



ISSN 1310-8271

JOURNAL

**OF THE TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
PLOVDIV BRANCH, BULGARIA
FUNDAMENTAL SCIENCES
AND
APPLICATIONS
Volume 20, 2014**

СПИСАНИЕ

**НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ, БЪЛГАРИЯ
ФУНДАМЕНТАЛНИ НАУКИ
И
ПРИЛОЖЕНИЯ
том 20, 2014**

| | |
|---|------------|
| 12. ANASTAS STOYANOV | 65 |
| METHODOLOGY FOR THE STUDY OF LATENT HEAT ACCUMULATOR AS A PART OF SOLAR SYSTEM | |
| 13. ANTON DEMIREV | 73 |
| CORROSION POTENTIAL OF STEEL 1.4439 | |
| 14. ILIYCHO ILIEV | 77 |
| A NONLINEAR PARAMETRIC MODEL OF SECOND DEGREE FOR Cu+ Ne-CuBr LASER'S SERVICE LIFE | |
| 15. IVAYLO ATANASSOV | 83 |
| ANALYSIS OF THE MULTILEVEL PRIORITY QUEUES SERVICING | |
| 16. IVAYLO ATANASSOV | 89 |
| LOAD BALANCING THREADS FOR MULTILEVEL PRIORITY QUEUE USING MAIN THREAD APPROACH | |
| 17. RUMEN POPOV, ROSITSA KAZAKOVA | 95 |
| RESEARCH ON STATISTICAL ALGORITHMS FOR PARAMETER ESTIMATION OF THE CHAOTIC SYSTEMS | |
| 18. ROSITSA KAZAKOVA, RUMEN POPOV | 103 |
| STRUCTURAL SYSTEM IDENTIFICATION USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS | |
| 19. IVAN KOSTOV, VASIL SPASOV, GEORGI IVANOV | 109 |
| INVARIANTS OF ELECTRICAL MOTORS POWER SAVING CONTROL LAWS | |
| 20. ZACHARY KAVROSHILOV | 117 |
| ADVANTAGES OF USING NEW CONTROL SYSTEMS OF RATIO „AIR-FUEL” | |
| 21. SEVIL AHMED | 123 |
| CONTROL SYSTEM CONFIGURATION OF A ROBOTIZED WIRELESS SENSOR NETWORK | |
| 22. VALENTIN BACHEV | 131 |
| KINEMATICS OF A TWO-AXIS OFF-ROAD VEHICLE | |
| 23. VALENTIN BACHEV | 139 |
| AN AUTOMATIC MACHINE WITH A RECHARGE MECHANISM DRIVEN BY TWO GAS ENGINES | |
| 24. VALYO NIKOLOV | 145 |
| MECHANICAL-MATHEMATICAL MODEL OF STIRLING ENGINE WITH RHOMBIC DRIVE MECHANISM | |
| 25. NIKOLA NACHEV | 149 |
| ADVANTAGES OF THE GEROLLER NON-SEPARATOR CONSTRUCTION OVER THE ONE ONLY WITH CYCLOID PROFILES | |
| 26. HRISTINA DAYLYANOVA, IVANKA DEKOVA | 153 |
| INTERNSHIPS AND PRACTICAL TRAINING OF STUDENTS | |
| 27. TONI MIHOVA | 159 |
| PUBLIC-PRIVATE PARTNERSHIPS IN BULGARIA | |



ИНВАРИАНТИ ЗА ЕНЕРГОИКОНОМИЧНО УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

ИВАН КОСТОВ, ВАСИЛ СПАСОВ, ГЕОРГИ ИВАНОВ

Резюме: *Получени са и са систематизирани математични модели на енергийни инварианти в основните видове електрически машини за целите на тяхното управление в относителни и абсолютни единици. Представени са резултати от изчислителни процедури за количествена оценка на инвариантната мощност на загубите в относителни единици. Процедурите са осъществени чрез математични модели на примера на машина за постоянен ток. Достоверността на получените резултати е потвърдена чрез сравнителен анализ с неоптималната мощност на загубите при постоянен момент в първа зона и при постоянна мощност/момент във втора зона. Крайните резултати са представени в графичен вид. Дадени са насоки на бъдещи изследвания.*

Ключови думи: *двигател за постоянен ток, асинхронен двигател, синхронен двигател, енергийна инварианта, управление, мощност на загубите.*

INVARIANTS OF ELECTRICAL MOTORS POWER SAVING CONTROL LAWS

IVAN KOSTOV, VASIL SPASOV, GEORGI IVANOV

Abstract: *Mathematical models of energy invariants in the main types of electric machines have been obtained and summarized for their control in relative and absolute terms. Results are presented of the computational procedures for quantitative evaluation of the invariant power loss in relative units. The procedures are performed by mathematical models following the example of DC machine. The validity of the results is confirmed by comparative analysis with inefficient power loss at a constant torque in the first zone and at constant power/torque in the second zone. The final results are presented in graphical form. Guidance is given for future research.*

Key words: *DC motor, induction motor, synchronous motor, energy invariant, control, power losses.*

1. Въведение

Технологичният скок, извършен през последните две столетия, се характеризира преди всичко с това, че на основата на фундаментални научни открития бяха намерени механизми за използване на природния енергиен потенциал. Въпреки че тези механизми постоянно се усъвършенстват и намират своето

въплъщение във вид на конкретни технически решения, енергийното бъдеще не е сигурно, а сигналите за бъдеща енергийна криза вече се проявяват. Основната част от използваната в момента енергия е резултат от изгаряне и преработка на природни ресурси, запасите на които непрекъснато намаляват. Самите процеси на производство и потребление на енергия

оказват негативно и засега необратимо влияние върху екологичната ситуация, значението на която вече започна да се признава. Възможно е в близко бъдеще да бъдат открити принципно нови технологии и механизми за получаване на енергия, лишени от отрицателно въздействие върху околната среда, и тогава ще се осъществи т.нар. енергиен пробив. Засега обаче цената на добиваната енергия постепенно нараства и особена актуалност придобива проблемът за максимално ефективното и разумното ѝ използване. Напоследък значителна част от усилията на научно-техническата общност - учени, конструктори и разработчици на технически системи - е насочена към търсене на пътища за икономия на енергия и към развитие на енергоикономични технологии, при това още на стадия конструиране на техническите обекти (използване на по-малко енергопоглъщащи материали, усъвършенстване на конструкции и т.н.), на стадия проектиране на техническите системи (например, избор на оптимална от енергийна гледна точка структура на системата) и на стадия експлоатация (адекватно натоварване на технологичното оборудване и използване енергоикономични способности и алгоритми за управление).

Основен потребител на електрическа енергия са електромеханичните системи (ЕМС) - електрозадвижвания, работещи в състава на различни промишлени, транспортни и битови механизми и агрегати. Затова проблемът за осигуряване на максимална ефективност на процесите на преобразуване на енергията в електрозадвижванията (ЕЗ) е твърде актуален, а неговото решаване има несъмнена практическа стойност.

Асинхронният двигател е предпочитан за използване в различни технологични установки и агрегати поради простотата на конструкцията си, високата надеждност, добрите масогабаритни и ценови показатели в сравнение с двигателя за постоянен ток, и по всичко личи, че в бъдеще ще стане основен електромеханичен преобразувател. Във връзка с това, задачата за осигуряване на максимално ефективно електромеханично преобразуване на енергията в асинхронното електрозадвижване (АЕЗ) е особено актуална. За същественото разширение на областите на приложение на АЕЗ на първо място способства техническата реализация на идеите на честотното регулиране, разработката на евтини електронни силови преобразуватели, а на второ място - използването на математическия апарат на координатните преобразувания на променливите на обобщената електрическа машина.

Координатните преобразувания на променливите служат не само като ефективен инструмент за анализ на процесите в електрическите машини за променлив ток - както асинхронни, така и синхронни, - уеднаквявайки ги с тези на машините за постоянен ток, но и значително опростяват задачата за синтез на оптимални регулатори за управление.

Известно е, че всяка оптимална система се изгражда, изхождайки от достигането на екстремални стойности на определена оценка, характеризираща качеството на нейната работа. Изборът на оценка за качеството на електрозадвижването се обуславя от режимите му на работа и условията на експлоатация. Във връзка с това електрозадвижванията се разделят на две съществено различни групи. Към първата се отнасят електрозадвижванията, работещи в динамични режими, свързани с отработката на бързо изменящи се управляващи и смущаващи въздействия. Към втората група се отнасят електрозадвижванията, работещи основно в статични режими с постоянен или бавно изменящ се съпротивителен момент. Двете групи се различават съществено по свойства, техническа реализация и цена, като цената на първите е с един порядък по-висока от тази на вторите.

За електрозадвижванията от втората група съществуват две формулировки на задачата за оптимизация. Първата е свързана с избора на управляващи въздействия (напрежение, честота), осигуряващи необходимите за технологичния процес скорост и момент и оценката на тези въздействия с помощта на съвкупност от показатели на качеството на управление (загуби на мощност, електрически загуби в статора, електрически загуби в машината, фактор на мощността $\cos\phi$, коефициент на полезно действие и др.). Втората формулировка е свързана със задачата за най-пълно използване на енергийните ресурси на АД при претоварване на задвижването - осигуряване на максимална мощност при наличие на ограничения (максимално-допустима стойност на статорния ток, на статорното напрежение, на загубите в двигателя и др.). Осигуряването на максимална механична мощност при зададена скорост води до получаване на максимален момент, а при зададен момент води до получаване на максимална скорост, а следователно и до максимална производителност на механизма.

В статията е поставен и решен проблемът за намиране на обобщени критерии за определяне на инварианти на управлението, приложими за проектиране на оптимални

електрозадвигвания с двигатели за постоянен и променлив ток.

Таблица 1
Типични инварианти в ЕМС

| Таблица 1. | |
|--|--|
| Решаване на задача | Инварианти |
| | <i>Електромагнитни инварианти</i> |
| $\Psi_s = \text{const}$ | Поддържане на постоянно потокосцепление на статора. |
| $\Psi_r = \text{const}$ | Поддържане на постоянно потокосцепление на ротора. |
| $\Phi = \text{const}$ | Поддържане на постоянен магнитен поток. |
| | <i>Енергийни инварианти</i> |
| $\Phi = \Phi_{\text{opt}}$ | Поддържане на оптимален магнитен поток. |
| $s = s_{\text{opt}}$ | Поддържане на оптимално хлъзгане. |
| | <i>Технологични инварианти</i> |
| $\omega = \omega_0$ | Поддържане на зададена честота на въртене. |
| $\theta = \theta_0$ | Позициониране на зададен ъгъл на завъртане. |
| $\Delta\theta = \Delta\theta_0$ | Завъртане на вала на зададен ъгъл. |
| $M = M_0$ | Поддържане на зададен момент на вала. |
| $P = P_0$ | Поддържане на зададена мощност. |
| $\omega = f_1(t)$ $\theta = f_2(t)$ $M = f_3(t)$ $P = f_3(t)$ | Изменение на честотата на въртене, ъгъла на завъртане, въртящия момент или мощността по зададен закон във времето. |

2. Математичен модел на мощността на загубите и енергийни инварианти в електромеханичните системи (ЕМС)

2.1. Модел на загубите

В теорията на управлението критериите на управлението и целите на проектантите е прието да се изразяват във вид на съответна система инварианти, а инвариантите, свързани с оптимизацията на енергийните режими, се наричат енергийни [5,6].

Най-ефективният от енергийна гледна точка е режимът на ЕМС, при който загубата на енергия в нейните силови канали е минимална. Затова допълнително под енергийни инварианти на ЕМС се разбира свързването на физически променливи в съотношения по определен начин, характеризиращи режима на минимална загуба на енергия.

Както е известно, енергията, подавана към ЕМС и в крайна сметка използвана за извършване на механична работа, преминава в нейния силов канал етапи на електрическо, електромеханично и механично преобразуване. При това част от енергията неизбежно се губи, отделена под формата на топлина. Но ако загубите в електрическите (токоизправители, преобразуватели, инвертори и т.н.) и механични преобразуватели се определят основно от

конструктивните им особености, то в електромеханичните преобразуватели (електрическите двигатели) съществува възможност да се променя в известна степен нивото на загубите, без да се променя конструкцията или режима на работа. Потенциалната възможност за оптимизация на енергийните режими е отбелязана в редица документи [2,3] чрез анализ на изменението на съставлящите загуби в зависимост от режима на работа.

Загубите на енергия в електрическата машина са сложна нелинейна функция на електрически, магнитни и механични величини. В общия случай загубите на енергия могат да бъдат представени като сума на постоянните загуби, независими от натоварването и на променливите загуби, зависими от натоварването [4]. Постоянните загуби включват магнитните загуби (загуби в стоманата от хистерезис и вихрови токове), механичните загуби и загубите във възбудителната верига (електрически от възбудителния/намагнитващия ток). Променливите загуби зависят от натоварването на вала на двигателя и са електрически загуби в медта на намотките от котвения/статорния и роторния ток. В последващите разсъждения се приема, че връзката между магнитен поток и възбудителен ток е линейна и че в общия случай не се налага ограничение върху големината на координатите скорост, магнитен поток и мощност. Така общите загуби ΔP_{Σ} могат да бъдат записани както следва [5]:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{\text{mech}} + \Delta P_e + \Delta P_{Cu}, \quad (1)$$

където ΔP_{Fe} , ΔP_{mech} , ΔP_e , ΔP_{Cu} са съответно загубите в стоманата, в механичните части на двигателя, във възбудителната верига и в медта.

Загубите в стоманата, включващи загуби от хистерезис и вихрови токове, зависят от марката/типа на използваната стомана и от амплитудата и честотата на изменение на магнитния поток:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe_{\text{nom}}} \left(\frac{f}{f_{\text{nom}}} \right)^{\beta} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{\text{nom}}} \right)^2, \quad (2)$$

където $\Delta P_{Fe_{\text{nom}}}$ са номиналните загуби в стоманата, Φ - пълният магнитен поток, f - честотата на пренамагнитването, Φ_{nom} и f_{nom} - номиналните им стойности, а β е коефициент, зависим от марката/типа използвана стомана.

Механичните загуби се състоят от загуби в лагерите, загуби от триене в четките и вентилационни загуби. Те се определят от честотата на въртене:

$$\Delta P_{\text{mech}} = \Delta P_{\text{mech nom}} \left(\frac{\omega_{\text{mech}}}{\omega_{\text{mech nom}}} \right)^n, \quad (3)$$

където ω_{mech} е честотата на въртене, n – степенен показател, зависим от механичните свойства на двигателите (от инерционния момент на котвата, типа на лагерите, начините на охлаждане и др.), $n = 1 \div 1.5$, а $\Delta P_{\text{mech nom}}$ са номиналните механични загуби.

Загубите във възбудителните вериги характеризират разсейването на енергията в намотките, които формират пълния магнитен поток на машината и се определят от

$$\Delta P_e = I_e^2 r_e \quad (4)$$

$$\Delta P_e = I_0^2 r_e, \quad (5)$$

където r_e е активното съпротивление на еквивалентната възбудителна намотка; $I_e(I_0)$ – възбудителен ток (реактивната съставлява на статорния ток).

Загубите в медта на котвената (роторната) намотка в областта на малките хлъзгания са

$$\Delta P_{\text{Cu}} = I_a^2 r_a \quad (6)$$

$$\Delta P_{\text{Cu}} = 3I_2'^2 (r_1 + r_2'). \quad (7)$$

В (6) и (7) I_a и r_a са ток и съпротивление на котвата; $I_2'^2$ и r_2' – приведени към статорната намотка ток и съпротивление на котвената верига, а r_1 е съпротивление на статорната намотка.

От (1) – (7) като се премине към относителни единици могат да се запишат сумарните загуби на мощност във вида:

$$\Delta p_{\Sigma} = k_{Fe} f_{\text{rel}}^{\beta} \phi_{\text{rel}}^2 + k_{\text{mech}} \omega_{\text{rel}}^n + k_e i_{e \text{ rel}}^2 + k_{\text{Cu}} i_{a \text{ rel}}^2, \quad (8)$$

където с x_{rel} са означени съответно относителните стойности на честотата на пренамагнитване $f_{\text{rel}} = f f_{\text{nom}}^{-1}$, пълния магнитен поток $\phi_{\text{rel}} = \Phi \Phi_{\text{nom}}^{-1}$, честотата на въртене $\omega_{\text{rel}} = \omega_{\text{mech}} \omega_{\text{mech nom}}^{-1}$, тока на възбудяването

$i_{e \text{ rel}} = i_e i_{e \text{ nom}}^{-1}$ и тока на котвата (ротора)

$i_{a \text{ rel}} = i_a i_{a \text{ nom}}^{-1}$, а с k_{xx} – относителните съставлящи на загубите за номиналния режим на работа; $k_{xx} = \frac{\Delta P_{xx \text{ nom}}}{\Delta P_{\Sigma \text{ nom}}}$.

Вижда се, че сумарните загуби в електрическата машина са нелинейна функция на четири променливи. Като се използват уравненията на връзките от теорията на електрическите машини и се отчетат известните

допускания на теорията, може да бъде намален броят на променливите в (8).

Връзката между тока в котвената намотка и електромагнитния момент за постояннооточовите машини е $M = c I_a \Phi$, а за асинхронните двигатели - $M = c I_2' \Phi \sin \varphi_2$. Тук c е константа, свързана с конструкцията на намотките, а φ_2 – ъгълът между векторите I_2' и Φ .

За работния участък на характеристиките се приема $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$. Тогава

връзката между момента, потока и тока на ротора (котвата) в относителни единици за двата типа машини се записва с един израз:

$$m_{\text{rel}} = i_{\text{rel}} \phi_{\text{rel}}; \quad m = i \phi. \quad (9)$$

В машините за постоянен ток и в асинхронните машини относителната честота на пренамагнитване на стоманата на статора е равна на относителната честота на въртене на ротора:

$$f_{\text{rel}} = \omega_{\text{rel}}; \quad f = \omega. \quad (10)$$

Като се приема магнитната система на машините за ненаситена ($i = \phi$), с помощта на (9) и (10), (8) се записва:

$$\Delta p_{\Sigma} = k_{Fe} \omega_{\text{rel}}^{\beta} \phi_{\text{rel}}^2 + k_{\text{mech}} \omega_{\text{rel}}^n + k_e \phi_{\text{rel}}^2 + k_{\text{Cu}} \frac{m_{\text{rel}}^2}{\phi_{\text{rel}}^2}, \quad (11)$$

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\phi} + k_{\text{mech}} \omega_{\text{rel}}^n. \quad (11a)$$

Механичната енергия, генерирана от машината, се определя от момента и честотата на въртене, които от своя страна зависят от типа на задвижвания механизъм и от характера на обслужвания технологичен процес. Следователно моментът и честотата на въртене представляват величини, технологично налагани на двигателя и управлението на магнитния поток остава единствен реален път за оптимизация на енергийните режими в силовите канали на електрозадвижването.

Оптималният от енергийна точка израз за магнитния поток при зададен момент и честота на въртене може да се определи като се

определи производната $\frac{\partial \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi}$ на (11) и се

намери нейният екстремум от уравнението $\frac{\partial \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi} = 0$.

След елементарни математически преобразувания се получава израз за енергийния инвариант на ЕМС в общия случай:

$$\frac{\partial \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi} = 2k_{Fe}\omega^{\beta}\phi + 2k_e\phi - 2k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^3}, \quad (12a)$$

$$0 = k_{Fe}\omega^{\beta} + 2k_e - 2k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^4}, \quad (12b)$$

$$\phi_{opt}^2 = m\sqrt{\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}}, \quad (12c)$$

$$\phi_{opt} = m^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{0.25}, \quad (12d)$$

$$i_{opt} = m^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{-0.25}. \quad (12e)$$

Изразите (12d,e) дават статичната връзка между магнитния поток, честотата на въртене, момента на вала на двигателя и тока в котвата/ротора, която трябва да се поддържа в процеса на работа за осигуряване на енергоикономично управление на електромеханичните процеси при спазване на технологичните изисквания.

От (12a) се намира втората производна на (11):

$$\frac{\partial^2 \Delta p_{\Sigma}}{\partial \phi^2} = 2k_{Fe}\omega^{\beta} + 2k_e + 6k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^4} > 0, \quad (12d)$$

която е положителна и следователно оптималният магнитен поток по (12d) определя стойност на относителните загуби на мощност $\Delta p_{\phi} = \Delta p_{\phi min}$, зависими от ϕ .

Замествайки (12c) в (11) се получава израз за $\Delta p_{\phi min}$:

$$\Delta p_{\phi min} = 2m\sqrt{k_{Cu}(k_e + k_{Fe}\omega^{\beta})}. \quad (13)$$

Следователно за коефициента на полезно действие η може да се напише

$$\eta = \frac{m\omega}{m\omega + \left(\eta_{nom}^{-1} - 1\right)\left(k_{Fe}\omega^{\beta}\phi^2 + k_e\phi^2 + k_{Cu}\frac{m^2}{\phi^2}\right)}, \quad (14)$$

а за максималния η_{max}

$$\eta_{max} = \frac{m\omega}{m\omega + 2m(\eta_{nom}^{-1} - 1)\sqrt{k_{Cu}(k_{Fe}\omega^{\beta} + k_e)}}, \quad (15a)$$

или

$$\eta_{max} = \frac{\omega}{\omega + 2(\eta_{nom}^{-1} - 1)\sqrt{k_{Cu}(k_{Fe}\omega^{\beta} + k_e)}}. \quad (15b)$$

2.2. Модел на енергийната инварианта

Електромагнитните и механичните променливи на ЕМС си взаимодействат във времето според добре известни физични закони

и се намират в известни отношения със статичните режими, изразени в подходящи математически модели. Някои от тези променливи са управляващи и трябва целенасочено да се променят в съответствие със спецификата и целта на функционирането на цялата система. Генерирането на необходимото механично движение е свързано с управление на променливи, характеризиращи това движение - позиция, скорост, въртящ момент. Механичните променливи се управляват в съответствие с изискванията на процеса, което се осигурява от технологични инварианти. Следователно, оптимизируемите променливи трябва да се избират от групата на електромагнитните променливи. Също така е очевидно, че управлението на такава променлива трябва да е физически реализуемо, и че трябва да се синтезира независим контур за нейното управление.

За установения режим на електрозадвижването може да се запише $M = M_L$.

$$(16)$$

Като се имат предвид (9) и (12) за оптималния магнитен поток на ДПТ в абсолютни единици може да се запише

$$\Phi_{opt} = \Phi_{nom}M_{nom}^{-0.5}M_L^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{0.25}, \text{ или}$$

$$\Phi_{opt} = k_I M_L^{0.5}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{0.25}. \quad (17)$$

За оптималния котвен ток се получава

$$I_{opt} = \frac{M_L}{c_I \Phi_{opt}} = \frac{M_L^{0.5}}{c_I k_I}\left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe}\omega^{\beta}}\right)^{-0.25}. \quad (18)$$

Този подход позволява да се получи система от енергийни инварианти за основните видове електрозадвижвания с двигатели за постоянен и променлив ток, а крайният резултат е обобщен в табл. 2.

Коефициентите k и c зависят от електромагнитните параметри и мощността на електрическата машина, M_L е натоварването на вала на двигателя, ω е ъгловата скорост на ротора/котвата, z_p са чифтовете полюси, а L_m , L_{md} и L_r са взаимната и собствените индуктивности на намотките.

3. Графично представяне на резултатите.

На фиг. 1 са показани резултати от зависимостта на загубите на мощност от скоростта за асинхронен двигател. На фиг. 1а е показано изменението на сумарната мощност на

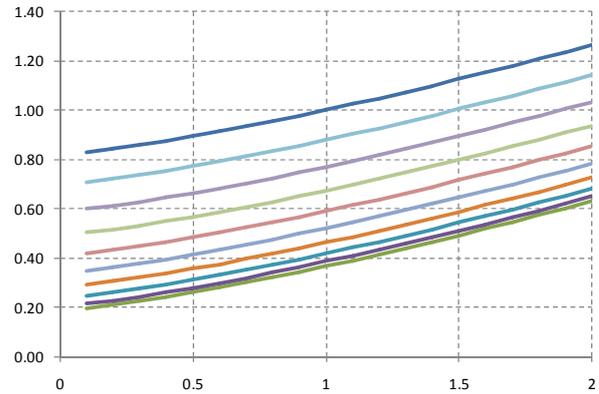
постоянните и променливите загуби при двузонно регулиране с постоянен момент в първа зона и с постоянна мощност във втора зона. На фиг. 1б е дадена мощността на променливите загуби, а на фиг. 1в – мощността на постоянните загуби. Двигателят е тип АО90L-4D с параметри $k_{Cu}=0.64$, $k_{Fe}=k_e=0.18$, $\beta=1.3$ и $\eta_{nom}=75\%$.

Таблица 2

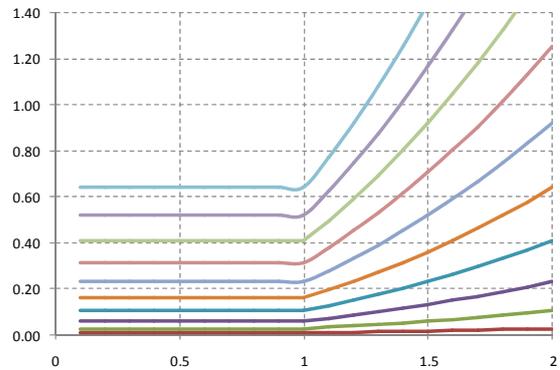
Енергийни инварианти в ЕМС

| Оптимална променлива | Енергийна инварианта |
|-------------------------------|---|
| | <i>Постояннотокова машина</i> |
| Магнитен поток | $\Phi_{opt} = k_1 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$ |
| Ток на възбудителната намотка | $I_{e opt} = k_\phi k_1 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$ |
| Котвен ток | $I_{opt} = \frac{M_L^{0.5}}{c_1 k_1} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{-0.25}$ |
| Уравнения на връзките | $k_1 = \Phi_{nom} M_{nom}^{-0.5}$, $k_\phi = \Phi_{nom}^{-1} I_{e nom}$, $c_1 = z_p N (2\pi a)^{-1}$ |
| | <i>Асинхронна машина</i> |
| Роторно потокоцепление | $\Psi_{r opt} = k_2 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$ |
| X компонента на статорния ток | $I_{sx opt} = k_{\psi x} k_2 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$ |
| Y компонента на статорния ток | $I_{sy opt} = \frac{M_L^{0.5}}{c_2 k_2} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{-0.25}$ |
| Уравнения на връзките | $k_2 = \Psi_{r nom} M_{nom}^{-0.5} = L_m I_{sx nom} M_{nom}^{-0.5}$, $k_{\psi x} = \Psi_{r nom}^{-1} I_{sx nom} = L_m^{-1}$, $c_2 = 3z_p L_m (2L_r)^{-1}$ |
| | <i>Синхронна машина</i> |
| Роторно потокоцепление | $\Psi_{r opt} = k_3 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$ |
| Ток на възбудителната намотка | $I_r opt = k_{\psi d} k_3 M_L^{0.5} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{0.25}$ |
| q компонента на статорния ток | $I_{sq opt} = \frac{M_L^{0.5}}{c_3 k_3} \left(\frac{k_{Cu}}{k_e + k_{Fe} \omega^\beta} \right)^{-0.25}$ |
| Уравнения на връзките | $k_3 = \Psi_{r nom} M_{nom}^{-0.5} = L_{md} I_{sx nom} M_{nom}^{-0.5}$, $k_{\psi d} = \Psi_{r nom}^{-1} I_{sx nom} = L_{md}^{-1}$, $c_3 = 3z_p 2^{-1}$ |

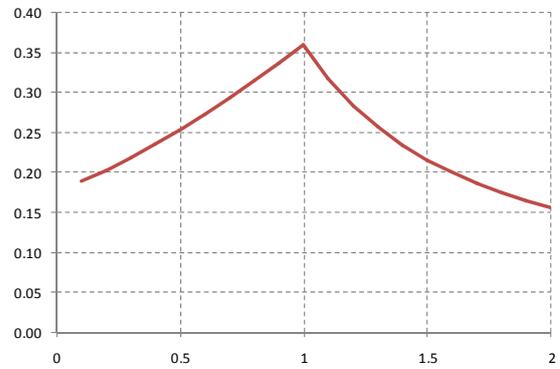
Параметър на изследването е моментът на двигателя. Вижда се, че сумарните загуби не превишават номиналните за моменти до около 60% от номиналния.



а



б



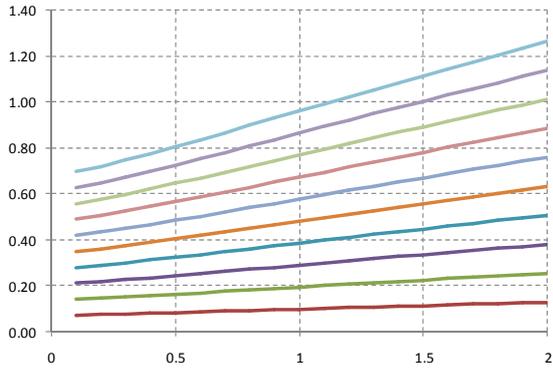
в

Фиг.1. Зависимост на относителната мощност на загубите Δp_ϕ от скоростта ω .

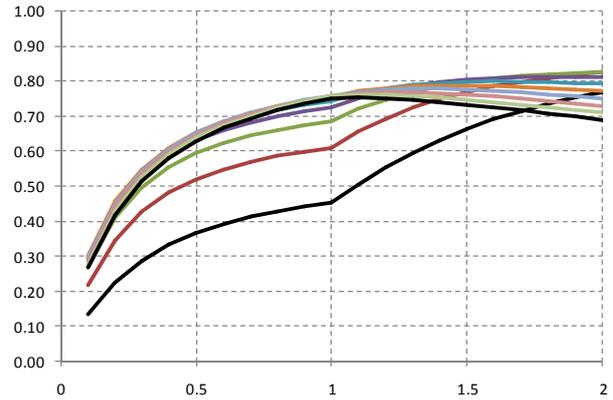
а- Δp_ϕ , б- Δp_{Cu} , в- ($\Delta p_{Fe} + \Delta p_e$).

$\phi=1, \omega \leq 1; \phi = \omega^{-1}, \omega > 1; 0 < m \leq 1$.

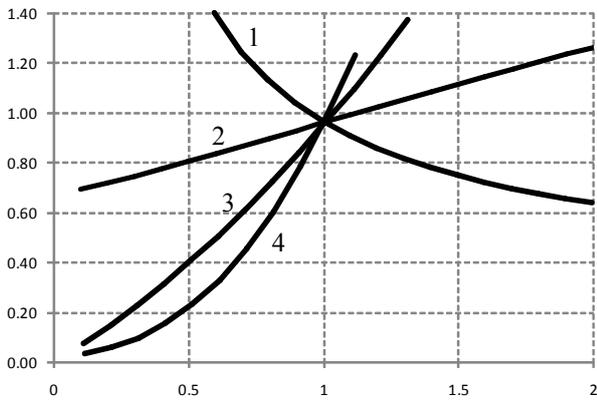
На фиг. 2 е показано изменението на относителната минимална мощност на загубите $\Delta p_\phi min$ от скоростта $\Delta p_\phi min = f(\omega)$ за различни натоварвания между празен ход и номинално натоварване в съответствие с (13).



Фиг. 2. Зависимост на относителната мощност на загубите $\Delta p_{\phi \min}$ от скоростта ω . $0 < m \leq 1$.

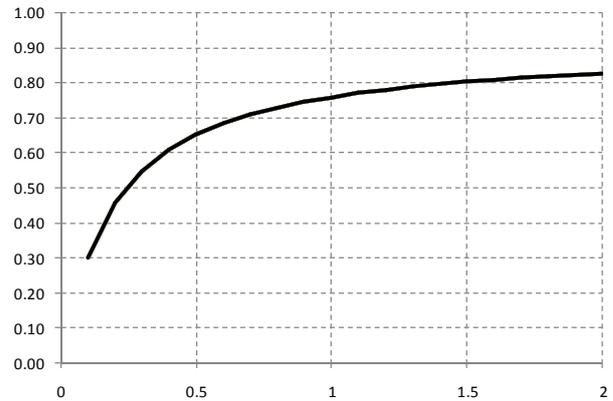


Фиг. 5. Зависимост на η от скоростта ω . $\phi = 1, \omega \leq 1; \phi = \omega^{-1}, \omega > 1; 0 < m \leq 1$.



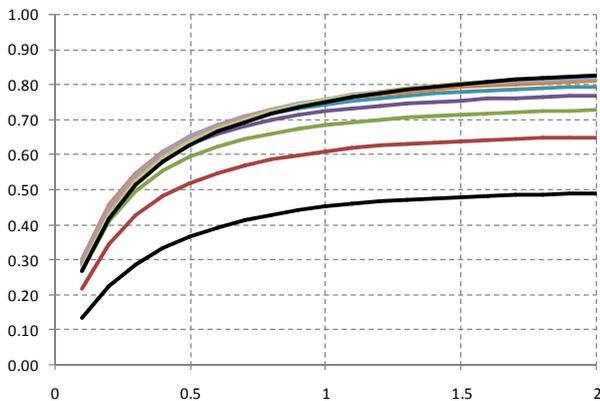
Фиг. 3. Зависимост на относителната мощност на загубите $\Delta p_{\phi \min}$ от скоростта ω . $m = \omega^n, n = -1, 0, 1, 2$.

На фиг. 3. е показана зависимост на относителната мощност на загубите $\Delta p_{\phi \min}$ от скоростта за електрозадвижвания на механизми с различен характер на съпротивителния момент в зависимост от скоростта – хиперболичесен (1), постоянен (2), линеен (3) и квадратичен (4).

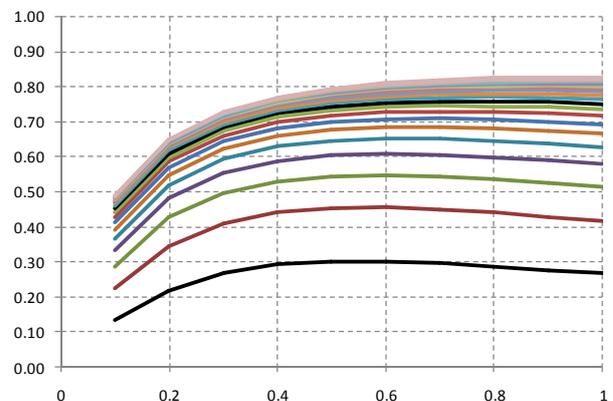


Фиг. 6. Зависимост на η_{\max} от скоростта ω .

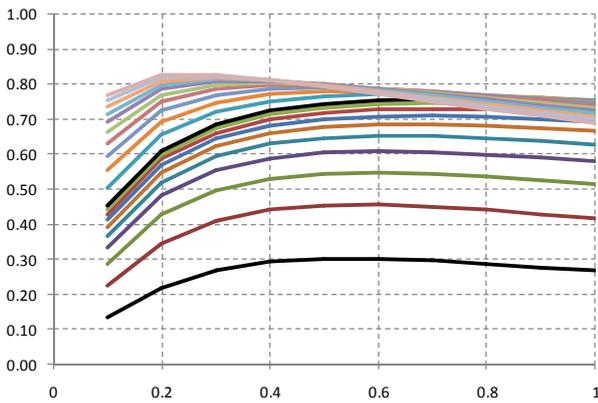
Показани са зависимостите на коефициента на полезно действие от скоростта за случаите на постоянен магнитен поток (фиг. 4) в двете зони на управление на скоростта; на постоянна мощност (фиг. 5) във втора зона и на максималния коефициент на полезно действие (фиг. 6). По-големи възможности за икономия на енергия има при по-ниски скорости и съпротивителни моменти и по-малко – при номиналните стойности.



Фиг. 4. Зависимост на η от скоростта ω . $\phi = 1; 0 < m \leq 1$.

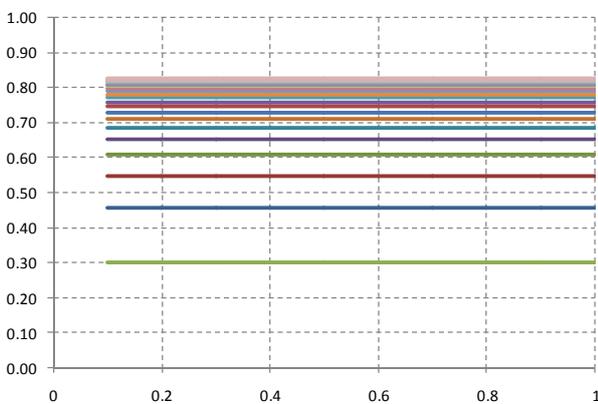


Фиг. 7. Зависимост на η от момента m . $\phi = 1; 0 < \omega \leq 2$.



Фиг. 8. Зависимост на η от момента m .

$$\phi = 1, \omega \leq 1; \phi = \omega^{-1}, \omega > 1; 0 < \omega \leq 2.$$



Фиг. 9. Зависимост на η_{\max} от момента m .

$$\phi = 1; 0.1 < \omega \leq 2.$$

Показани са зависимостите на коефициента на полезно действие от момента за случаите на постоянен магнитен поток (фиг. 7) в двете зони на управление на скоростта, на постоянна мощност (фиг. 8) във втора зона и на максималния коефициент на полезно действие (фиг. 9). Фигурите са аналогични на 4, 5 и 6, но с разменени места на аргумента и параметъра. При малки натоварвания във втора зона и постоянна мощност на вала има възможност КПД да се увеличи над номиналната стойност.

3. Заключение

Претенции за научни и научно-приложни приноси

Разработени са математически модели на енергийни инварианти в относителни и абсолютни единици. Разработените модели са приложени към асинхронен двигател тип АО90L-4D. Проведени са изчислителни експерименти в относителни единици с моделите и са получени графични резултати. Направени са изводи за зависимостта на сумарните загуби от момента на двигателя.

Построени са зависимостите на относителната мощност на загубите от скоростта при различни натоварвания и различен характер на съпротивителния момент. Изследвана е зависимостта на коефициента на полезно действие от скоростта и са направени изводи относно възможностите за енергоикономично управление на асинхронни двигатели. Сравнителният анализ с неоптимална мощност на загубите при постоянен момент в първа зона и при постоянна мощност/момент във втора зона доказва валидността и практическата полза на разработените модели.

Насоки на бъдещи изследвания

Получените инварианти могат да се използват за синтез на енергоикономично управление на статичните режими в съвременни електрозадвижвания с векторно управление на принципа на подчиненото регулиране.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Владимиров П.**, Определяне на съставките на загубите в асинхронна машина при честотно управление, *Научни трудове на Русенския Университет - 2008*, том 47, серия 3.1, стр.33-39.
2. **И.Я.Браславский, З.Ш.Ишматов, В. Н.Поляков**, Энергосберегающий Асинхронный Электропривод, *Москва, Academia 2004*, 202 стр.
3. **Ильинский В., В.Москаленко**, Электропривод. Энерго- и Ресурсосбережение, *Москва, Academia 2008*, 105 стр.
4. **Riccardo Marino, Patrizio Tomei, Cristiano 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.
5. **Kostov I., Rumen Mishkov**, Optimal control of a two-input nonlinear system, *Journal of the Technical University at Plovdiv, 2008*, vol.13 pp. 5-16, ISSN 1310-8271.
6. **Цонев, С., В.Витлиемов, П.Коев**. Методи за оптимизация. (Библиотека за докторанта), 2. изд., Русенски университет, Русе, 2004, ISBN 954-712-229-0, 248 стр.

Control Systems Department
 Electrical Engineering Department*
 Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
 25 Tsanko Dyustabanov St.
 4000 Plovdiv, BULGARIA
 E-mail: ijk@tu-plovdiv.bg
 E-mail: vasilspasov@yahoo.com*
 E-mail: georgi.iwanow@gmail.com