниска скорост, при ток равен на тока на токоограничението. Изследванията с InstaSpin® показват, че двигателят има характеристики, подобни на работа на стъпков двигател с достатъчно голям работен ток, така че товарния момент да не го изкарва от синхронизъм. Тук е реализиран подход, като са направени стъпки за обединяването му с работата на наблюдателя. Алгоритъмът предстои да се доразвие, като засега работи като защита от застопоряване на ротора, фиг. 4.25, с цел възстановяване на ориентация след отпадане на въздействието.



а.) внезапно застопоряване на ротора без функцията „принудителен ъгъл“

б.) внезапно застопоряване на ротора с функцията „принудителен ъгъл“

Фиг. 4.25 Осцилограми, демонстриращи предложената функция „принудителен“ ъгъл; черно – скорост; сиво – ток на двигателя

При застопоряване на работния орган на вала на двигателя, да речем при работа във вентилационна система, въпреки взетите мерки за плавен и устойчив старт, алгоритъмът за векторно управление влиза в режим на токоограничение, но след отпадане на въздействието двигателя не успява да стартира – фиг. 4.25а. В този случай в скоростния контур има задание за скорост, скоростния регулатор дава задание за ток, но наблюдателя не успява да се ориентира за позицията на ротора. В статорната намотка текат токове с висока променлива честота и амплитуда близка до токоограничението. Решението на проблема е демонстрирано на фиг. 4.25б, където се вижда че след отпадане на въздействието, машината възстановява устойчива работа, при предходното задание за скорост. На този етап, след отпадане на въздействието двигателят се развърта рязко, със стъпково задание.

Изводи към „Глава 4“

В настоящата глава е представено решение за преодоляване на неустойчивостта при плавно стартиране на синхронна машина с постоянни магнити с безсензорно векторно управление. Както беше коментирано, възможността за надеждно стартиране по рампа е задължително изискване към електрозадвижването. Предложеният алгоритъм следи едновременно заданията за ток и ъгъл от скаларното управление, и същите определени на база на информацията от наблюдателя. Посредством сфазиращ механизъм, изпълнен на два етапа, се осъществява плавно преминаване от скаларно към векторно управление, без наличието на рязка реориентация на координатната система и съпътстващия я преходен процес. Проведените експериментални изследвания показват, че този подход дава добри резултати и е приложим за вентилационни системи, при които натоварването при ниски скорости е сравнително малко. Като допълнителна мярка е успешно реализирана и защита от претоварване на двигателя. Това е реализирано чрез така наречената функция „принудителен ъгъл“. Най-общо казано тази функция позволява запазването на управляемост на задвижването, както и осигурява възвръщането на нормална работа при отпадане на претоварването.

Заклучение

Основната мотивация за разработването на този дисертационен труд произтича от предходна разработка, свързана с внедряване на СДПМ с безсензорно векторно управление за промишлена вентилация. Възникналите проблеми, свързани с внедряването, са описани в Глава 1. На първи етап от работата е уточнена необходимостта от създаването на цялостен алгоритъм за безсензорно векторно управление. На база на последвалото проучване, във втора част от Глава 1, са избрани наблюдател, метод за първоначална ориентация на ротора и стратегия за стартиране, комбинираща скаларно с векторно управление. **Целта** поставена в Глава 1 е **създаване на алгоритъм за безсензорно векторно управление за синхронни двигатели с постоянни магнити**. Основната насока е да се изгради алгоритъм, който да има сходни или по-добри характеристики от този, изложен в първа част на Глава 1.

В Глава 2 е изграден симулационен модел в среда MATLAB/Simulink. За целите на работата е използван класически, линеен модел на СДПМ без отчитане на ефекти като насищане, загряване, запъващ момент и др. В края на Глава 2 е реализиран модел на системата управление-двигател със следящо-токово управление – SMO (Sliding-mode observer). Средата MATLAB/Simulink е подходяща за целите на работата, тъй като позволява адаптирането на симулационен модел, към софтуер, подходящ за програмиране на избраният микроконтролер. По този начин се осигурява възможност за синтезиране на спомагащи алгоритми, които лесно могат да се верифицират в симулация, преди да се приложат в реална система.

В Глава 3 е отделено внимание върху устойчивостта на алгоритъма изграден в Глава 2, при различни роторни конструкции (явнополусна и неявнополусна). Направено е изследване върху необходимите параметри на машината за управлението. Изяснено е как трябва да бъде определена индуктивността L_s , която се използва в математическия апарат на наблюдателя, както и в определянето на коефициентите на токовите регулатори. В Глава 3 е представена успешната адаптация на моделната реализация на алгоритъма към софтуер, подходящ за програмиране на микроконтролер. Окомплектованият лабораторен образец е базиран на развойна микропроцесорна платформа с микроконтролер TMS320F28027F на Texas Instruments и развоен трифазен инвертор за ниско напрежение BOOSTXL-DRV8301.

В Глава 4 е изследвана неустойчивостта на този алгоритъм при ниски скорости и плавно стартиране на двигателя, по рампа. Предложено е решение на този проблем с използването на комбинация от скаларно-векторно управление и сфазиращ алгоритъм, осигуряващ плавен преход между двата режима. В допълнение е изграден и защитен алгоритъм, който възстановява устойчивата работа на задвижването при застопоряване на ротора. Постигнатите резултати в Глава 4 надхвърлят значително възможностите на алгоритъма за управление представен в Глава 1. Това дава предпоставка да се счита че дисертационната работа е завършена успешно.

Изградената по този начин система, позволяваща комбинация симулация – реална реализация, в една и съща среда, отключва възможност за множество бъдещи доработки и разширения. Бъдеща работа би могла да включва изследването на други наблюдатели, внедряване на допълнителни алгоритми, за работа при ниски скорости, за друг тип приложения, визуализация на процесите в реално време, потенциално е и използването на тази платформа за образователни цели. Освен това изграждането на потребителски интерфейс, както и комуникация с други устройства също предстои да бъде добавено като функционалност към тази разработка.

Приноси на дисертационната работа

Научно-приложни приноси:

1. Създаден е симулационен модел на безсензорно векторно управление на СДПМ със следящо-токов наблюдател за скоростта и позицията на ротора.
2. Предложен е подход за преобразуване на алгоритъма за безсензорно управление на СДПМ от симулационен модел към модел, подходящ за реализация на микроконтролери.
3. Проведен е анализ по отношение на влиянието на параметрите на двигателя върху работата на наблюдателя и токовия и скоростния регулатор и е предложена концепция за прилагане на следящо-токов наблюдател при синхронни двигатели с явнополусна и неявнополусна конструкция.
4. Създадена и интегрирана е процедура за осигуряване на плавно стартиране от нулева скорост с адаптивен преход от скаларно към безсензорно векторно управление на СДПМ.
5. Създадена и интегрирана е защитна функция за възстановяване на управлението след застопоряване на ротора на СДПМ при безсензорно управление.

Приложни приноси:

6. Разработено е и е реализирано електрозадвижване със СДПМ с безсензорно управление за индустриално приложение.
7. Реализиран е лабораторен образец на безсензорно векторно управление на СДПМ със следящо-токов наблюдател за скоростта и позицията на ротора.
8. Проведени са експериментални изследвания и са направени изводи по отношение на един от методите за безсензорно векторно управление на СДПМ.

Научни публикации и доклади на автора по дисертацията

Научни публикации

1. E.Rachev, V.Petrov, "High efficiency permanent magnet synchronous motor drive for use in industrial ventilation", Proceedings of the Technical University of Sofia, vol. 64, pp. 229-236, 2014.
2. E.Rachev, V.Petrov, "Cogging torque effect on motor start-up in a sensorless motor drive for permanent magnet synchronous motors", 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), pp. 211-214, 2017.
3. E.Rachev, V.Petrov, "Influence of Motor and Observer Parameters in a Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors", Proceedings of the Technical University of Sofia, vol. 69, pp. 87-92, 2019.
4. V.Petrov, "Microcontroller Implementation Based on a Simulation Model of Field Oriented Control", Proceedings of the Technical University of Sofia, vol. 69, pp. 79-86, 2019.
5. E.Rachev, V.Petrov, "An Approach to Solving Ramp Start Issues in Sensorless Field Oriented Control with Sliding Mode Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors," 2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-4."
6. E. Rachev and V. Petrov, "Reducing the transient in switching from scalar to field oriented control for smooth ramp start of a permanent magnet synchronous motor," 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (Bulef), Varna, Bulgaria, 2019, pp. 1-4.

SENSORLESS CONTROL OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

ABSTRACT

Sensorless control of AC motors has been the subject of serious research over the past two decades. The capability to remove the speed sensor is attractive not only in terms of economy, but also in terms of reliability of electrical drives. The work discusses a number of issues related to the synthesis, simulation and implementation of a sensorless field-oriented control algorithm for permanent magnet synchronous motors. At present the engineering tools available for the development of such systems are vast. However, it is a common practice, when a manufacturer reaches peak results, to use a mechanism to restrict access to the essence of the control algorithm. Dependence on a particular manufacturer is another point of view that should not be overlooked. This is exactly the case described in Chapter 1 of the work. In a problem preceding the dissertation, an electrical drive was developed, based on a microcontroller with a built-in algorithm for sensorless control of a PMSM. The included algorithm greatly reduces the required development time. In the course of the work, however, the manufacturer stopped maintenance and production of the microcontroller. This practically returns the work back to the initial stage. The objective of this work is to create a sensorless field-oriented control algorithm for permanent magnet synchronous motors. To achieve this goal the following problems must be solved:

1. Selection of suitable position and speed observer
2. Selection of suitable microcontroller and programming and simulation environment
3. Creation of simulation models of the drive-motor system
4. Construction of a small low voltage test bench for algorithm verification
5. Practical implementation of sensorless control based on the selected microcontroller
6. Experimental study of the control system and optimization of the starting process, considering the main problems of sensorless control at low speed.
7. Synthesizing an algorithm to protect the drive during a locked rotor condition

In order to solve the above problems, this work first examines the general requirements for an electrical drive with permanent magnet synchronous motors. After characterizing the most important factors and determining the proper position and speed observer, a simulation model was built in order to verify the functionality of the system. The next step was to adapt the model in a suitable way as to be able to generate code from it and program the microcontroller. Experiments and measurements were carried out based on a low voltage test bench. The results revealed issues at low speed and during ramp start of the motor. To solve those issues an adaptive algorithm was synthesized. The algorithm switches from open loop control at low speed to sensorless control at higher speed using an adaptive mechanism. As a last measure a procedure that resumes normal operation after a locked rotor condition was integrated. The results shown in the work significantly exceed the capabilities of the previously described electrical drive.