

СЪСТОЯНИЕ НА ТЕОРИЯТА НА АСИНХРОННИТЕ ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНИЯ. МОДЕЛИРАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Иван Костов, Георги Иванов

Резюме: Статията представя аналитичен обзор и изследване на съвременното състояние на теорията на асинхронните двигатели (АД), на техните модели и на системите им за управление с преобразуватели на честота (ПЧ) и автономни инвертори на напрежение с ШИМ. За целта е анализирана публикационната активност през последните години и систематизирана информацията за управлението на ненаситени АД с накъсосъединен ротор. Обсъдени са някои проблеми и нерешени задачи при управлението на АД. Направени са предположения за близкото бъдеще на теорията и практиката на управлението на АД. Литературната справка съдържа 38 заглавия от последните години.

Ключови думи: поле, ориентация, нелинейно, векторно, обратна връзка, линеаризация, режим, хлъзгане, управление, адаптивна, система, еталонен, модел, наблюдатели, оценители, идентификация

STATE OF THE THEORY OF INDUCTION MOTOR DRIVES. MODELING AND CONTROL

Ivan Kostov, Georgi Ivanov

Abstract: The article presents an analytical survey and study of the current state of the theory of induction motors (IM), their models and their control systems with frequency converters with DC link and PWM. For this purpose, publishing activity in recent years is analyzed and information of control of unsaturated IM with squirrel-cage rotor is classified. Some problems and unresolved problems of the control theory of IM are discussed. Assumptions about the near future of the theory and practice of control of induction motors are made. The reference contains 38 titles in the last years.

Keywords: field, oriented, nonlinear, vector, feedback, linearization, sliding mode, control, FOC, FLC, model, reference, adaptive system, MRAS, observers, estimators, induction, motor, drives, parameter identification.

1. Въведение

Електрозадвижванията са основно звено на промишлеността като показател за тяхната значимост се явяват изследванията и разчетите, свързани с консумацията на електроенергия [1, 2, 3]. Това се подкрепя от факта, че около 60 % (за САЩ около 65%) от световната консумация на електроенергия в промишлеността се дължи на електродвигателите и то предимно в процесите на прера-

ботка – 22% и обработка -12% на материали, като помпи – 25%, въздушни компресори – 16%, вентилатори – 14%, в климатични системи – 7% и други – 4%. Във връзка със световните тенденции за намаляване на енергопотреблението и енергийна ефективност се разработени редица стратегии за управление, като чрез внедряване на регулируеми електрозадвижвания разходите за енергия може да намалее между 25-50% [1, 4]. По мнение на специалисти около 80-90% от използваните електродвигатели са асинхронни, вследствие на редица предимства, които те притежават. Управлението на асинхронните електродвигатели се радва на устойчив интерес от страна на изследователите и инженерите повече от четири десетилетия. Доказателство за това е значителния брой на статиите, посветени на управление на асинхронни двигатели - повече от 4000, като 300 статии се появяват само през 2008 г. Интересът на промишлеността към управлението на асинхронните двигатели (АД) е документиран от над 80 000 патента по този въпрос [5]. Наличието на мощни цифрови сигнални процесори с ниска цена и значителното развитие на силовата електроника създават условия за проектиране на сложни системи за управление на АД [5, 6]. Тези системи трябва да постигнат същото, или дори по-високо качество на управление на скоростта и енергийна ефективност, които са получени чрез по-сложните и по-скъпи, но по-малко надеждни двигатели за постоянен ток (ДПТ). АД се поддават много по-трудно на управление, но имат определени предимства спрямо ДПТ, тъй като липсва колекторно-четков апарат и произтичащите от това проблеми, свързани с ограничени комутационни възможности и скорости, непригодност при работа в корозионни и агресивни среди и необходимост от периодична поддръжка на този апарат. Те имат проста и здрава конструкция и по-добри показатели като претоварваща способност и плътност на мощността, които се изразяват чрез по-високо съотношение въртящ момент – тегло (или инерционен момент) спрямо ДПТ [7]. Трудностите при синтеза на управляващи алгоритми за асинхронни двигатели се дължат на сравнително сложния модел, вследствие на взаимосвързаността на неговите променливи и съществено нелинейните им зависимости. Преодоляването на този проблем е свързано с имплементирането на сложни и комплексни алгоритми за управление и микропроцесорни системи със значителен числен ресурс, което с оглед развитието на цифровата техника е напълно постижимо, като решенията стават все по-изгодни в ценово отношение. Именно тези фактори обуславят и значителния интерес на научната общност през последните 20 години. Един от основните проблеми при експлоатацията на асинхронните двигатели е пълноценното им използване и енергийната ефективност [8]. Статистическите данни на IEA показват, че 60% от всички електродвигатели работят с 60% и с по-малко от работните товари, за които те са проектирани. При същите условия и в определени приложения асинхронният двигател може да отдели във вид на загуби до 70% и повече от електрическата енергия, която той консумира, което води до увеличаване на електроенергийните разходи. При номинален режим АД имат к.п.д. 75%-85% и висок фактор на мощността (0,8-0,85), но при режими, различни от номиналния показателите им рязко спадат, следователно е актуален въпросът с енергоикономичното им управление, а това е свързано с избора на

режим на работа съобразно натоварването на машината. Не по-малко важен е въпросът с точността на управлението в статичен и динамичен режими, което пък е изискване от страна на технологичния процес, обслужван от електрозадвижването. Известно е, че задвижвания, работещи при постоянни или бавно изменящи се задания, особено в порядъка на по-големите мощности се управляват съгласно критерии и алгоритми за статична оптимизация, изведени на база статични модели на асинхронния двигател [9]. При следящите системи, работещи в условия на бързо изменящи се задания или значителни по динамика и мощност смущения се прилагат методи и алгоритми за динамична оптимизация. Докато при първите се предявяват претенции предимно по отношение на топлинните загуби и консумирането на енергия, то при втората група важни показатели са производителността, сходимостта на системата към определени (желани) траектории в преходните режими, оценявано чрез различни динамични показатели като линейна интегрална (I) и интегрално-квадратична (I_2) грешки, пререгулиране (σ), време на регулиране (t_p) и т.н. Трябва да се отбележи, че динамичните показатели са също свързани с енергопотреблението и енергийната ефективност на задвижването, особено в системи, работещи предимно в преходни режими. Следователно критериите за статична и динамична оптимизация са обвързани, но опита за съвместното им решаване се оказва сложна многокритериална задача [9]. От съществено значение за качеството на управление е прецизното определяне на параметрите на двигателя като активни съпротивления, собствени индуктивности на статора и ротора и взаимната индуктивност, инерционния и съпротивителния моменти. Трудностите при определянето им се дължи на сравнително сложната природа на процесите, протичащи в електрозадвижването и различните условия на работа – промяна на натоварването в широки граници, електромагнитни смущения, температурни промени и т.н.

2. Моделиране на асинхронния двигател

Електромеханичното преобразуване на енергията може да се представи на база два крайни подхода – теорията на полето (уравненията на Максвел) и теорията на веригите (законите на Кирхоф) като комбинирания подход (теорията на обобщения електромеханичен преобразувател) съчетава предимствата им и се смята за най-удачен [10]. Преобразуването на координатите от математическа гледна точка създава предпоставка за опростяване на математическото описание на асинхронния двигател както за целите на анализа на електромагнитните и електромеханични процеси в машината, така и при синтеза на закони за управление [11, 12, 13]. Друг подход на основа апарата на обобщената електрическа машина за описание на асинхронния двигател е представянето му в обобщен матрично-векторен вид чрез метода пространство на състоянията и разработените в тази връзка методи за оценка като наблюдаемост, управляемост и устойчивост [5]. По-конкретно може да се каже, че основните модели, използвани при синтеза на управляващи алгоритми за АД се базират на обобщения електромеханичен преобразувател и производните на него, като за целите на векторното и оптимално управление се прилагат ориентации спрямо определени величини

(поток на статора, ротора, въздушната междина т.н.) и описание в пространство на състоянието, като в някои разработки се правят опити за допълване на това описание с модели на насищането на магнитната верига, топлинни модели, отчитащи промяната на активните съпротивления на статора и ротора, повърхностния (скин) ефект при кафезните двигатели и влиянието върху роторното съпротивление, загубите от хистерезис, несиметричните режими на работа и т.н. Усложняването на модела на двигателя, затруднява синтеза на управляващи алгоритми и затова често проектирането на системата за управление се базира на определени компромиси между различните критерии. В заключение може да се каже, че стремежът в търсенето на нови и удобни варианти на представянето на математическия модел на двигателя и свързаните с това математически преобразувания могат да доведат до нежелани ефекти - отдалечаване от физическата същност и представата за процесите и явленията.

3. Съвременни системи за векторно управление

Преди повече от 40 години Hasse и Blashke извеждат принципите на ориентираното индиректно (Indirect Field Oriented Control, IFOC) и директно (Direct Field Oriented Control, DFOC) векторно управление [14, 15]. През този период се появяват и първите честотни задвижвания, което фокусира вниманието на учени и инженери към управлението на АД. По проблемите на ориентацията са направени множество изследвания като в [14, 16] се прави опит за тяхното обобщение. Ориентацията най-често се реализира по пълния магнитен поток на ротора (за кратко наричан по нататък роторния поток) – Ψ_r , затова и интересът към моделирането на наблюдатели за този параметър е най-голям. Това се е наложило поради факта, че при нея се постига пълно разделение между компонентите на статорния ток, създаващи потока и момента на машината. В някои по специални приложения ориентацията по статорния поток Ψ_s има своите предимства. В [17] се отбелязва, че при работни режими над номиналните и в областта на отслабване на полето тази система е по-малко чувствителна на параметрична промяна и генерира по-голям момент в условията на ограничени напрежение и ток. Общият белег на всички изчислителни схеми за определяне на потока е параметричната чувствителност и за това са предложени различни мерки за подобряването им. Наред с отворените изчислителни схеми като напреженов, токов, напреженово-скоростен и напреженово-токов и скоростен модели на Ψ_r се използват и адаптивни наблюдатели от типа на Luenberger и Gopinath [14]. Сериозен интерес проявява научната общност и в областта на Калмановата теория. На основа на Калмановия филтър в зависимост от използвания модел на двигателя в пространството на състоянието могат да се синтезират оценки на Ψ_r , статорния ток, скоростта на вала на двигателя – ω_r (използвани в системи за безсензорно управление) както и коефициенти, свързани с параметрите на двигателя и товарния момент [18, 19]. През последните години особен интерес предизвикват методите управление в режим на хлъзгане (Sliding Mode Control, SMC), като при проектирането на адаптивен наблюдател на състоянието се синтезира, най-често повърхнина на превключване, базирана на грешката между измерената и оценена стойност на тока, а механизма за адаптация представлява

прекъсната (знакова) функция . В [20] е направен сравнителен анализ на работата на 2 основни наблюдателя, адаптирани чрез *sliding mode* механизъм. Устойчивостта на тези системи се доказва чрез теорията на Ляпунов. С развитието на микропроцесорната техника стана възможна реализацията на схеми с изкуствен интелект посредством невронни мрежи за оценка на състоянието на параметрите на двигателя [21, 22, 23]. Най-често се използват двуслойни (с един входен и изходен слоеве) или трислойни (с междинен слой), а адаптацията на тегловните коефициенти в мрежата се реализира съгласно метода *backpropagation*. Разгледаните проблеми дотук се свързват с ориентацията и възстановяването на параметри на състоянието важни за управлението като Ψ_r и скорост, при които прякото измерване е трудно или нерентабилно, а също така и параметри, изменящи се в хода на работа – статорното (R_s) и роторното (R_r) активни съпротивления. При това тези параметри трябва да бъдат възстановявани с гарантирана устойчивост на процеса [5]. В своята обзорна работа Toliyat разглежда подробно въпросите на *offline* и *online* идентификацията на параметри в асинхронните двигатели [24].

От 1985г. паралелно с FOC-схемите се развива и т.нар. Пряко управление на момента (*Direct Torque Control, DTC*) [16]. Първоначално *Depenbrock* предлага т. нар. метод Пряко самоуправление (*Direct Self Control, DSC*), а само няколко месеца по-късно *Takahashi* и *Noguchi* публикуват концепцията на DTC. Предложените стратегии се различават само по формата на изобразяващата, която следва вектора на потокосцеплението при управление – DTC е под формата на кръг, а в DSC е хексагон [14]. Системите с пряко управление на момента са разработени предимно за големи мощности и за тягови задвижвания. Характеризират се с по-голямо бързодействие в сравнение с FOC-алгоритмите, което се дължи на опростената им структура – липсват координатни преобразувания, използват се оценки на статорния поток и момента, а регулиращите контури се реализират чрез релейни регулатори. Въпреки това те имат недостатъци, обусловени от променливата честота на превключване и значителни пулсации на момента. Усилията на учените и проектантите в последните години са насочени към различни стратегии за избягване на променливата честота на превключване [25, 26], но неизменно движейки се съгласно фундаменталната концепцията на DTC.

Третият клон на развитие на съвременните векторни електрозадвижвания е т.нар. управление с линеаризираща обратна връзка (*Feedback Linearization Control, FLC*). Първите разработки в тази област принадлежат на Marino и Tomei [5] отпреди повече от 20 години. В основата на тази концепция е управлението на скоростта и модула на потока на машината, чрез линеаризираща обратна връзка като се регулира непосредствено статорното напрежение – U_s на база измерените статорни токове - I_s [5]. Следвайки принципите на FOC задачата на FLC е ориентиране на роторния поток към d-оста на въртящата се координатна система. Според [5] тъй като потокът не се измерва, а се възстановява чрез наблюдател, следователно ориентацията е асимптотична и това трябва да се отчита при анализа на устойчивостта на управляващата система. През последните 2 десетилетия се появяват някои разработки [27, 28], свързани с този

подход, но на този етап не са известни системи за векторно управление на промишлени асинхронни двигатели, реализирани на тази основа.

Много важен е въпросът с избора и настройката на регулаторите в системите за векторно управление на АД. При стандартния подход се използват ПИ регулатори за контурите на регулиране на токовете, потока и скоростта, но токовите контури може да се реализират и с двупозиционни регулатори. Както при ДПТ, така и при АД се прилагат най-вече линейните методите за настройка на симетричен и модулен оптимум [11, 12]. Докато при ДПТ този подход дава добри резултати, то при АД резултатите са незадоволителни и се изисква съществена донастройка. Това се дължи на нелинейния модел на двигателя и силното влияние на обратните връзки по противо-е.д.н. в модела. Практически не са известни преки изчислителни методи за получаване на параметрите, които да обезпечават определени динамични показатели. Това се постига най-често чрез прилагане на адаптивни системи. Повечето работи са свързани с избора на закони и определяне на параметрите им, гарантиращи устойчивост, в определена работна област. В тази връзка е интересно да се отбележи, че доказателство за глобалната устойчивост на индиректното управление по роторния магнитен поток е публикувано едва през 1996г.[5]. Разработени са редица стратегии при които класическият ПИ-регулатор се заменя с размит контролер [29], SMC стратегия [30] и т.н., стъпващи основно на нелинейна теория. В последно време се възлагат големи надежди на хибридни управляващи структури на основа размито и невронно управление. В тази посока интерес представлява разработката на *Kowalska* и колектив, които предлагат адаптивен *sliding-mode* невронно-размит регулатор за управление на скоростта [31]. Алгоритъмът за обучение се стреми да минимизира грешката (коригирайки теглата в невронната мрежа, съгласно градиентен метод) от изхода на систематата – в случая измерваната и желана скорост, получена от еталонен модел, изведен на база колебателно звено от втори ред, и определящо желаната динамика на скоростния контур.

4. Системи за безсензорно управление на АД

В последните години широко разпространение в промишлеността са получили т.нар. системи за безсензорно управление на скоростта (*sensorless speed control*) на АД, благодарение на редица предимства [32, 33], които те притежават – елиминирането на хардуерни компоненти (обратни връзки от сензори за поток и скорост) и замяната им с програмни инструменти (софтуер) в микропроцесорните управляващи устройства спомага за подобрява експлоатационните характеристики и надеждността на задвижването, намаляване на габаритите и цената на предлаганите системи. В тази връзка се реализират изчислителни схеми на основа отворени и затворени наблюдатели [7, 32] изведени на база обобщената двуфазна машина и измервания на лесно достъпните I_s и/или U_s . Прилагат се различни техники на основа Калмановата теория, невронните мрежи, SMC (разгледани и в предходната точка), адаптивни системи с еталонен модел (*Model Reference Adaptive System, MRAS*) [34]. От изброените по-горе най-голямо приложение намират MRAS модели, което се дължи на относително по-простата структура спрямо другите затворени наблюдатели и стабилна работа в широк

диапазон [31]. Друга група от методи се опират на пространствената анизотропия на асинхронния двигател като насищането на магнитната верига и зъбните хармоници [35]. Този подход се прилага по-лесно при синхронните двигатели, тъй като неравностите по вътрешните повърхнини са значително по-големи [14]. Методите за безсензорна оценка на скоростта трябва да удовлетворяват критериите за малка собствена динамика (т.е. да не внасят допълнително динамика в контура на управление) и робастност по отношение промяна или неточности при определяне на параметрите на двигателя, също така широк диапазон на работа, включително и при много ниски скорости, близки и равни на нула. От гледна точка на качеството на управление в смисъл на динамична и статична точност, тези системи заемат междинно място спрямо отворените и затворени чрез датчик на скорост, но работят по-добре от системите с инверсен модел [5]. Като обобщение на постигнатото в тази област се явяват работите на P.Vas, J. Holtz, G. Tarchala – [7, 32, 33].

5. Заключение

Настоящата работа е опит за обобщено представяне на проблемите и тенденциите при изграждането на висококачествени системи за векторно управление на промишлени АД. В тази връзка са разгледани въпроси, свързани с моделирането и оптималното управление на АД по различни технико-икономически критерии и използваните съвременни методи за управление и оценка на величини, свързани с двигателя и имащи пряко отношение към качеството на управление (наблюдатели на състоянието и параметрични наблюдатели) на основа изкуствен интелект (невронни мрежи), SMC, MRAS, Филтър на Калман и т.н. Предложената литературна справка предоставя възможност за задълбочен анализ на задачите и проблемите свързани с моделиране, идентификация, управление от гледна точка на нелинейната теория, статична и динамична оптимизация на асинхронния двигател. В заключение може да се каже, че теорията на управление на АД е достигнала състояние на насищане и в следващите години ще се работи усилено в посока имплементирането на разработените алгоритми за оценка и управление като особено перспективен клон се явява безсензорното векторно управление. Напредъкът на цифровата техника в областта на сигналните процесори, ASIC (интегрални схеми със специфично приложение) технологията и свръхголемите интегрални схеми като FPGA (интегрални схеми с програмируема структура) [36, 37] поставя акцента върху цифровото управление и алгоритмично-програмното осигуряване, стратегиите за оптимално управление на числените ресурси, имплементиране на механизми за самонастройка, енергоспестяващи алгоритми, осигуряването на необходимата логика и анализ (отработване) на аварийни ситуации [38], внедряването на т. нар. редундантни системи, които имат за цел да заместят дефектиралния агрегат или механизъм, при това без да се нарушава цикъла на работа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Bose B., Power electronics and Motor Drives: Advances and Trends, Academic Press, 2006, ISBN 978-0-12-088405-6, 917pp.
- [2]. Mecrow B.C., A.G. Jack, Efficiency trends in electric machines and drives, University of Newcastle Upon Tyne, 2006.
- [3]. De Almeida, A.T., Ferreira, F.J.T.E. and Both, D. 2005. Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-speed drives with Electric Motor Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, 41(1):188–199, January/February.
- [4]. Михов М. Р. Системи за управление на електрозадвижванията, ТУ-София, София, 2009
- [5]. Marino R., P. Tomei, C. M. Verrelli, Induction Motor Control Design, Springer-Verlag London Limited, 2010, ISBN 978-1-84996-283-4, e-ISBN 978-1-84996-284-1, 371 стр.
- [6]. Ишматов З., Микропроцесорное управление электроприводами и технологическими объектами. Полиномиальные методы, изд. УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2007г., 278с.
- [7]. Vas, P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press, 1998.
- [8]. Thanga Raj C., S. P. Srivastava and P. Agarwal, "Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor," International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, 2009, pp. 61-70
- [9]. Панкратов В.В. Тенденции развития общепромышленных электроприводов переменного тока на основе устройств силовой электроники, Силовая Интеллектуальная Электроника. – 2005. – № 2. – С. 7–11
- [10]. Копылов И.П., Математическое моделирование электрических машин, Москва, Висшая школа, 2001, ISBN 5-06-003861-0, 327 стр.
- [11]. Ключев В. И., Теория Электропривода, Энергоатомиздат, Москва, 2001.
- [12]. Виноградов А., Векторное управление электроприводами переменного тока, Ивановский государственный энергетический университет, 2008, 298с.
- [13]. Popescu M., Induction Motor Modeling for Vector Control Purposes, Picaset Oy, Helsinki, 2000, 144 pp.
- [14]. Bocker, J.; Mathapati, S., "State of the Art of Induction Motor Control," Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC'07. IEEE International, vol.2, no., pp.1459, 1464, 2007
- [15]. Chan Tze-Fun, Keli Shi, Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives, Wiley, John & Sons, Incorporated, 2011, 432 pp.
- [16]. Бичай В.Г, Д.М. Пиза, Е.Е. Потапенко, Е.М. Потапенко Состояние, тенденции и проблемы в области методов управления асинхронными двигателями, Радиоэлектроника, информатика, управление. 2001. - № 1. с.138-144.

- [17]. Seibel B.J., Field Oriented Control of an Induction Machine in the Field-weakening region with DC-link and Load disturbance rejection, Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 33, 1997 pp. 1578-1584
- [18]. Aksoy S., A. Mühürçü, H. Kizmaz, State and Parameter Estimation in Induction Motor Using the Extended Kalman Filtering Algorithm, IEEE Modern Electric Power Systems (MEPS), 2010, pp. 1-5.
- [19]. Yang W., C. Xu, J. Jianguo, Speed Sensorless Vector Control of Induction based on reduced order extended Kalman Filter, Dept. of Electric Engineering, Shanghai Jiaotong Univ., China, IEEE The Fifth International Conference Power Electronic and Drive Systems, Vol. 1, Page 423-426, 2003.
- [20]. Know C., S. Hui, S. Sudhoff, S. Zak, Rotor Flux and Speed Observers for Induction Motors, International Conference on Power Electronics And Intelligent Control for Energy Conservation, Warsaw, 2005.
- [21]. Bose, B.K., Neural Network Applications in Power Electronics and Motor Drives—An Introduction and Perspective, Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.54, no.1, pp.14-33, Feb. 2007
- [22]. Cirstea M. N., A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick, Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems, Newnes, 2002.
- [23]. Aksoy S., A. Mühürçü, Elman Neural Network-Based Nonlinear State Estimation for Induction Motors, TÜBITAK, Turk J Elec Eng &Comp Sci, Vol. 19, No.6, 2011, pp. 861-875
- [24]. H.A. Toliyat, E. Levi, and M. Raina. A review of RFO induction motor parameter estimation techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, 18(2), pp. 271-283, 2003
- [25]. Buja, G.S., Kazmierkowski, M.P., Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors - a survey IEEE Trans. IE, 51, Aug. 2004 pp. 744-757
- [26]. Idris, N.R.N.; Yatim, A. H M, Direct torque control of induction machines with constant switching frequency and reduced torque ripple, Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.51, no.4, pp.758,767, Aug. 2004.
- [27]. Gastaldini, C.C.; Vieira, R.P.; Azzolin, R.Z.; Grundling, H.A., "An adaptive feedback linearization control for induction motor," Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on , vol., no., pp.1-6, 6-8 Sept. 2010
- [28]. Ahmed, A.H.O.; Ajangnay, M.O.; Mohamed, S.A.; Dunnigan, M.W., "Combined sliding mode control with a feedback linearization for speed control of Induction Motor," Energy, Power and Control , 2010 1st International Conference on , vol., no., pp.213-218, 2010.
- [29]. Kar, Biranchi Narayan; Mohanty, K.B.; Singh, M., "Indirect vector control of induction motor using fuzzy logic controller," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on, vol., no., pp.1,4, 8-11 May 2011.
- [30]. Bacha, F.; Gasmi, M., "Sliding mode control of induction-motor-pump supplied by photovoltaic generator," Industrial Technology (ICIT), 2011 IEEE International Conference on, vol., no., pp.182,187, 14-16 March 2011.

- [31]. Orłowska-Kowalska, T., M. Dybkowski, Stator current based MRAS estimator for a wide range speed-sensorless induction motor drive, *IEEE Trans. Industrial Electronics* 57 (4), 1296–1308 (2010).
- [32]. Holtz, J., "Sensorless control of induction motor drives," *Proceedings of the IEEE*, vol.90, no.8, pp.1359-1394, 2002.
- [33]. Tarchala, G., M. Dybkowski, T. Orłowska-Kowalska, Analysis of the chosen speed and flux estimators for sensorless induction motor drive, *International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 525-530, 2011
- [34]. Иванов Г., И. Костов, Й. Пищийски. „Сравнителен анализ на MRAS структури за оценка на скоростта в асинхронни електрозадвижвания”, *Journal of the Technical University – Sofia Plovdiv branch, Bulgaria, “Fundamental Sciences and Applications”* Vol. 18, 2012, ISSN 1310 – 827, стр.33-42
- [35]. Zatocil, H., "Sensorless control of AC machines using high-frequency excitation," *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, vol., no., pp.1024-1032, 1-3 Sept. 2008
- [36]. Mollov L., P. Petkov, Вградени системи за управление: Състояние и проблеми, *Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv “Fundamental Sciences and Applications”*, Vol. 16, 2011, *International Conference Engineering, Technologies and Systems TechSys 2011*.
- [37]. Verma A., S. Dhingra, M. K. Soni, Design and synthesis of FPGA for speed control of induction motor, *International Journal of Physical Sciences* Vol. 4 (11), pp. 645-650, 2009.
- [38]. de Araujo Ribeiro, R.L.; Jacobina, C.B.; Da Silva, E. R C; Lima, A.M.N., "Fault-tolerant voltage-fed PWM inverter AC motor drive systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.51, no.2, pp.439,446, April 2004.

Автори: Иван Костов, доц. д-р - катедра „Системи за управление”, Факултет Електроника и Автоматика, Технически Университет - София, филиал Пловдив, E-mail address: ijk@tu-plovdiv.bg, Георги Иванов, инж. маг. докторант - катедра „Системи за управление”, Факултет Електроника и Автоматика, Технически Университет - София, филиал Пловдив, E-mail address: georgi.iwanow@gmail.com

Постъпила на 09.05.2013

Рецензент доц. д-р Е. Йончев