

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЕЛЬНИХ РОЗРАХУНКІВ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

$$I_{As} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{or} + \frac{d\Psi_{or}}{dt} + \omega_r \Psi_{or}$$

$$\frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{Bs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right) + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{pr} + \frac{d\Psi_{pr}}{dt} - \omega_r \Psi_{pr}$$

$$\frac{U_{AB} + U_{BC}}{3} = R_s I_{Bs} + \delta L_s \frac{dI_{Bs}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{Bs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$\frac{U_{AB} + 2U_{BC}}{3} = R_s I_{Cs} + \delta L_s \frac{dI_{Cs}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{Cs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$\Psi_{su} = L_s I_{su} + L_m I_{ru}, \quad \Psi_{sv} = L_s I_{sv} + L_m I_{rv}$$

$$\frac{I_{As}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_{or}}{dt}$$

$$\frac{I_{Bs}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \left(-\frac{1}{2} \frac{d\Psi_{or}}{dt} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\Psi_{pr}}{dt} \right)$$

$$\delta L_s \frac{dI_{Cs}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \left(-\frac{1}{2} \frac{d\Psi_{or}}{dt} - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{d\Psi_{pr}}{dt} \right)$$

$$0 = R_s \frac{L_m}{L_r} I_{As} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{or} + \frac{d\Psi_{or}}{dt} + \omega_r \Psi_{or}$$

$$0 = R_s \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{Bs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right) + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{pr} + \frac{d\Psi_{pr}}{dt}$$

$$M = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} \Psi_{or} \left(\frac{2I_{Bs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right) - I_{As} \Psi_{pr}$$

$$\begin{cases} U_{su} = I_{su} R_s + \frac{d\Psi_{su}}{dt} - \omega_k \Psi_{sv} \\ U_{sv} = I_{sv} R_s + \frac{d\Psi_{sv}}{dt} + \omega_k \Psi_{su} \\ U_{ru} = I_{ru} R_r + \frac{d\Psi_{ru}}{dt} - (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_{rv} \\ U_{rv} = I_{rv} R_r + \frac{d\Psi_{rv}}{dt} + (\omega_k - Z_p \omega) \Psi_{ru} \end{cases}$$

$$\frac{2U_{AB} - U_{BC}}{3} = R_s I_{As} + \delta L_s \frac{dI_{As}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{As} + I_{Bs}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$\frac{U_{AB} + U_{BC}}{3} = R_s I_{Bs} + \delta L_s \frac{dI_{Bs}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{Bs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$\frac{U_{AB} + 2U_{BC}}{3} = R_s I_{Cs} + \delta L_s \frac{dI_{Cs}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{Cs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right)$$

$$\Psi_{sv} = L_s I_{sv} + L_m I_{rv}$$

$$0 = R_s \frac{L_m}{L_r} I_{As} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{or} + \frac{d\Psi_{or}}{dt} + \omega_r \Psi_{or}$$

$$0 = R_s \frac{L_m}{L_r} \left(\frac{2I_{Bs} + I_{As}}{\sqrt{3}} \right) + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{pr} + \frac{d\Psi_{pr}}{dt} - \omega_r \Psi_{pr}$$

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ
ТА ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЕЛЬНИХ
РОЗРАХУНКІВ ДИНАМІКИ
ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ
З АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ**

Кременчук
ПП Щербатих **О. В.**
2016

УДК 621.313:517.91
ББК 31.26
М 34

Авторський колектив:

О. П. Чорний, О. І. Толочко, В. К. Титюк, Д. Й. Родькін, Г. С. Чекавський.

Рецензенти: *М. В. Загірняк, доктор технічних наук, професор кафедри «Електричні машини і апарати» Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського; С. М. Пересада, доктор технічних наук, професор кафедри «Електромеханічні системи автоматизації і електропривод» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»; О. В. Садовой, доктор технічних наук, професор кафедри «Електромеханіка» Дніпродзержинського державного технічного університету.*

Рекомендовано до видання вченою радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України (протокол № 1 від 25.10.2013)

М 34 **Математичні** моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів з асинхронними двигунами: монографія / О. П. Чорний, О. І. Толочко, В. К. Титюк. - Кременчук: ПП Щербатих О. В, 2016. - 300 с. Іл.

ISBN 978-617-639-090-9

Монографію присвячено питанню дослідження режимів роботи електроприводів з АД шляхом їх моделювання. Зроблено акцент на особливостях математичних моделей з урахуванням перетворювачів енергії і методів чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь моделей при їх дослідженні. Показано кількісні й якісні відмінності в рішеннях, які виникають при необгрунтованому виборі чисельного методу та його параметрів, а також при врахуванні в моделях нелінійностей і реальних параметрів енергії на виході перетворювачів. Проаналізовано похибки, які можуть виникнути в рішеннях при застосуванні універсальних математичних пакетів для моделювання. Наведено результати моделювання.

Іл. 196, табл. 32, бібліогр. 76 назв.

УДК 621.313:517.91
ББК 31.26

ISBN 978-617-639-090-9 © О. П. Чорний, О. І. Толочко, В. К. Титюк,
Д. Й. Родькін, Г. С. Чекавський, 2016

**MATHEMATICAL MODELS
AND SPECIFICS OF NUMERICAL
CALCULATIONS OF DYNAMIC
CHARACTERISTICS OF ELECTRIC
DRIVES WITH INDUCTION
MOTORS**

Kremenchuk
PE Shcherbatykh O.V.
2016

UDC 621.313:517.91
BBK 31.26
M 34

Collective authors

O. Chorny, O. Tolochko, V. Tytyuk, D. Rodkin, G. Chekavskiy

Reviewers: *M. V Zagirnyak, Doctor of Science, Professor of Electric Machines and Devices Department, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University;*

S. M. Peresada, Doctor of Science, Professor of the Electromechanical Systems of Automation and Electric Drive Department of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute";

O. V Sadovoi, Doctor of Science, Professor of Electromechanics Department of Dneprodzerzhinsk State Technical University.

Recommended for publication by the Academic Council of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine (Minutes No. 1 of 25.10.2013)

M 34 **Mathematical** models and specifics of numerical calculations of dynamic characteristics of electric drives with induction motors: monograph /O. Chorny, O. Tolochko, V. Tytyuk. - Kremenchuk: PE Shcherbatykh O. V., 2016. - 300 p. Pc.

ISBN 978-617-639-090-9

The monograph deals with research of operating modes of electric drives with IM through their modeling. The specific features of mathematical models taking into account power converters and methods of numerical integration of differential equations systems of models in their study have been emphasized. Quantitative and qualitative differences in the solutions that arise when unjustified choice of numerical method and its parameters is made, and also when nonlinearities and the real energy parameters at converters output are taken into account, have been shown. Errors that may arise in solutions when using universal mathematical packages for modeling have been analyzed. Simulation results are given.

Fig. 196, Tab. 32, Ref. 76 items.

UDC 621.313:517.91
BBK 31.26

ISBN 978-617-639-090-9

© O. Chorny, O. Tolochko, V. Tytyuk,
D. Rodkin, G. Chekavskiy, 2016.

ПЕРЕДМОВА	6
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ ДИНАМІКИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	10
1.1. Аналіз технологій і методів дослідження електромеханічних систем	10
1.2. Аналіз і характеристика математичних пакетів для дослідження електромеханічних систем	11
2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	32
2.1. Загальна характеристика та класифікація моделей	32
2.2. Математичні моделі асинхронного двигуна у фазних координатах	36
2.3. Координатні перетворення	58
2.4. Математичні моделі асинхронного двигуна в ортогональних координатах	69
2.5. Моделі асинхронної машини в бібліотеці <i>SimPowerSystems</i>	92
2.6. Оцінка адекватності результатів моделювання	113
3. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ І ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ	123
3.1. Характеристика чисельних методів	123
3.2. Особливості розрахунку систем диференціальних рівнянь із розривною правою частиною	135
3.3. Особливості чисельного розрахунку моделей з нелінійностями	143
3.4. Порівняльний аналіз динаміки АД в різних математичних моделях	153
3.5. Урахування нелінійності кривої намагнічення	161
3.6. Порівняльний аналіз динаміки АД з урахуванням нелінійності кривої намагнічення	163
4. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ІДЕЛІЗОВАНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ	166
4.1. Приклади моделювання систем пуску нерегульованих електроприводів на базі АД	167

4.2. Моделювання асинхронного двигуна при регулюванні амплітуди живильної напруги.....	176
4.3. Моделювання систем скалярного керування швидкістю асинхронного двигуна.....	181
4.4. Моделювання системи векторного керування швидкістю асинхронного двигуна.....	189
4.5. Моделювання замкненої системи електропривода за схемою «асинхронно-вентильний каскад».....	196
5. АНАЛІЗ І ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ІМІТАЦІЙНИМИ МОДЕЛЯМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ.....	202
5.1. Синтез моделі автономного інвертора напруги і розрахунок динамічних режимів електроприводу ПЧ-АД.....	202
5.2. Вплив дискретизації на розрахунок моделей електроприводу з ШІМ вихідної напруги.....	223
5.3. Особливості динамічних режимів електроприводу ПЧ-АД із ШІМ вихідної напруги з урахуванням кабельної мережі живлення.....	231
5.4. Особливості математичного моделювання електроприводів з перетворювачами на базі ключових елементів.....	242
6. АНАЛІЗ І ОСОБЛИВОСТІ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ МОДЕЛЕЙ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ З ПОВНОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ МОДЕЛЯМИ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ У SIMPOWERSYSTEMS.....	249
6.1. Спрощена модель частотно-регульованого асинхронного електроприводу.....	252
6.2. Модель системи скалярного керування швидкістю асинхронного двигуна.....	259
6.3. Модель асинхронного електроприводу за системою АВК.....	267
6.4. Модель електроприводу з тиристорним регулятором напруги на статорі АД.....	274
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	281
ДОДАТКИ	
А. Параметри трифазного кабелю.....	288
Б. Параметри АД, які використовувались в моделях.....	294
В. Параметри електромеханічного обладнання у моделях SimPower Systems.....	296