



ISSN 1310-8271

JOURNAL

**OF THE TECHNICAL UNIVERSITY - SOFIA
PLOVDIV BRANCH, BULGARIA
FUNDAMENTAL SCIENCES
AND
APPLICATIONS
Volume 21, book 1, 2015**

СПИСАНИЕ

**НА ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ФИЛИАЛ ПЛОВДИВ, БЪЛГАРИЯ
ФУНДАМЕНТАЛНИ НАУКИ
И
ПРИЛОЖЕНИЯ
том 21, книга 1, 2015**



© Journal of the Technical University - Sofia
Plovdiv branch, Bulgaria
"Fundamental Sciences and Applications", Vol. 21, 2015
International Conference on Engineering, Technologies and Systems
TECHSYS 2015, BULGARIA

EDITORIAL BOARD

EDITOR-in-chief

Prof. Marin Nenchev, DSc Eng., DSc Phys.

РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

ГЛАВЕН РЕДАКТОР

проф. д.т.н., д.ф.н. Марин Ненчев

EDITORS

1. Prof. Sonia Tabakova, PhD
2. Prof. Michail Petrov, PhD
3. Prof. Angel Vachev, PhD
4. Prof. Andon Topalov, PhD
5. Prof. Dimitar Katsov, PhD
6. Prof. Grisha Spasov, PhD
7. Prof. Angel Zumbilev, PhD

ЧЛЕНОВЕ

1. проф. д-р Соня Табакова
2. проф. д-р Михаил Петров
3. проф. д-р Ангел Вачев
4. проф. д-р Андон Топалов
5. проф. д-р Димитър Кацов
6. проф. д-р Гриша Спасов
7. проф. д-р Ангел Зюмбилев

EDITORIAL BOARD

1. Prof. Angel Vachev, PhD
2. Prof. Venelin Zhivkov, DSc
3. Prof. Georgi Andreev, DSc
4. Prof. Georgi Totkov, DSc
5. Prof. Emil Nikolov, DSc
6. Prof. Ivan Iachev, DSc
7. Prof. Marin Hristov, PhD
8. Prof. Ognian Nakov, PhD
9. Acad. Nikola Sabotinov DSc
10. Prof. Marc Himbert DSc
11. Prof. Yasser Alayli DSc
12. Prof. Tinko Eftimov DSc
13. Acad. Yuriy Kuznietsov DSc

РЕДАКЦИОНЕН БОРД

1. проф. д-р Ангел Вачев
2. чл. кор. проф. д.т.н. Венелин Живков
3. проф. д.х.н. Георги Андреев
4. проф. д.м.н. Георги Тотков
5. проф. д.т.н. Емил Николов
6. проф. д.т.н. Иван Ячев
7. проф. д-р Марин Христов
8. проф. д-р Огнян Наков
9. акад. д.ф.н. Никола Съботинов
10. проф. д.ф.н. Марк Амбер
11. проф. д.т.н. Ясер Алайли
12. проф. д.ф.н. Тинко Ефтимов
13. акад. д.т.н. Юрий Кузнецов



CONTENTS

1. T. Cetin Akinci, Unal Sever, Levent Gunaydin, Emine Ayaz, Serhat Seker.....	9
ANALYSIS OF LIGHT LEVELS IN A CLASS IN A DAY USING WAVELET METHOD	
2. Angel Ivanov, Stefan Biliderov, Petar Getsov	17
OPEN SOURCE PRODUCTS AND SCADA FOR AUTONOMOUS UNMANNED SYSTEMS	
3. Galina Cherneva, Antonio Andonov	23
EVALUATION OF THE SPECTRAL PROPERTIES OF INREGULAR PROCESSES IN DISCRETE NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS	
4. Alexander Angelov, Nikola Shakev, Georgi Ganev	27
ELECTRICITY CONSUMPTION FORECASTING OF PUBLIC FACILITY	
5. Rositsa Kazakova	33
STOCHASTIC EVOLUTIONARY ALGORITHMS FOR ESTIMATION - SITUATION AND OUTLOOK	
6. Vladimir Ivanov, Aldeniz Rashidov	43
AUTOMATIC LIGHTING CONTROL SYSTEM	
7. Stefan Kiranov	49
DYNAMIC SIMULATION OF ATMOSPHERIC DISTILLATION COLUMN	
8. Zachary Kavroshilov, Georgi Kavroshilov	53
RATIO CONTROL SYSTEMS	
9. Georgi Terziyski, Ivan Dragotinov	59
AUTOMATION IDENTIFICATION OF PI AND PID CONTROLLERS	
10. Margarita Terziyska, Yanko Todorov, Lyubka Doukovska	65
NEO-FUZZY NEURAL NETWORK FOR MODELLING OF NONLINEAR MIMO DYNAMICS	
11. Robert Kazala, Albena Taneva, Stoicho Penkov	71
NETWORKED SENSORS FOR ROBOT MONITORING AND CONTROLLING	
12. Verica Aleksovska, Albena Taneva, Ivan Ganchev	75
TRAFFIC LIGHTS CONTROL VIA WEB APPLICATION	
13. Ivan Kostov	81
MODELING OF INDUCTION MOTORS BY MEANS OF AN EQUIVALENT CIRCUIT	

14. Ivan Ganchev, Albena Taneva, Sevil Ahmed, Michail Petrov	89
REAL-TIME SIMULATION OF PLANTS IN PROCESS CONTROL	
15. Dimitar Spirov, Nikolay Komitov	95
INVESTIGATIONS OF SOFT-SWITCHING INVERTER WITH TWO AUXILIARY SWITCHES FOR AN INDUCTION MOTOR DRIVE	
16. Bojidar Markov	99
SIMULATION DEVELOPMENT OF LINEAR INDUCTION MOTOR WITH SYSTEM OF DIRECT ELECTROMAGNETIC FORCE CONTROL	
17. Frantisek Zezulka, Petr Marcon, Ondrej Sajdl, Ivo Vesely, Zdenek Bradac	105
STABILIZATION OF GRIDS WITH SIGNIFICANT CONTRIBUTION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES	
18. Zdenek Roubal, Petr Marcon, Zoltan Szabo, Ondrej Saidl, Ivo Vesely, Frantisek Zezulka	111
REMOTE MEASUREMENT AND PERFORMANCE MODELING FOR SMART GRID A-12	
19. Miroslav Atanasov, Vasil Spasov	115
COIL OPTIMISATION OF THE FAST SWITCHED CHOPPER DIPOLE MAGNET FOR THE MEDAUSTRON PROJECT	
20. Ivan Hadziev, Dian Malamov, Ivan Yatchev, Vesko Milev, Ivanka Dekova	121
DEFINING THE COEFFICIENT OF ADDITIONAL LOSSES BETWEEN BUSBARS	
21. Stefan Chobanov	127
TESTS OF MOTOR DIFFERENTIAL PROTECTION	
22. Nikolina Petkova.....	133
DIAGNOSTIC OF POWER TRANSFORMERS	
23. Stefan Chobanov	137
SETTINGS AND TESTS OF TRANSFORMER DIFFERENTIAL PROTECTION (ANSI CODE 87T)	
24. Dinjo Kostov, Georgi Ganey.....	143
CURRENT LIMITING AIR REACTORS ADDITIONAL LOSSES	
25. Svetlin Antonov	147
MODELLING THE DIFFUSION OF HEAT AND POLLUTION IN CASE OF TWO-PHASE NATURE OF THE FLOW	
26. Sevdalina Manolova, Georgi Stoimenov, Stanislav Stojnev	151
DETERMINATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF BIOMASS DRYING WITH MICROWAVE	
27. Yordan Epitropov, Dimitar Fidanov, Kiril Kolikov	157
EVALUATION OF THE MAXIMUM ABSOLUTE INACCURACY OF AN INDIRECTLY MEASURABLE VARIABLE	
28. Stefan Bozhkov.....	163
CONNECTION BETWEEN COULOMB'S POTENTIAL AND THE POTENTIAL ENERGY OF INTERACTION BETWEEN TWO CHARGED CONDUCTING SPHERES	

29. Rumen Popov, Stefan Lishev, Aleksandar Georgiev, Nadezhda Vasileva	169
OPTIMAL POSITION SENSOR FOR ORIENTATION OF PHOTOVOLTAIC PLANTS	
30. Nikolay Paunkov	175
FACTORS INFLUENCING ON THE ENERGY NEEDS OF THE DOMESTIC ECONOMIES. STRATEGIES FOR SAVING OF ENERGY	
31. Seda H. Bostanci	181
SHANNON ENTROPY AND URBAN SKYLINES	
32. Yasin Akman, Tarik Yerlikaya	187
ENCRYPTION TIME MEASUREMENT OF AES	
33. Plamen Vasilev	191
ISO 22400 KEY PERFORMANCE INDICATORS FOR SOFTWARE INDUSTRY	
34. Lilyana Boneva	197
A SURVEY OF EXPERTISE RETRIEVAL APPROACHES	
35. Gergana Lazarova, Todor Tsonkov	203
SENTIMENT ANALYSIS OF TEXTS IN BULGARIAN	
36. Petya Pavlova, Svetlozar Kamishev	207
COMPUTER BASED TESTING OF VISUAL MEMORY FOR COLOUR	
37. Dimitar Garnevski, Petya Pavlova	211
STUDY OF OPPORTUNITIES FOR REMOTE SUPPORT CORONAGRAPH'S DATABASE AT NAO ROZHEN	
38. Svetlana Vasileva	215
SOME APPLICATIONS OF THE GPSS WORLD EXTENDED EDITOR TO CREATE OF EDUCATIVE SIMULATION MODELS	
39. Vladimir Dimitrov, Nadezhda Strazhakova	221
DEVELOPMENT OF IPTV SYSTEM THROUGH WINDOWS MEDIA® PLATFORM	
40. Maria Marinova	225
SOFTWARE TOOLS FOR MULTITHREADED EXECUTION OF PROGRAMS	
41. Ivaylo Nikolov	231
MODELING OF SYSTEMS FOR INCREMENTAL BACKUP IN PUBLIC SECTOR INFORMATION SECURITY DEVELOPMENT	
42. Dimitar Vasilev	237
OPEN SOURCE SOFTWARE FOR SIMULATION AND MONITORING OF COMPUTER NETWORKS	
43. Svetlozar Tsankov, Valentina Voinohovska	241
INFORMATION SYSTEM PEDIATRICS AND MEDICAL GENETICS	
44. Dorina Kabakchieva	245
USING DATA MINING METHODS FOR SOLVING STUDENT RETENTION PROBLEMS	

45. Antonio Hadzhikolev, Krasen Penchev	251
METHODS FOR IMPROVING THE IMPLEMENTATION OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE HIGHER EDUCATION IN BULGARIA	
46. Ivan Kanev	257
COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE AND HARDWARE FPGA-BASED IMPLEMENTATION OF WEIGHTED AVERAGE LINEAR SPATIAL FILTERS	
47. Ivan Kanev	263
AN APPROACH TO FPGA-BASED DESIGN OF WEIGHTED AVERAGE LINEAR SPATIAL FILTERS	
48. Veselin Vasilev	269
DISTRIBUTION OF POWER LOSSES OF TRANSMISSION AND SWITCHING IN INVERTER AND RECTIFIER MODE IN DIFFERENT STRUCTURES ON IGBT INVERTERS WITH TWO AND THREE LEVEL ON OUTPUT VOLTAGE	
49. Veselin Vasilev	275
INFLUENCE OF SWITCHING FREQUENCY AND MODULATION COEFFICIENT OVER HARMONIOUS COMPOSITION ON IGBT INVERTERS WITH TWO AND THREE LEVELS AND ACTIVE-INDUCTIVE LOAD	
50. Dimitar G. Stoyanov	281
PHOTOCONDUCTIVITY OF SEMICONDUCTORS. TRANSITION PROCESS DURING A PLANE CASE	
51. Aleksandar Vuchev, Nikolay Bankov	285
AN ANALYTICAL INVESTIGATION OF A SERIES RESONANT DC-DC CONVERTER WITH AN UNSYMMETRICAL CONTROLLED RECTIFIER	
52. Katya Asparuhova	291
SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF PHOTORESISTOR AND APPLIED CIRCUITS FOR TRAINING IN ELECTRONICS	
53. Katya Asparuhova	295
SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF PHOTODIODE AND APPLIED CIRCUITS FOR TRAINING IN ELECTRONICS	
54. Ivan Rachev	299
APPLICATION OF LINEAR SENSOR ARRAY TSLXXXX FOR CONTACTLESS MEASUREMENT OF OBJECT POSITIONING	
55. Ivan Tanev, Svetoslav Ivanov	303
COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN DRIVERS WITH ADAPTIVE LIMITATION OF CURRENT DRAIN COUPLED WITH FEEDBACK BY DERIVED OF CURRENT	
56. Yanca Kissova, Svetoslav Ivanov	309
SWITCHING POWER SUPPLY SOURCE FOR CHARGING THE CAPACITOR OF HIGH VOLTAGE	
57. Stoyan Tzvetkov, Marian Taslakov, Emilio Mariotti, Sanka Gateva	313
LIGHT-INDUCED ATOMIC DESORPTION FOR ALL-OPTICAL CONTROL OF LIGHT	
58. Margarita Deneva, Boyana Deneva	317
DEVELOPMENT OF NEW SOLUTION OF TWO-WAVELENGTH, TRANSVERSALLY LASER- PUMPED LASER	

59. Nadejda Kaymakanova, Rayna Bojkova, Margarita Deneva	323
LASER REMOVAL OF INAESTHETIC BLOOD VESSELS	
60. Vanya Plachkova	329
POLARIZATION DEPENDENT GAIN IN ERBIUM DOPED FIBER AMPLIFIER IN OVER THE ITU COMMUNICATION GRID	
61. Nikolay Gueorguiev, Aleksandar Kolarov	333
CRITERIA FOR EVALUATION THE EFFECTIVENESS OF THE JAMMER FOR UNDERWATER COMMUNICATION SYSTEMS	
62. Nikolay Gueorguiev, Aleksandar Kolarov	339
CLASSIFICATION OF THE METHODS OF THE WORK OF JAMMER OF UNDERWATER COMMUNICATION SYSTEMS	
63. Adriana Borodzhieva	345
SYNTHESIS OF BCH-CODES DETECTING AND CORRECTING TWO-SYMBOLS ERRORS	
64. Adriana Borodzhieva	351
ENCODING AND DECODING USING REED-SOLOMON CODES WITH TWO- SYMBOLS ERRORS	
65. Peter Z. Petkov	357
AMBIENT TEMPERATURE IMPACT ON PERFORMANCE SPECS OF SATELLITE COMMUNICATION ANTENNAS	
66. Margarita Terziyska, Yancho Todorov, Iliana Nacheva, Maria Doneva, Petya Metodieva.....	361
ANALYSIS OF THE PARTICLE DISTRIBUTION IN GRANULAR FUNCTIONAL FOOD	



МОДЕЛИРАНЕ НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ПОМОЩТА НА ЗАМЕСТВАЩА СХЕМА

ИВАН КОСТОВ

Резюме: Предложен е подход за моделиране на асинхронни двигатели (АД) в програмната среда Simulink на MATLAB с помощта на заместващата схема. За физическо моделиране на заместващата схема на АД е използвана програмната среда SimPowerSystems на MATLAB. По този начин са съчетани предимствата на двете среди за точното описание на физическите процеси в електромеханичните системи и за целите на управлението. Разработен е модел на АД в неподвижни координатни системи за изследване на симетрични режими и процеси в електрозадвижвания, които съществуващите модели не могат да симулират. Достоверността на получените резултати е потвърдена с помощта на симулационни процедури на верификация. Подходът е приложим и за други машини и координатни системи.

Ключови думи: асинхронен двигател, обобщена електрическа машина, моделиране, симулиране, координатни и фазни преобразувания, трансформация на Кларк.

MODELING OF INDUCTION MOTORS BY MEANS OF AN EQUIVALENT CIRCUIT

IVAN KOSTOV

Abstract: An approach for modeling of induction motors (IM) in the MATLAB Simulink software using an equivalent AC circuit has been proposed. For physical modeling of the equivalent circuit of the IM has been used the MATLAB SimPowerSystems software media. This way the advantages of both software environments have been combined for the exact description of the physical processes in electromechanical systems and for control purposes. A model to IM in the fixed coordinates systems has been developed. The model can be used to investigate the symmetrical modes and processes in electric drives, which the existing models can not simulate. The validity of the simulation results is confirmed using simulation procedures of verification. The approach is applicable to other machines and coordinate systems.

Key words: induction motor, summarized electric machine, modeling, simulation, coordinate and phase transformations, Clarke transformation.

1. Въведение

Изследването на електромеханичното преобразуване на енергията в трифазния асинхронен двигател (АД) за целите на управлението, както аналитично, така и числено, най-често се базира на правоъгълни координатни системи [1,7]. Те се получават след

преобразуване на естествената координатна система на АД, в която изследването на динамичните характеристики на АД в трифазна непреобразувана координатна система е по-сложно [8,9]. Но изучаването на динамичните режими на работа на АД в изкуствени координатни системи води до загуба на непосредствена информация за токовете във

фазите на статора и ротора [5,9]. За анализа на АД с управление от полупроводникови преобразуватели, характеризиращи се с променлива структура на силовата верига със сложен и понякога прекъснат характер на електромагнитните процеси, е целесъобразно в качеството на математичен модел да се използва система диференциални уравнения във фазни неподвижни координатни оси [6,10]. В такава система ще се работи с реалните фазни стойности на токовете. Поради тази причина в статията се поставя и решава задачата за създаване на подход за моделиране на АД в трифазна непреобразувана координатна система. Това се постига чрез разработване на конкретен модел на АД в две части:

- имитационна част, която съдържа в явен вид Т-заместващата схема на АД във варианта приведена към неподвижен ротор;

- на виртуална част, която съдържа абстрактните математически трансформации и уравнението на движението в елементарния му вариант.

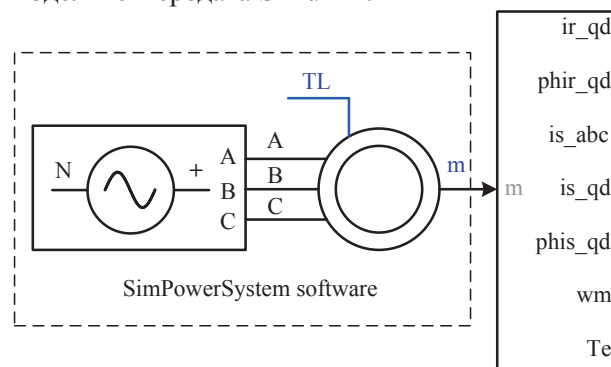
При необходимост механиката на двигателя и електрозадвижването може да бъде също имитационно моделирана, например за случаите на многомасови системи, еластични връзки и хлабини [2,3]. Обект на анализа в общия случай може да бъде несиметрична трифазна намотка, броят на навивките за фаза на която са произволни величини, магнитните оси на фазите са разположени на произволни ъгли. Приема се, че във връзка с асиметрията, намотката е трифазна, т.е. не е изродена до двуфазна или еднофазна [4,6,10].

2. Съществуващо положение

Известни са редица програмни продукти (MATLAB, Psim, 20Sim, CASPOC, Multisim, OpenModelica и др.) [11], в които за целите на анализа и управлението на АД са разработени библиотеки с модели (powerlib, motordrivemodule и др.), основаващи се именно на математичния апарат на обобщената машина и правоъгълни координатни системи чрез техниките на имитационното моделиране*.

В най-използвания програмен продукт MATLAB за анализ, синтез, моделиране и изследване на електрически, електронни, механични и управляващи системи използването на имитационни модели на електрическите машини се осъществява в средата Simulink чрез SimPowerSystems (SPS) software. Библиотеката powerlib на SPS съдържа богат набор от модели на електротехнически съоръжения, пасивни и активни елементи, силова електроника и електрически машини, комплектовани с

интерфейсни инструменти за интегриране на моделите в средата Simulink.



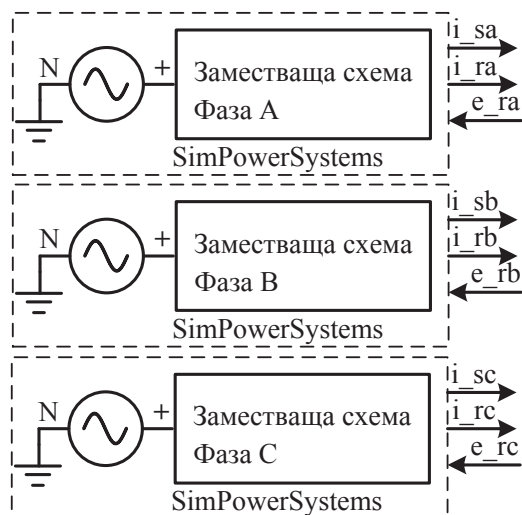
Фиг. 1. Примерен модел на асинхронно електрозадвижване с модел на АД в среда SimPowerSystems

На фиг.1 е показана структурата на модела на АД от SimPowerSystems DesignTool в обкръжението Simulink в елементарно електрозадвижване. Моделът е реализиран като изцяло виртуален от три части, интерфейсът между АД и другите обекти в средата SPS се осъществява директно, а със Simulink се осъществява чрез източници на напрежение и измервателни уреди. Изходите на модела на двигателя в трите му части (електрическа, електромеханична и механична) се интегрират в Simulink за удобство чрез универсален демултиплексор на сигналите. Моделът е многофункционален, несъмнено притежава много предимства, което го прави масов и удобен за синтез и изследване на съвременни електрозадвижвания и е еталон за настройка на други модели. В същото време с него не е пригоден за изследване процеси, зависими от несиметрията на машината, от флуктуацията на параметрите на АД във времето и на електрозадвижвания със специални схеми на свързване, които изискват промяна на начина на свързване на статорната намотка (например звезда-триъгълник) и достъп до звездния център на машината (например включване на тиристорни регулатори), ако той е изведен в клемната кутия на реалния двигател и др.

3. Представяне на подхода и моделиране

Трите части на еталонния модел на двигателя се разделят, като частта, основана на Т-заместващата схема на АД остава в средата SPS. Останалите трансформации се пренасят в неподвижна (за конкретния случай) правоъгълна декартова координатна система, в която се извършва преобразуване на броя фази на променливите на двигателя (трансформация на Кларк). В показаната схема – фиг.2. се предполага, че параметрите и променливите на

ротора са приведени към броя на навивките на статора. Електромагнитните системи на многофазните електрически машини с брой на фазите повече от две са зависими в смисъл, че магнитодвижещото напрежение (МДН) на всяка фаза на намотката може да се неутрализира чрез съвместното действие на другите фази на намотката при определени съотношения на фазните токове. Поради това, тези системи не притежават еднозначно съответствие между параметрите на пространствената вълна на МДН от една страна, и съвкупността на фазните токове, генериращи тази МДН, от друга. В този случай състоянието на променливите се изследва с помощта на пространствено-векторни диаграми, а едно от предимствата на неподвижната ортогонална координатна система е равенството на амплитудите на времевите и модулите на пространствените променливи [7]. Намотките на статора и ротора се намират в магнитно поле, което се върти в равнината на напречното сечение на двигателя с ъглова скорост $\omega = \omega_s z_p^{-1}$, пропорционална на ъгловата честота на статорното напрежение и обратно-пропорционална на чифтовете полюси на двигателя. Неподвижността на координатната система и застопореният ротор на машината се отчитат с помощта на допълнителни електродвижещи напрежения (ЕДН) от въртене, положителните посоки на които съвпадат с посоките на статорните и роторните токове.



Фиг. 2. Имитационна част на модела на АД в среда SimPowerSystems

За разглеждания случай на неподвижна координатна система допълнителните ЕДН се въвеждат само в ротора на машината.

По този начин, с помощта на елементарни преобразувания, се установява връзка между Т-заместващата схема и теорията

на обобщената електрическа машина. Тази връзка е възможна благодарение на замяната на индуктивните съпротивления със съответните им индуктивности и на въведените в заместващата схема допълнителни ЕДН, пропорционални на скоростта на въртене и във фаза с роторния ток. Това е същността на подхода и на разработения модел.

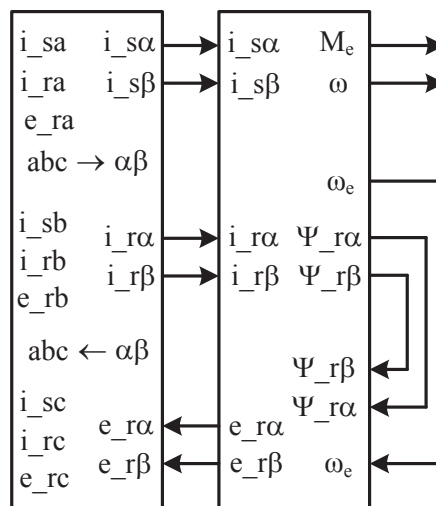
Моделът се състои от имитационна част (блоковете на фазите А, В и С - фиг.2) и виртуална част (фиг.3). Моделът на една от фазите (фаза А) в явен вид е показан на фиг.4, а в SimPowerSystems - в Приложение 7.1.

На входа на блока на фаза А от имитационната част постъпва напрежението $u_{sa} = u_{m\alpha} \sin(\omega_s t)$. В качеството на изходни променливи са приети токовете в отделните участъци на заместващата схема: статорен ток i_{sa} и роторен ток i_{ra} . В качеството на обратна връзка е прието напрежението от въртене в ротора e_{ra} .

Аналогични явления протичат и в другите две фази, разместени в пространството на ъгъл ± 120 електрически градуса. В тях на входовете постъпват напреженията:

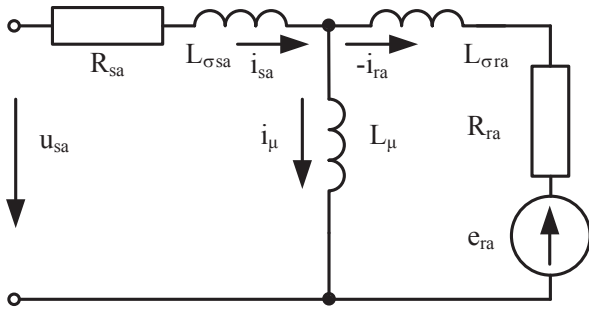
$$u_{sb(c)} = u_{mb(c)} \sin\left(\omega_s t \mp \frac{2}{3} \pi\right).$$

В качеството на изходни променливи са приети токовете в отделните участъци на останалите две фази на заместващата схема: статорните токове $i_{sb(c)}$ и роторните токове $i_{rb(c)}$.



Фиг. 3. Виртуална част на модела на АД – блок координатни/фазни трансформации и блок електромеханично преобразуване

Виртуалната част се моделира в Simulink в съответствие с показаните на фиг.3 блокове. В тази част са предвидени следните два блока:



Фиг. 4. Модел и еквивалентна T-заместваща схема на фазата A на АД

- блок на прави и обратни координатни/фазни трансформации в неподвижна ортогонална двусосна координатна система $i_{sabc} \rightarrow i_{s\alpha\beta}$, $i_{rabc} \rightarrow i_{r\alpha\beta}$ и $e_{r\alpha\beta} \rightarrow e_{rabc}$;

- блок електромеханично преобразуване на енергията, който включва уравнението на електромагнитния момент, уравнението на движението и обратна връзка по напрежение.

Моделът на виртуалната част в Simulink е показан в Приложение 7.2.

4. Математично описание

Математичното описание на виртуалната част на модела отговаря на фиг.3 и съответства на изразите

$$u_{sa} = u_{ma} \sin(\omega_s t); \quad (1a)$$

$$u_{sb} = u_{mb} \sin\left(\omega_s t - \frac{2}{3}\pi\right); \quad u_{sc} = u_{mc} \sin\left(\omega_s t + \frac{2}{3}\pi\right); \quad (1b,c)$$

$$i_{sa} = \frac{2}{3}\left(i_{sa} - \frac{1}{2}(i_{sb} + i_{sc})\right); \quad i_{ra} = \frac{2}{3}\left(i_{ra} - \frac{1}{2}(i_{rb} + i_{rc})\right); \quad (2a,b)$$

$$i_{s\beta} = \frac{2}{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(i_{sc} - i_{sb})\right); \quad i_{r\beta} = \frac{2}{3}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}(i_{rc} - i_{rb})\right); \quad (3a,b)$$

$$M_e = \frac{3}{2} L_\mu z_p (i_{sa} i_{r\beta} - i_{ra} i_{s\beta}); \quad (4)$$

$$\omega_e = \int \frac{z_p}{J} (M_e - M_c) dt; \quad \omega = \omega_e z_p^{-1}; \quad (5a,b)$$

$$e_{ra} = (L_\mu i_{s\beta} + (L_{\sigma ra} + L_\mu) i_{r\beta}) \omega_e; \quad (6a)$$

$$e_{r\beta} = (L_\mu i_{sa} + (L_{\sigma ra} + L_\mu) i_{ra}) \omega_e; \quad (6b)$$

$$e_{ra} = e_{ra}; \quad (7a)$$

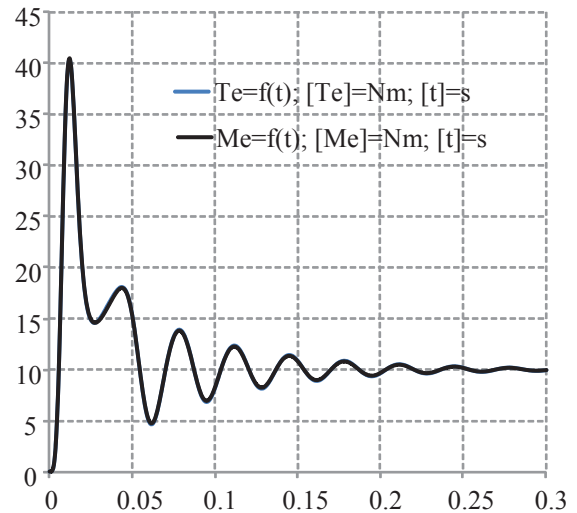
$$e_{rb} = -\frac{1}{2} e_{ra} + \frac{\sqrt{3}}{2} e_{r\beta}; \quad e_{rc} = -\frac{1}{2} e_{ra} - \frac{\sqrt{3}}{2} e_{r\beta}. \quad (7b,c)$$

За работата на модела е предвиден m-файл; използваните означения в математичното описание и тяхното съответствие с m-файла са дадени в Приложение 7.3.

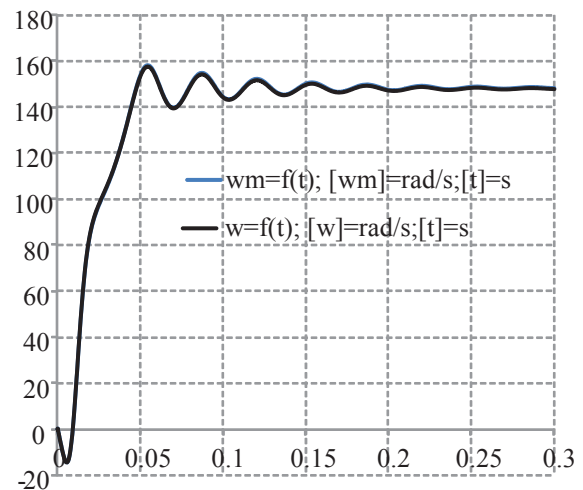
5. Верификация

Създаденият модел е верифициран чрез еталонния модел за симетрични режими с постоянни параметри на заместващата схема при свързване на източника на захранващо напрежение и двигателя в звезда.

На фиг.5 са показани преходни процеси на електромагнитните моменти в еталонния (T_e)



Фиг. 5. Преходни процеси на електромагнитния момент (T_e , M_e) в еталонния и предложени модели при пускане с номинално натоварване

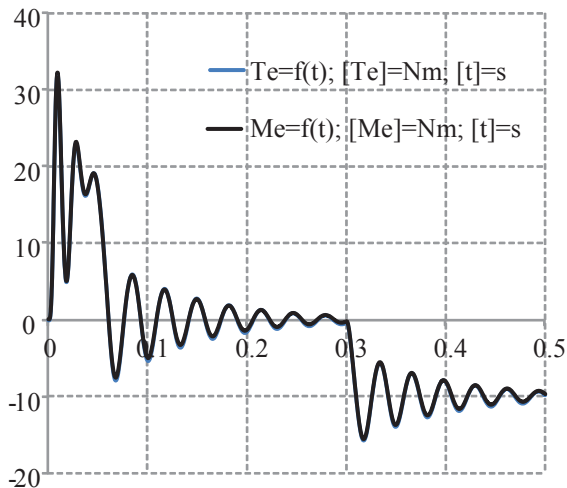


Фиг. 6. Преходни процеси на ъгловата скорост (ω_m , ω) в еталонния и предложени модели по условията на фиг.5

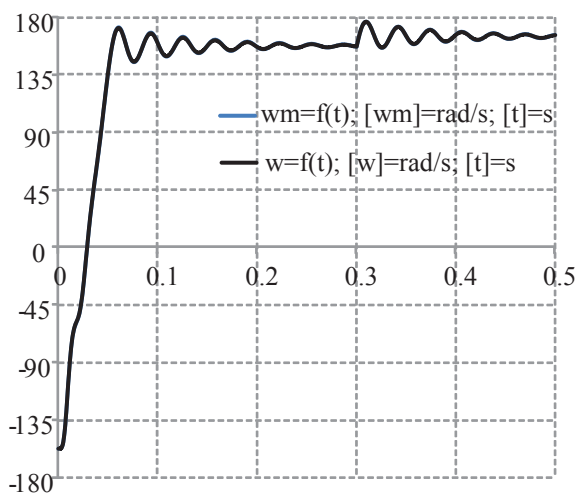
и предложени (M_e) модел при директно пускане с номинално захранващо напрежение, нулеви начални условия и съпротивителен

момент $M_c = M_{c_ном}$. На фиг.6 са показани съответните преходни процеси на ъгловата скорост.

На фиг.7 са показани преходни процеси на електромагнитните моменти в двата модела при пускане от режим на противовключване с нулево натоварване с начална синхронна скорост $\omega_m = \omega_e = -\omega_s z_p^{-1}$ и последващо натоварване в $t = 0.3$ s в генераторен режим с $M_c = -M_{c_ном}$. На фиг.8 са показани съответните преходни процеси на ъгловата скорост на двата модела.



Фиг. 7. Преходни процеси на електромагнитния момент (T_e , M_e) в еталонния и предложения модели с нулево натоварване от режим на противовключване с последващо номинално натоварване в генераторен режим



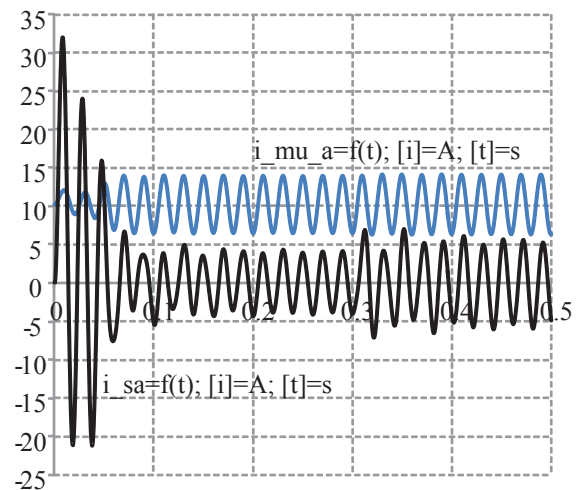
Фиг. 8. Преходни процеси на ъгловата скорост (ω_m , ω) в еталонния и предложения модели по условията на фиг.7

По този начин е осъществена верификацията по отношение на режимите противовключване, двигателен и генераторен режим.

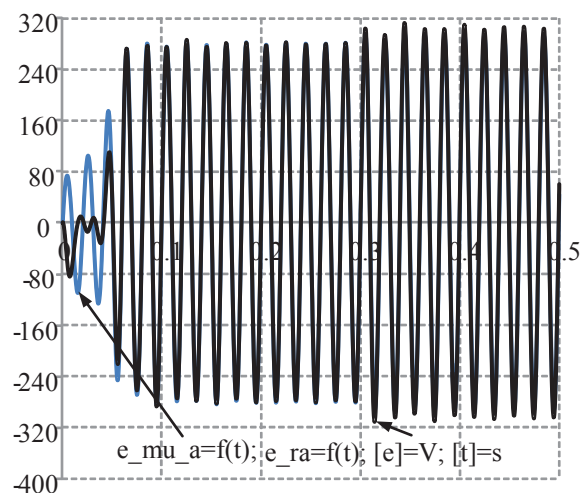
6. Някои симулационни експерименти

На фиг.9 е показано изменението на намагнитващия и статорния ток на фазата A за симетричния режим по условията на фиг.7. Намагнитващият ток е изместен спрямо ординатната ос с 10 A за по-добро възприемане на графиката.

На фиг.10 са показани измененията на напрежението на намагнитващия контур и на роторното напрежение от въртене (обратната връзка по напрежение) в разработения модел за същите режими.



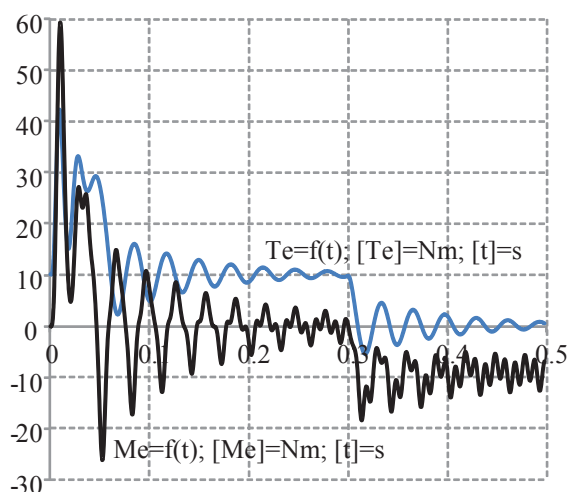
Фиг. 9. Преходни процеси на намагнитващия ток ($i_{\mu a}$) и фазния статорен ток (i_{sa}) в предложения модел по условията на фиг.7



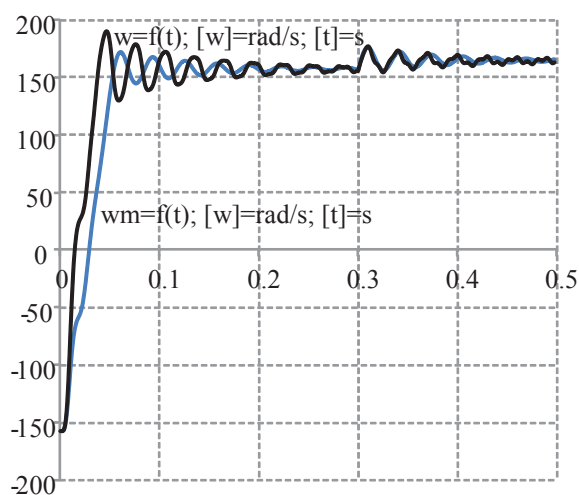
Фиг. 10. Преходни процеси на напрежението на намагнитващия контур ($e_{\mu a}$) и напрежението от въртене (e_{ra}) в предложения модел по условията на фиг.7

На фиг.11 са показани преходни процеси на електромагнитните моменти в двата модела, но фазата A в предложения модел е с параметри,

различни от тези на другите две фази ($R_{sa}=2.4 \text{ Ohm}$; $L_{\sigma sa}=0.0115 \text{ H}$).



Фиг. 11. Преходни процеси на електромагнитния момент (T_e , M_e) в еталонния и предложения модели по условията на фиг.7 и несиметрия на фаза А



Фиг. 12. Преходни процеси на ъгловата скорост (ω_m , ω) в еталонния и предложения модели по условията на фиг.7 и несиметрия на фаза А

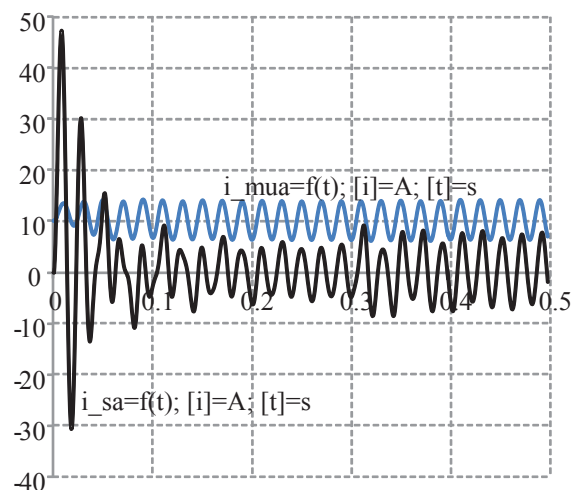
Звездният център е изолиран, отново електромагнитният момент е отместен спрямо този на еталонния модел с 10 Nm.

На фиг.12 са показани съответните преходни процеси на ъгловата скорост на двата модела.

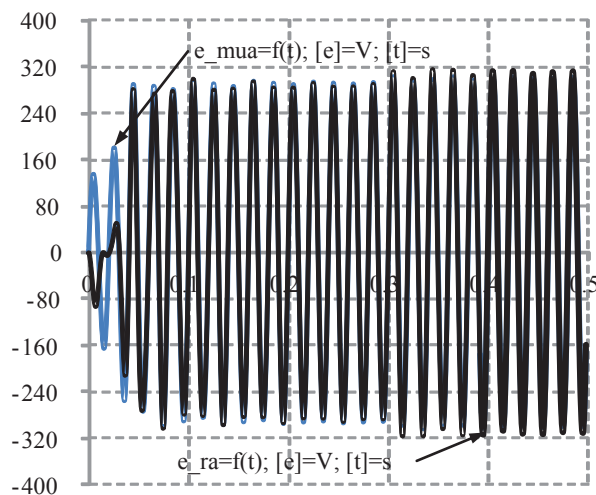
На фиг.13 и фиг.14 са показани процеси, аналогични на показаните на фиг.9 и фиг.10, но за изследвания несиметричен режим.

Изследванията нямат изчерпателен характер, но показват потенциалните възможности за решаване на задачите както на анализа, така и на синтеза на системи за

управление, включително с полупроводникови ключове с различно действие.



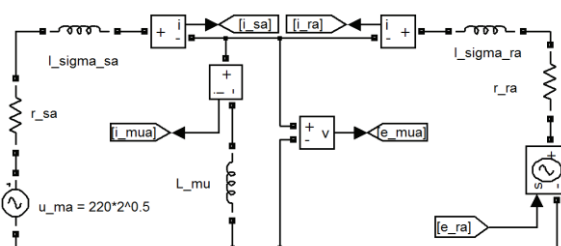
Фиг. 13. Преходни процеси на намагнитващия ток ($i_{\mu a}$) и фазния статорен ток (i_{sa}) в предложения модел по условията на фиг.7 и несиметрия на фаза А



Фиг. 14. Преходни процеси на напрежението на намагнитващия контур ($e_{\mu a}$) и напрежението от въртене (e_{ra}) в предложения модел по условията на фиг.7 и несиметрия на фаза А

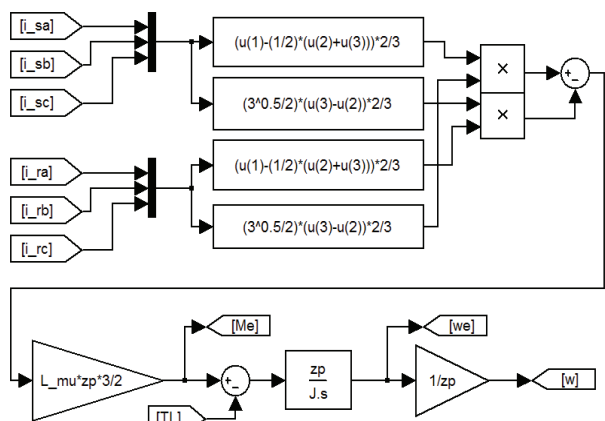
7. Приложение

7.1. SimPowerSystems модел на АД:

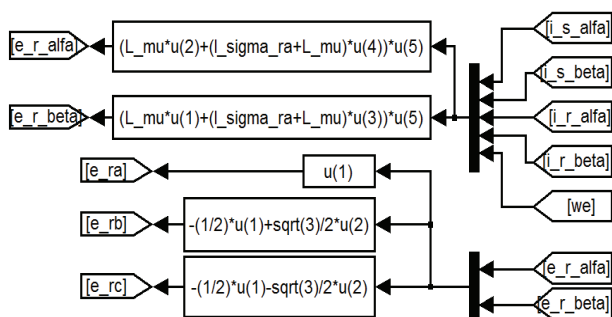


Фиг. 15. Модел на имитационната част на фаза А на АД в среда SPS

7.2. Simulink модел на АД:



Фиг. 16. Модел на правите координатни/фазни трансформации и на електромеханичното преобразуване на АД



Фиг. 17. Модел на обратните координатни/фазни трансформации и на електромеханичното преобразуване на АД

7.3. m-файл на разработения модел:

$r_{sa}=4.8$; % активно съпротивление на фаза А на статорната намотка, Ohm;
 $l_{sigma_sa}=0.023$; % индуктивност на разсейване на фаза А на статорната намотка, H;
 $r_{ra}=3.87$; % активно съпротивление на фаза А на роторната намотка, Ohm;
 $l_{sigma_ra}=0.011$; % индуктивност на разсейване на фаза А на роторната намотка, H;
 $L_{mu}=0.240$; % индуктивност на намагнитващия контур на двигателя, H;
 $r_{sb}=4.8$; % активно съпротивление на фаза В на статорната намотка, Ohm;
 $l_{sigma_sb}=0.023$; % индуктивност на разсейване на фаза В на статорната намотка, H;
 $r_{rb}=3.87$; % активно съпротивление на фаза В на роторната намотка, Ohm;
 $l_{sigma_rb}=0.011$; % индуктивност на разсейване на фаза В на роторната намотка, H;
 $r_{sc}=4.8$; % активно съпротивление на фаза С на статорната намотка, Ohm;
 $l_{sigma_sc}=0.023$; % индуктивност на разсейване на фаза С на статорната намотка, H;

$r_{rc}=3.87$; % активно съпротивление на фаза С на роторната намотка, Ohm;
 $l_{sigma_rc}=0.011$; % индуктивност на разсейване на фаза С на роторната намотка, H;
 $z_p=2$; % брой на чифтовете полюси на АД;
 $J=0.00284$; % инерционен момент на АД, kgm^2 ;
 $\omega_s=\pi*100$; % ъглова честота на захранващата мрежа, rad/s ;
 $M_{c_nom}=10$; % номинален съпротивителен въртящ момент, Nm;
 $u_{ma}=220*2^{0.5}$; % амплитудна стойност на напрежението на фаза А, V;
 $u_{mb}=220*2^{0.5}$; % амплитудна стойност на напрежението на фаза В, V;
 $u_{mc}=220*2^{0.5}$; % амплитудна стойност на напрежението на фаза С, V;

Съответствия между аббревиатурите в математичното описание и модела:

$\omega_s = \omega_s$ – ъглова честота на захранващата мрежа;
 ω_e – ъглова честота на променливите в ротора;
 ω_m – механична ъглова скорост на еталонния модел;
 $\omega = \omega_e z_p^{-1}$ – ъглова скорост на ротора на модела;
 $M_{c_nom} = M_{c_nom}$ – номинална стойност на съпротивителния въртящ момент.

Представеният модел и m-файлът имат за цел да улеснят и ускорят процеса на синтез.

8. Заключение

Приноси: Представен е подход за изследване на АД и електрозадвижвания чрез моделиране с помощта на Т-образна заместваща схема, който се основава на обособяването на съществени части при моделирането – елементни и формулни. Разработен е потребителски динамичен модел в неподвижни координатни системи – трифазна на заместващата схема и двуфазна – на електромеханичните прави и обратни трансформации. Предложеният подход и модел може да представляват интерес, на първо място, в учебния процес - по причина, че достатъчно просто и нагледно позволяват да се направи преход от заместваща схема към теорията на обобщената електрическа машина и обратно. На второ място, разработеният модел се съгласува добре с реалните физически явления и може да се използва при решаване на разнообразни задачи, в частност, при анализ на комутационни процеси с помощта на силови полупроводникови ключове. На трето място, не съществуват ограничения подходът да се приложи и за други машини, в други координатни системи и с различен брой на фазите.

Изводи: 1. Овластяването на комплекса от знания в областта на регулируемото електрозадвижване за променлив ток е необходим елемент от техническата култура и изискванията към специалистите по електрозадвижване на пазара на труда, важна част от тяхната подготовка и преподготовка. За това способства обширната техническа литература по въпросите за построяване на електрозадвижвания с честотно управление, реализирано с управляеми полупроводникови преобразуватели на честота. Задълбоченото изучаване на подобни електрозадвижвания обаче представлява определена сложност за младите специалисти. Това е свързано с недостига на актуална учебно-методична литература по определени динамично развиващи се проблеми, а така също и от фактора конкуренция на фирмите-производители, което пречи свободното разпространение на научно-технически знания за новите разработки. В достъпните източници на информация методическата обработка, строгото изложение на материала, пълнотата и яснотата на изложението са твърде недостатъчни. 2. Съществуват и определени диспропорции в развитието на електрозадвижванията за променлив ток. От една страна са подобрени потребителските свойства, въведени са и са усъвършенствани сервисни функции и интелектуални елементи: адаптация, разширено управление, диагностика, защита, индикация, визуализация и др. за сметка на новата елементна база и възможностите на цифровото управление. От друга страна, независимо от нарастването на общото технико-икономическо ниво на регулируемите електрозадвижвания за променлив ток, напредъкът в решението на основни задачи на управлението, като повишаване на бързодействието, точността, диапазона на регулиране и др. не може да бъде характеризирани като значителни. 3. Във връзка с това, ефективен и универсален инструмент на изследователя и инженера при решаване на задачите за управление е математическото моделиране. А изборът на подходящ модел е залог за успешно решаване на тези задачи.

* Авторът приема термина „имитационен“ за модели на технически обекти, които се основават на електрическа/електронна и/или механична схема (елементен аналог) със съответно математично описание. Най-близко до него е терминът „физически“. „Виртуален“ е термин, с който се описват връзките в даден процес само на абстрактно (формално) ниво. И трите термина „имитационен“, „физически“ и „виртуален“ притежават характеристиката „математически“. Рязка граница между термините не бива да се налага.

ЛИТЕРАТУРА

1. Riccardo M., Patrizio T., Cristiano M.V. (2010). *Induction Motor Control Design*. 371 pp. Springer-Verlag London Limited. ISBN 978-1-84996-283-4.
2. Поздеев А.Д. (1998). *Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно регулируемых асинхронных электроприводах*. Чебоксары: Изд-во ЧГУ.
3. Донской Н.В. (2007). *Регулируемые электроприводы переменного тока*. Чебоксары: Изд-во ЧГУ.
4. Тимошкин В.В. (2014). *Разработка и исследование наблюдателя угловой скорости для асинхронных электроприводов по схеме ТРН-АД*. Томск: Томский политехнический университет.
5. Костов И.Й., Иванов Г.И. (2014). *Управление на електрозадвижванията. Учебно пособие по курсово проектиране и семинарни упражнения*. ТУ-София, Филиал Пловдив, 144 стр. ISBN 978-619-90128-6-4.
6. Суптель А., Малинин Г., Ларин Е. (2010). *Виртуальные модели асинхронного двигателя*, Силовая Электроника, № 4.
7. Шрейнер Р.Т. (2000). *Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты*. Екатеринбург: УРО РАН. 654 с. ISBN 5-7691-1111-9.
8. Копылов И.П. (1987). *Математическое моделирование электрических машин*. М: Высшая школа. 248 с.
9. Сипайлов Г.А., Лоос А.В. (1980). *Математическое моделирование электрических машин*. М: Высшая школа. 176 с.
10. Хрисанов В.И. (2004). *Математическая модель асинхронных машин в фазных осях статора*. *Электротехника*, № 7. с. 23-30.
11. <http://www.gecko-simulations.com>;
<http://www.20sim.com>;
<http://powersimtech.com>;
<https://openmodelica.org>;
<http://www.caspoc.com>;
<http://www.ni.com/multisim/>
<http://www.mathworks.com>.

Контакти:
Control Systems Department
Technical University–Sofia, Branch Plovdiv
25 Tsanko Dyustabanov St.
4000 Plovdiv
BULGARIA
Адрес:
[E-mail: ijk@tu-plovdiv.bg](mailto:ijk@tu-plovdiv.bg)