

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Vygintas BATKAUSKAS

DYNAMIC MODELS OF VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVES

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION
TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2006–2010.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Roma RINKEVIČIENĖ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Prof Dr Habil Steponas GEČYS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Dalius NAVAKAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Assoc Prof Dr Jurij NOVICKIJ (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Piotr VASILJEV (Vilnius Pedagogical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Opponents:

Prof Dr Habil Liudmila NICKELSON (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Prof Dr Habil Juozapas Arvydas VIRBALIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 1 p. m. on 19 November 2010.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952; +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt.

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 18 October.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Vygintas BATKAUSKAS

DAŽNINIŲ ELEKTROS PAVARŲ DINAMINIAI MODELIAI

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2010

Disertacija rengta 2006–2010 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Roma RINKEVIČIENĖ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

prof. habil. dr. Steponas GEČYS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. dr. Dalius NAVAKAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

doc. dr. Jurij NOVICKIJ (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Piotr VASILJEV (Vilniaus Pedagoginis universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Oponentai:

prof. habil. dr. Liudmila NICKELSON (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

prof. habil. dr. Juozapas Arvydas VIRBALIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2010 m. lapkričio 19 d. 13 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2010 m. spalio 18 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 1797-M mokslo literatūros knyga.

Introduction

Problem under Investigation

One of the most efficient investigations of variable speed drives is computer modelling. Development and optimization of frequency converters take place under disturbances that result from inaccurate measurements of system parameters, change of object properties or for any other reason. Therefore, development of specific drives used for fan or pump application requires performing a research of a variety controllers working under load conditions.

In the doctoral thesis problems related to the variable frequency drive operating by the different types of controllers and loads are solved and analyzed.

Synergy of induction motor drive model created in a transformed coordinate system together with a variable frequency drive is analyzed. Development of frequency drive model, synthesis of controllers and approval of created models adequacy are problems, solved in this work.

Topicality of the Research Work

Recently the induction motors are replacing the DC motors in the industry because of their reliability and the price. For example USA in 1995 have installed about 100 million of induction motors, in 2004 USA have sold about 2–3 million of pieces of frequency converters. Around 75 % of produced electric energy is consumed by electric motors used for ventilation or pump drives because of this, most popular are frequency converters with scalar control induction drive methods. Vector control frequency converters are mostly used with drive with more than 10 kW.

The development of frequency converters requires large infrastructure, materials, power and other recourses therefore during the last time, scientists problems related with control or design of the drives solved by means of computer modelling of variable frequency drives. One of the most popular simulation programs is *MathWorks Matlab® Simulink®*. It operates under finite element methods and can solve different types of electrical tasks. Therefore it is used for analysis and development of variable frequency drive prototype; however models of worldwide drive producers are confidential. The purpose of this work is to create motor control models for variable frequency drive simulation. It will provide new knowledge to the scientists in one of the world's scientific priority areas – analysis of variable frequency electrical drives.

Research Object

Variable frequency electric drives and their computer models are the objects of this research.

The Aim of the Work

The aim of this work is to create models of the variable frequency electric drives controlled by scalar and vector control methods and verify adequacy of created models.

Tasks of the Work

To achieve the aim of the work these tasks have to be solved:

1. To develop a mathematical and computer model of induction electric drive. To construct induction motor model with different types of regulators for easier investigation of electric drives.
2. To develop and investigate the models with vector control and scalar control method with PI and PD *fuzzy* controllers.
3. To develop sensorless AC electric drive models with speed observers.
4. To make the experimental investigation of proposed control method with prototype of AC frequency converter. To investigate the adequacy of created models.

Applied Methods

Analytical, numerical, experimental methods and *fuzzy* logic methods were applied. Imitation models were realized numerically in *Matlab*® *Simulink*® environment; verifications were carried out with frequency converters experimental stand in Semiconductor Physics Institute (now Semiconductor Physics Institute of Center for Physical Sciences and Technology).

Scientific Novelty

The following research results were obtained, that are relevant in the area of electrical engineering and electronics:

1. New computer model of variable current induction drive in stationary reference frame is developed which can be adapted to different motor power imitations.

2. Frequency converter and controller models together with induction motor model enables to perform analysis of dynamic processes, also to assess a number of important parameters of the inverter output: modulated output voltage amplitude, transition process time, induction motor winding currents, rotation speed of the rotor, load characteristics with precise indication of physical parameters of used motor.

3. Applied and tested variable frequency scalar control drive with pulse with modulation and increased boost voltage, model allows increasing torque, developed by motor.

4. Best drive control results are obtained while using vector control methods in rotor flux reference frame.

5. Computer models of observers for speed estimation on the base of motor current and voltage are developed.

Practical Value of the Work Results

The research results can be used for development of various automatic control systems, synthesis of the optimal controller structures, control laws, control influence, parameters of control equipment at unknown random load characteristics.

Proposed simulation models are easy to improve, adjust, replace and apply for different tasks encountered in the development of frequency drives.

The experimental investigation of frequency controlled induction drive by the converter, developed in Semiconductor Physics Institute, indicates good adequacy of models. Drive has been tested at different loads and ramp conditions.

Statements Presented for Defence

1. Scalar control method with correct selection of starting voltage boost for the specialized drive with pulse width modulation can reduce settling time up to 10 %.
2. Created closed loop speed control systems with different PI and PD *fuzzy* controllers for a specialized drive used when a fast dynamic transients and exact rotor positioning is required.

3. Sensorless drives with an advanced speed observers can replace mechanical sensors and improve speed estimation in design of closed loop control system.

Approval of the Work Results

The results of this work were carried out at Vilnius Gedimino technical university and Semiconductor physics institute. Eleven scientific articles have been published on the topics of this work: four of which are published in journals of Thomson *ISI Web of Science* list, two in journals quoted in *Thomson ISI Proceedings* database, five in other local and international conference materials. The research results were reported at the following eleven scientific conferences also:

1. The Annual International Conferences *Elektronika* (Kaunas, Vilnius 2007, 2008, 2009 m.);
2. The Annual International Conferences *Mechatronic Systems and Materials* (Kaunas, Vilnius 2007, 2009 m.);
3. International conference *Electromagnetic disturbances* (Vilnius, Bialystoc 2008, 2009 m.);
4. International conference *Doctoral school of energy and geo-technology* (Estonia, Kuressaare 2007–2008 m.);
5. The conferences of Lithuanian junior scientists *Science – future of Lithuania* (Vilnius 2007, 2008 m.).

Some materials of this work were gathered by assisting to the scientific project No. B/13/2008 and B/13/2009 “The investigation and development of frequency converters and their introduction into the serial production”.

The Scope of the Scientific Work

The dissertation is written in Lithuanian. The dissertation layout consists of four main chapters, list of references and list of author’s publications on the subject of dissertation. The work covers 111 pages, 55 figures, 4 tables, 85 numbered formulas and 91 bibliographic sources.

1. Control Methods of Variable Speed Electric Drives

Chapter 1 present a brief review of variable frequency drive control methods. Different types of inverter output voltage forming algorithms and

rotor load characteristics are analyzed. Scalar control methods: when the ratio of voltage and frequency is kept constant, stator current kept constant to the slip and independent flux and torque control algorithms of the drive are presented. For the vector control the three phase coordinate conversion into two phase coordinates are explained with the help of vector diagrams. Direct vector control with rotor flux orientation and indirect voltage vector control model in rotor flux coordinates are given. Additionally the stator flux-oriented vector controlled drive is explained. Further on, overviews of different types, of sensorless drive speed estimation methods for control algorithms are discussed. Frequency drive computer modelling and its parameters optimization problems and various approaches are introduced in the last section.

In this chapter model of induction motor in stationary stator reference frame is designed to obtain the dynamic characteristics of speed, torque and current transients of specialized frequency drive. Scalar control algorithm with voltage boost and pulse width modulation method and vector control algorithm in rotor flux coordinates has been created and analyzed. Simulation of developed computer models is presented. Closed loop speed control system with different PI and PD *fuzzy* controllers for a specialized drive is applied. *Matlab*[®] *Simulink*[®] model of the induction motor with the *fuzzy* logic regulator presented in Fig. 1.

Fig. 1. Model of closed loop speed control system with *fuzzy* logic regulator

Induction motor speed regulation, based on Proportional Integral (PI), Proportional Derivative (PD) and *fuzzy* logic regulators are presented in Fig. 2. The simulation results of motor speed control show large overshoot and long settling time when using traditional PI or PD controller. These dynamic characteristics can be substantially improved with the use of *fuzzy* logic controller. Best results achieved when using *fuzzy* PI controller.

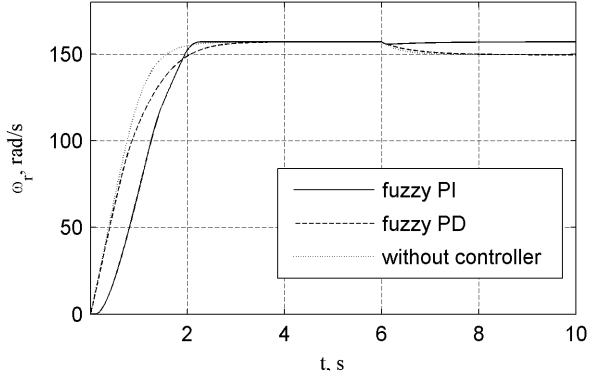


Fig. 2. Dynamic characteristics of drive speed

Dynamic speed and torque characteristics can be analyzed with developed models. Speed response with *fuzzy* PI controller indicates smaller steady-state error and shorter settling time than *fuzzy* PD as indicated Fig. 2.

3. Dynamic Models of Induction Electric Drives with Speed Observers

The dynamic $d^s - q^s$ frame state equation of a machine can be manipulated to compute the speed signal directly. Speed estimation derived from (1) allows accurate and smooth tracing of reference speed of the motor at different frequencies and loads. Based on mathematical model (1), *MATLAB/Simulink* model has been created in order to verify the results of analysis.

$$\omega_r = \frac{1}{\psi_s^2} \left[\left(\psi_{dr}^s \dot{\psi}_{qr}^s - \psi_{qr}^s \dot{\psi}_{dr}^s \right) - \frac{L_m}{\tau_r} \left(\psi_{dr}^s i_{qs}^s - \psi_{qr}^s i_{ds}^s \right) \right]. \quad (1)$$

low frequencies can be neglected. When the rotor reference speed is higher, small errors between estimated and measured speed occurs only at starting process. Absence of error at steady state is most important in fan and pump applications.

The Model Reference Adaptive Systems (MRAS) approach uses two models. The model that does not involve the quantity to be estimated is considered as the reference model and model that has the quantity to be estimated involved, is considered as the adaptive model (or adjustable model). The output of the adaptive model is compared with that of the reference model, and the difference is used to drive a suitable adaptive mechanism whose output is the quantity to be estimated (rotor speed in our case). Reference and adjustable models can be expressed as:

Reference model:

$$\begin{aligned}\psi_{qr}^s &= \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{qs}^s - R_s i_{qs}^s) dt - \sigma L_s i_{qs}^s \right]; \\ \psi_{dr}^s &= \frac{L_r}{L_m} \left[\int (u_{ds}^s - R_s i_{ds}^s) dt - \sigma L_s i_{ds}^s \right].\end{aligned}\tag{2}$$

Adjustable model:

$$\begin{aligned}\frac{d\hat{\psi}_{dr}^s}{dt} &= -\frac{1}{T_r} \psi_{dr}^s - \omega_r \psi_{qr}^s + \frac{L_m}{T_r} i_{ds}^s; \\ \frac{d\hat{\psi}_{qr}^s}{dt} &= -\frac{1}{T_r} \psi_{qr}^s + \omega_r \psi_{dr}^s + \frac{L_m}{T_r} i_{qs}^s.\end{aligned}\tag{3}$$

Block diagram of *MRAS* based speed estimation method is presented in Fig. 6.

Calculated speed trace the measured speed with small distortions over all transient process (Fig. 7.). All the errors in the speed estimation occur due to the variations in the stator resistance R_s which influences the calculation of adjustable model accuracy.

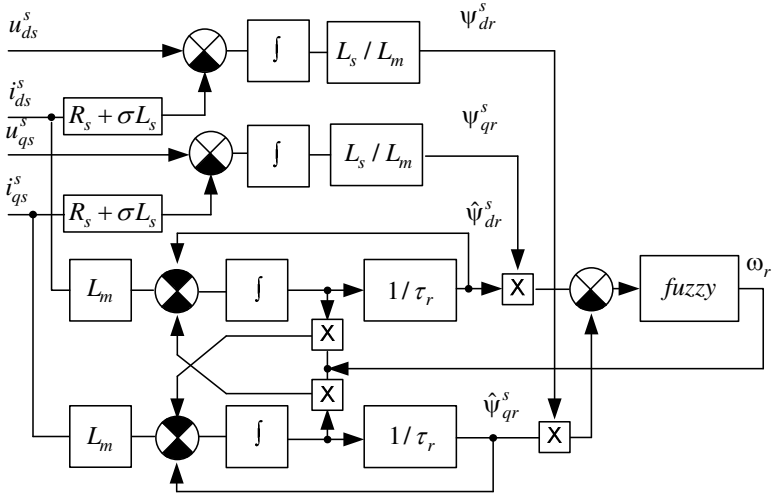


Fig. 6. Algorithm of rotor flux based (MRAS) speed estimation

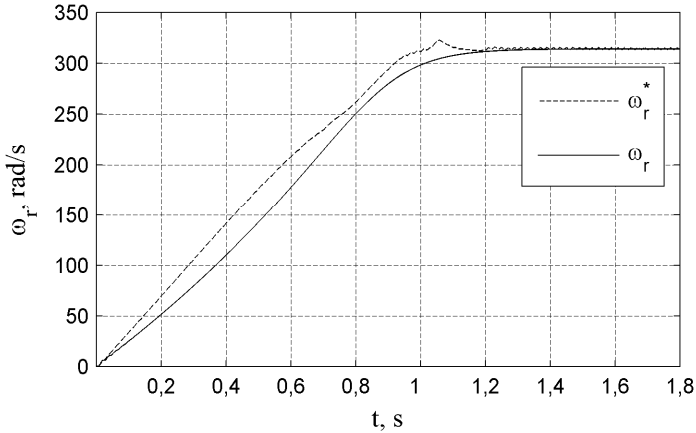


Fig. 7. Transients of rotor speed of starting motor

Estimated steady state speed value is equal to reference speed. The absence of speed error is important for most of the industry applications with controlled induction motors.

4. Verification and Application of Research Results

To confirm the adequacy of created models the experimental investigation of AC motor powered by the frequency converter should be used. A special experimental stand with possibility to adjust a mechanical load also measurement equipment of speed, current and voltage values is essential. This equipment is adapted for displaying the steady state and transient processes. Experimental stand of frequency converter elaborated by Semiconductors physics institute presented in Fig. 8.

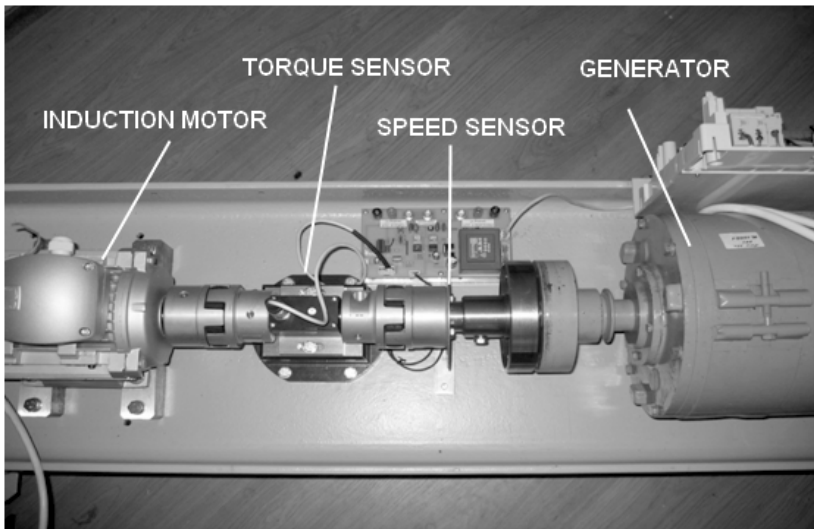


Fig. 8. Experimental stand of frequency controlled drive

Stand of frequency controlled drive is used to investigate motor and frequency converter characteristics and performance of scalar and vector control algorithms under different motor shaft loads. Dynamic characteristics of drive starting transients when the motor is powered by the 30 Hz phase frequency and motor shaft load is 5 N·m are presented in Fig 9. and 10. It is observed that experimentally obtained speed value when the drive is started to the 1800 rpm, corresponds to the results obtained by the computer simulation model with error of 1 %.

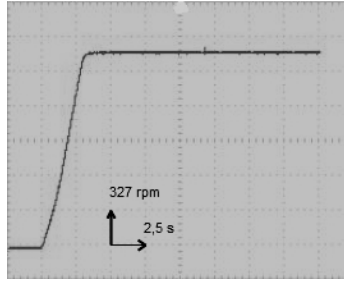
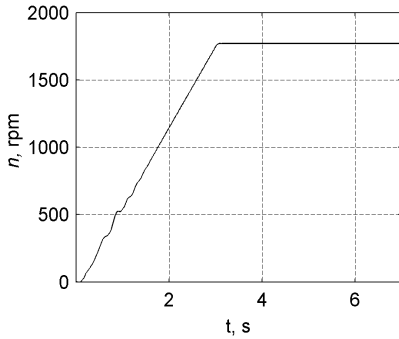


Fig. 9. Simulation and experimental results of rotor speed, at $f_p = 30$ Hz

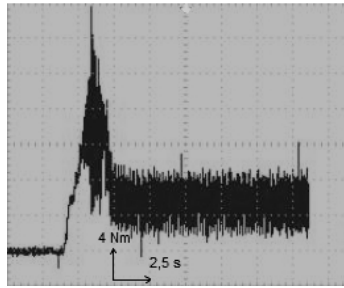
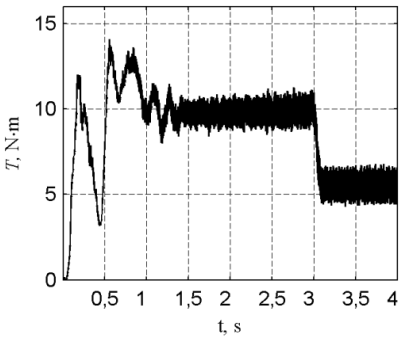


Fig. 10. Simulation and experimental results of torque, at $f_p = 30$ Hz

Rotor torque reaches steady state value after 1,5 s. Experimentally measured motor produces an average of 13 N.m torque which does not exceed rated value and corresponds the simulation results from the computer model.

General Conclusions

1. Induction motor model based on stator stationary reference frame has been applied for complex analysis of dynamic processes of the drive. New scalar control model with voltage boost based on the stator current component control allow increasing dynamic transient time by 10 %.

2. Results of vector control model, created in rotor flux reference frame are compared with the simulation results of model based on scalar control method. In case of scalar control method at motor starting with 2 N.m load, greater

oscillations can be observed, therefore dynamic transient settles down only after 0,2 s. At vector control, loaded motor speed settling time is 2,5 s times shorter. Vector control model allows achieving small static error, short settling time and smaller torque oscillations.

3. New rotor speed observers for induction motor are created. High accuracy of the calculated speed is achieved. All calculated speed results compared with real speed signal. Error between measured and calculated speed do not exceed 0,5 %. Good performance of speed observer based on direct synthesis from state equations achieved only when the speed is over 10 Hz. There for it can't be used at low frequencies. Observer based on model reference adaptation (*MRAS*) with *fuzzy* controller can be created only by measuring currents and voltage of the motor. Error between calculated and measured results does not exceed 5 % at steady-state speed.

4. The scalar control method experimental investigation has been made with a 4 kW induction motor. Results of simulation and experimental dynamic transients when the motor shaft is loaded with 5 N·m static load are measured at 7 Hz and 30 Hz supply frequency. When the supply frequency is 7 Hz steady state speed error do not increase over 3,1 % and the maximum dynamic steady state torque error do not pass 4 %. When the motor is started with 30 Hz power supply frequency, dynamic speed steady state error do not exceed 1 %, however dynamic torque maximum value measured by experimental stand overpass the simulation results by 14,2 %.

List of Published Works on the Topic of the Dissertation

In the reviewed scientific journals

Batkauskas, V.; Batkauskas, V. 2007. Adaptation of a remote control system for data exchange using a mobile data channel, *Electronics and Electrical Engineering*. 3(75): 61–64. ISSN 1392–1215 (ISI Web of Science).

Batkauskas, V.; Rinkevičienė, R. 2008. Modeling and investigation of vector controlled induction drive, *Electronics and Electrical Engineering*. 1(81): 53–56. ISSN 1392–1215 (ISI Web of Science).

Batkauskas, V.; Petrovas, A.; Lisauskas, S.; Baškys, A. 2008. Variable speed drive supplied by the voltage formed using special - purpose algorithm, *Electronics and Electrical Engineering*. 7(87): 53–56. ISSN 1392–1215 (ISI Web of Science).

Batkauskas, V.; Rinkevičienė, R. 2009. Influence of the inverter boost voltage on the transients of variable speed drive, *Electronics and Electrical Engineering*, 4(92): 75–78. ISSN 1392–1215 (ISI Web of Science).

In the other editions

Batkauskas, V.; Batkauskas, V. 2006. Nuotolinės automatinės sistemos adaptavimas duomenų mainams bevieliu ryšiu, *Elektronika ir Elektrotechnika, 9-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 92–100 (in Lithuanian) ISBN 978-9955-28-078-1.

Batkauskas, V.; Rinkevičienė, R.; Lisauskas, S. 2007. Application and analysis of linear induction motors in mechatronic systems, in *Proceedings of Doctoral School of Energy and Geotechnology*. Kuressaare. 69–72. ISBN 978–9985–69–041–3.

Batkauskas, V. 2007. Asinchroninio variklio vektorinio valdymo modelis, *Elektronika ir Elektrotechnika, 10-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 81–88 (in Lithuanian) ISBN 978-9955-28-184-9.

Batkauskas, V. 2008. Dažninės pavaros eksperimentinis tyrimas, *Elektronika ir Elektrotechnika, 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 128–134 (in Lithuanian) ISBN 978-9955-28-373-7.

Batkauskas, V.; Rinkevičienė, R. 2008. Experimental investigation of variable speed drive, in *Proceedings of Doctoral School of Energy and Geotechnology*. Kuressaare. 183–186. ISBN 978-9955-69-046-8.

Batkauskas, V.; Rinkevičienė, R.; Petrovas, A.; Baškys, A. 2008. Dynamics of variable speed drive, in *EMD'2008 proceedings of the XVIII international conference on electromagnetic disturbances*. Vilnius: Technika. 229–232. ISSN 1822–3249 (Thomson ISI Proceeding).

Batkauskas, V.; Lisauskas, S.; Rinkevičienė, R.; Petrovas, A. 2009. Induction motor drive with fuzzy controller, in *EMD'2009 proceedings of the XIX-th international conference on electromagnetic disturbances*. 127–130 ISBN 978-83-60200-72-8 (Thomson ISI Proceeding).

About the Author

Vygintas Batkauskas was born in Panevėžys, on 26 of March 1982.

Bachelor of Science degree in Electrical and electronic engineering at the Faculty of Electronics of Vilnius Gediminas Technical University, 2004.

Master's degree in the same field at the Faculty of Electronics of Vilnius Gediminas Technical University, 2006. In 2003 he studied for one semester at Ingeniorhojskolen Odense Teknikum, Odense, Denmark.

DAŽNINIŲ ELEKTROS PAVARŲ DINAMINIAI MODELIAI

Problemos formulavimas

Vienas veiksmingiausių dažninių elektros pavarų tyrimo būdų yra jų skaitmeninių kompiuterinių modelių sudarymas naudojant juos pereinamųjų vyksmų tyrimui. Dažnio keitiklių kūrimas ir optimizavimas vyksta veikiant trukdžiams, kurie atsiranda dėl matavimo sistemos specifinių savybių, nežinomų faktorių įtakos objekto funkcionavimo rodikliams ir dėl kitų priežasčių. Todėl kuriant dažninių pavarų prototipus, skirtus nesudėtingų ventiliatorinių ir siurblių automatizavimo uždaviniams spręsti, būtina atlikti sistemos, veikiančios įvairiomis reguliavimo ir trukdžių sąlygomis, tyrimus.

Darbe analizuojamos ir sprendžiamos kintamosios srovės dažninių pavarų, valdomų skirtingais metodais ir gebančių veikti, esant ventiliatorinėms ir kitokioms, iš anksto nežinomu dėsniu kintančioms apkrovoms, modelių kūrimo problemos.

Transformuotoje koordinačių sistemoje sudarytas asinchroninio variklio modelis tiriamas kartu su dažnio keitiklio modeliu. Dažninių elektros pavarų modelių sudarymas, reguliatorių sintezė ir modelių adekvatumo tyrimas yra problema, sprendžiama šiame darbe.

Darbo aktualumas

Pastaruoju metu pramonėje nuolatinės srovės variklius keičia asinchroniniai kaip pigesni ir patikimesni. Pavyzdžiui, JAV 1995 m. buvo apie 100 mln. instaliuotų asinchroninių variklių, ten pat 2004 m. dažnio keitiklių parduota apie 2–3 mln. vienetų. Apie 75% visos elektros energijos, kurią sunaudoja elektros varikliai, tenka siurblių ir ventiliatorių pavaroms, todėl šiuo metu populiariausi yra dažnio keitikliai, skirti skaliariniam asinchroninio variklio valdymui. Vektorinio valdymo dažnio keitikliai taip pat yra populiarius tačiau dažniau naudojami didesnės galios (> 10 kW) pavarose.

Dažnio keitiklių kūrimui reikia infrastruktūros, medžiagų, energetinių ir kitų išteklių, todėl paskutiniu metu mokslininkai daugelį problemų, susijusių su pavarų reguliavimu ir tobulinimu, sprendžia pasinaudodami kompiuterine kintamosios srovės dažninių pavarų analize. Paplitę komerciniai programiniai

paketai (pvz., *Matlab® Simulink®*), sudaryti baigtinių elementų pagrindu, gali spręsti daugelį inžinerinių uždavinių, todėl sėkmingai taikomi jau sukurtų dažnio keitiklių prototipų tobulinimui ir analizei, tačiau daugelis didžiųjų pasaulio pavarų gamintojų sukurti imitaciniai modeliai nėra platinami. Šiame darbe sudaryti variklių reguliavimo imitaciniai modeliai, skirti kintamosios srovės dažnio elektros pavarų dinaminį vyksmų tyrimui ir skaičiavimui, padėsiantys Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkams vienoje iš pasaulyje prioritetinių mokslo sričių – tyrimams dažninėse elektros pavarose.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – kintamosios srovės dažninės elektros pavaros ir jų kompiuteriniai modeliai.

Darbo tikslas

Šio darbo pagrindinis tikslas – sukurti kintamosios srovės skaliarinio ir vektorinio būdu valdomų dažninių elektros pavarų kompiuterinius modelius ir ištirti jų adekvatumą.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Sudaryti imitacinį asinchroninio variklio pavaros dinaminį režimų tyrimo modelį ir sukurti programinę įrangą modeliui valdyti, kuri leistų tirti elektros pavarų savybes su skirtingais reguliatoriais, dinamines charakteristikas.
2. Sukurti ir ištirti vektorinio valdymo ir skaliarinio valdymo dažninių elektros pavarų modelį su PI ir PD neraiškiosios logikos reguliatoriais.
3. Sudaryti dažninių elektros pavarų modelius su veleno sukimosi greičio stebikliu.
4. Atlikti valdomos pavaros su dažnio keitiklio prototipu eksperimentinius tyrimus ir patikrinti pasiūlytų metodų adekvatumą.

Tyrimų metodika

Darbe naudojami analiziniai, skaitmeniniai ir eksperimentinio tyrimo bei neraiškiosios logikos metodai, objektinis kompiuterinių modelių sudarymas ir imitacijos. Analiziniai matematiniai modeliai sudaryti *Matlab® Simulink®*

aplinkoje. Eksperimentiniai tyrimai atlikti Fizinių ir technologijos mokslų centro (*FTMC*) puslaidininkų fizikos instituto Mikroelektronikos laboratorijoje.

Darbo mokslinis naujumas

Sprendžiant darbo uždavinius, gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sudarytas naujas kintamosios srovės asinchroninis variklio modelis stacionarioje koordinačių sistemoje, kuris gali būti pritaikytas specializuotiems, įvairios galios variklių pereinamiesiems vyksmams tirti.
2. Sudaryti nauji dažnio keitiklio ir reguliatorių modeliai kartu su asinchroninio variklio modeliu leidžia atlikti variklio paleidimo dinaminių vyksmų analizę, įvertinti daugelį svarbių dažnio keitiklio išėjimo parametrų: išėjimo įtampos amplitudę, impulsų formas, pereinamojo vyksmo trukmę, asinchroninio variklio apvijų sroves, veleno sukimosi greitį, apkrovos momento charakteristikas, žinant naudojamų variklių vardinius parametrus.
3. Pritaikytas ir ištirtas skaliarinio dažninės pavaros modelis, naudoja kintama impulsų pločio moduliacija ir padidinta pradine įtampa, kompensuoja įtampos sumažėjimą statoriaus varžoje, kai įtampos tinklo dažnis $f_p < 10$ Hz.
4. Mažiausios dinaminės ir statinės paklaidos gaunamos, kai valdomas erdvinis rotorius srauto vektorius.
5. Sudaryti dažninių elektros pavarų kompiuteriniai modeliai, leidžiantys įvertinti pavaros greitį, nenaudojant papildomos techninės įrangos greičiui matuoti.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų rezultatai gali būti naudojami automatinio valdymo sistemoms projektuoti, imitacijos metu rasti optimalias reguliatorių struktūras, kitimo dėsnius, valdymo poveikius, valdymo įtaisų parametrus, kai yra nežinomos atsitiktinių, sistemą veikiančių apkrovų charakteristikos arba jos kinta laike, kai valdymo objekto (asinchroninio variklio) matematinis modelis yra sudėtingas. Sudarytus modelius nesunkiai galima tobulinti, derinti, keisti, pritaikyti skirtingiems ar daliniams uždaviniams, su kuriais susiduriama, kuriant dažnines pavaras, spręsti.

Darbo rezultatai leido ištirti Puslaidininkų fizikos institute sukurtą specializuotą dažnio keitiklio, naudojamo skaliariniu valdymo dėsniu reguliuojamose pavarose, charakteristikas ir sudaryti imitacijos modelius skirtingiems pavarų reguliavimo metodams tirti. Sukurta programinė įranga naudojama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Automatinių sistemų mokomojoje laboratorijoje.

Ginamieji teiginiai

1. Skaliarinio valdymo dažninės pavaros modelis naudojantis kintama impulsų pločio moduliaciją ir padidintą pradinę įtampą, leidžia iki 10 % sumažinti pavaros pereinamojo vyksmo trukmę, nurodžius pradinę statoriaus įtampos vertę pagal specializuotai pavarai keliamus reikalavimus.
2. Sukurti nauji uždarnosios greičio reguliavimo sistemos su specializuotu dažnio keitikliu PI ir PD neraiškiosios logikos kompiuteriniai modeliai, taikomi, kai būtinas trumpas pereinamojo vyksmo laikas ar tikslus rotorius padėties nustatymas.
3. Sukurti specializuotai asinchroninei pavarai skirti greičio stebikliai gali pakeisti elektromechaninius greičio jutiklius. Šie stebikliai naudojami sudarant uždarąsias variklio greičio valdymo sistemas.

Darbo rezultatų apibavimas

Tyrimai atlikti Vilniaus Gedimino technikos universitete ir Puslaidininkų fizikos institute. Disertacijos tema yra atspausdinta 11 mokslinių straipsnių. Keturi – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *ISI Web of Science* duomenų bazę; du – leidinyje, įtrauktame į *ISI Proceedings*; du – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje, trys – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagoje.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai pristatyti vienuolikoje mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje:

1. Tarptautinėse konferencijose *Elektronika* 2007, 2008, 2009 m., įvykusiose Kaune ir Vilniuje.
2. Tarptautinėse konferencijose *Mechatronic Systems and Materials* 2007, 2009 m., įvykusiose Kaune ir Vilniuje.
3. Tarptautinėse konferencijose *Electromagnetic disturbances* 2008, 2009 m., įvykusiose Vilniuje ir Balstogėje, Lenkijoje.

4. Tarptautinėse konferencijose *Doctoral school of energy and geo-technology* 2007, 2008 m., įvykusiose Kuresarės mieste, Estijoje.
5. Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijose *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2007, 2008 m., įvykusiose Vilniuje.

Taip pat autorius dalyvavo ir jo darbais remtasi šiuose remiamuose moksliniuose ir kvalifikaciniuose darbuose:

Dažnio keitiklių tyrimas, kūrimas ir įdiegimas į serijinę gamybą. Aukštųjų technologijų plėtros programos projektas, sutarties Nr.: B/13/2008 ir B/13/2009 užsakovas: Lietuvos valstybinis mokslo ir studijų fondas – Puslaidininkų fizikos institutas.

Disertacijos struktūra

Disertacijos aiškinamąjį raštą sudaro keturi skyriai. Pirmajame skyriuje pateikiami dažninių pavarų valdymo būdų apžvalga ir analizė. Antrajame skyriuje nagrinėjami skaliarinio ir vektorinio valdymo metodai, sudarytas asinchroninio variklio modelis su skirtingomis reguliatorių konstrukcijomis. Trečiajame skyriuje nagrinėjami bejutiklinių pavarų greičio įvertinimo metodai pasitelkiant tik matuojamas variklio maitinimo įtampas ir srovių vertes bei variklio charakteristikas. Ketvirtajame skyriuje aprašoma gautų rezultatų eksperimentinė patikra modeliuojant dažnines pavaras *Matlab® Simulink®* aplinkoje, pateikiamas eksperimentinio stendo, skirto dinaminėms pavarų charakteristikoms modeliuoti, charakteristikos. Darbo apimtis 111 puslapių teksto, kuriuose pateiktos: 85 formulės, 55 paveikslai ir 4 lentelės. Disertacijoje remtasi 91 literatūros šaltiniu.

Bendrosios išvados

1. Sukurtas apibendrintas asinchroninės elektros pavaros dinaminį režimų tyrimo modelis stacionarioje statoriaus koordinačių sistemoje, kuris pritaikytas kompleksinei dažninės pavaros dinaminį vyksmų analizei. Sudarytas naujas skaliarinio valdymo pavaros modelis, naudojantis padidintą pradinę statoriaus maitinimo įtampą paleidimo pradžioje, pagrįstas asinchroninio variklio statoriaus srovių dedamųjų valdymu, leidžia iki 10 % sutrumpinti paleidimo proceso pereinamųjų vyksmų trukmę.

2. Sukurtas vektorinio valdymo kompiuterinis pavaros modelis rotoriaus srauto koordinačių sistemoje, modelio rezultatai palyginti su skaliariniu valdymo metodu. Paleidžiant variklį su 2 N·m šuoline apkrova, pastebimi didesni pavaros dinaminio momento virpesiai, esant skaliariniam valdymui,

todėl momento nusistovėjusi vertė pasiekama tik po 0,2 s. Vektorinio valdymo metu pereinamojo greičio proceso trukmė yra 2,5 karto mažesnė. Vektorinio valdymo modelyje pasiekama maža statinė paklaida, pereinamojo proceso trukmė, sukimo momento švytavimai.

3. Sukurti nauji stebikliai dažninių pavarų asinchroninių variklių veleno greičiui apskaičiuoti. Pasiektas didelis kampinio greičio apskaičiavimo tikslumas, kuris palygintas su imitacijos metu gautu greičio signalu. Paklaida tarp išmatuoto ir apskaičiuoto greičio neviršija 0,5 %. Greičio signalo įvertinimo metodas, naudojantis sistemos būsenos kintamuosius, tiksliau seka pavaros greitį, pereinamojo vyksmo metu tik esant maitinimo įtampos dažniui, didesniai negu 10 Hz. Todėl šis greičio stebiklis netinka naudoti mažų greičių srityje. Sukurtas *MRAS* greičio stebiklis su neraiškiosios logikos reguliatoriumi apskaičiuoja veleno sukimosi greitį pagal matuojamas variklio sroves ir įtampas. Paklaida tarp apskaičiuoto ir imitacijos metu gauto veleno greičio neviršija 5 % esant nusistovėjusiam režimui.

4. Sukurto skaliarinio valdymo modelio adekvatumas ištirtas eksperimentiškai, naudojant standą su 4 kW asinchroniniu varikliu. Gautos imitacinės ir eksperimentinės greičių, momentų ir srovių dinaminės charakteristikos, apkrovus variklio veleną 5 N·m statine apkrova ir esant 7 Hz ir 30 Hz tinklo įtampų dažniams. Esant 7 Hz tinklo įtampai, nusistovėjusi veleno sukimosi greičio paklaida neviršija 3,1 %, o maksimali dinaminio ir nusistovėjusio momento – 4 %. Prijungiant variklį prie 30 Hz tinklo įtampos, dinaminė nusistovėjusio greičio paklaida neviršija 1 %, tačiau dinaminio momento maksimali vertė išmatuota eksperimentiškai 14,2 % viršija gautą imitacijos metu. Esant didesniai sukimosi greičio nuostatai, nusistovėjusi greičio paklaida yra mažesnė.

Apie autorių

Vyginas Batkauskas gimė 1982 m. kovo 26 d. Panevėžyje.

2004 m. įgijo elektros ir elektronikos inžinerijos bakalauro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos inžinerijos fakultete. 2006 m. įgijo elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo magistro laipsnį Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos inžinerijos fakultete. 2003 metais šešis mėnesius mokėsi Danijoje Odensės universitete „Ingeniorhojskolen Odense Teknikum“.

Vygintas BATKAUSKAS

DYNAMIC MODELS OF
VARIABLE FREQUENCY
ELECTRIC DRIVES

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering (01T)

Vygintas BATKAUSKAS

DAŽNINIŲ ELEKTROS
PAVARŲ DINAMINIAI MODELIAI

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2010 10 05. 1,5 sp. l. Tiražas 70 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“,
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius