

УДК 681.5:62-83

В. М. Михальський, д-р техн. наук,
А. Л. Дорошенко,
І. А. Шаповал, канд. техн. наук

ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ МОМЕНТОМ МАШИНИ ПОДВІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. Досліджено алгоритми векторного керування електромагнітним моментом машини подвійного живлення. Розроблено регулятори, що забезпечили відпрацювання моменту при збудженні електричної машини по колу статора та по колу ротора. Працездатність запропонованих підходів підтверджено результатами математичного моделювання.

Ключеві слова: векторне керування, машина подвійного живлення, електромагнітний момент, математична модель

V. Mykhalskyi, ScD.,
A. Doroshenko,
I. Shapoval, PhD.

STUDY OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE CONTROL ALGORITHMS OF THE DOUBLY-FED INDUCTION MACHINE BY MATHEMATICAL MODELING

Abstract. The algorithms of the electromagnetic torque vector control of the doubly-fed induction machine (DFIM) have been studied. Controllers that provide torque control from stator and rotor sides under the DFIM excitation have been developed. The efficiency of the proposed approach is confirmed by the results of mathematical simulation.

Keywords: vector control, doubly-fed induction machine, electromagnetic torque, mathematical model

В. М. Михальський, д-р техн. наук,
А. Л. Дорошенко,
І. А. Шаповал, канд. техн. наук

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНІТНЫМ МОМЕНТОМ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. Исследованы алгоритмы векторного управления электромагнитным моментом машины двойного питания. Разработаны регуляторы, которые обеспечили отработку момента при возбуждении электрической машины по цепи статора и по цепи ротора. Работоспособность предложенных подходов подтверждена результатами математического моделирования.

Ключевые слова: векторное управление, машина двойного питания, электромагнитный момент, математическая модель

Вступ. Машина подвійного живлення (МПЖ) як об'єкт керування в електроприводі останнім часом знаходить нові області застосування. Така тенденція пов'язана з сучасним розвитком алгоритмів векторного керування та удосконаленням напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Так, в галузі вітрової відновлювальної енергетики МПЖ поступово витісняє синхронні генератори, що обумовлено її здатністю керувати окремо активною та реактивною потужністю [1 – 3]. В [4 – 6] розглядається електромеханічна система з МПЖ, що здатна замінити двигуни постійного струму та асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором у важкій промисловості та у галузі тягового електропривода [7]. В [4, 6, 8] наведено огляд систем електропривода на базі МПЖ, в якому автори приходять до висновку про доцільність одночасного керування МПЖ як по колу статора, так і по колу ротора.

Основною метою даної роботи є дослідження алгоритмів керування електромагнітним моментом та побудова математичної моделі системи електроприво-

да на базі МПЖ за умови одночасного керування по колам статора та ротора.

1. Математична модель МПЖ. Враховуючи теорію узагальненої електричної машини та методику отримання математичної моделі довільної обертової електричної машини [9], запишемо динамічну модель МПЖ в проекціях струмів статора, ротора та головного магнітного потоку в системі координат (d - q), що обертається з кутовою швидкістю ω_k .

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \quad \dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c), \quad M = \frac{3}{2} p_n L_m (i_q i_{2d} - i_{1d} i_{2q}), \\ u_{1d} &= r_1 i_{1d} + L_{1\sigma} \frac{d}{dt} i_{1d} - \omega_k L_{1\sigma} i_{1q} + \frac{d}{dt} \psi_{md} - \omega_k \psi_{mq}, \\ u_{1q} &= r_1 i_{1q} + L_{1\sigma} \frac{d}{dt} i_{1q} + \omega_k L_{1\sigma} i_{1d} + \frac{d}{dt} \psi_{mq} + \omega_k \psi_{md}, \\ u_{2d} &= r_2 i_{2d} + L_{2\sigma} \frac{d}{dt} i_{2d} - \omega_2 L_{2\sigma} i_{2q} + \frac{d}{dt} \psi_{md} - \omega_2 \psi_{mq}, \\ u_{2q} &= r_2 i_{2q} + L_{2\sigma} \frac{d}{dt} i_{2q} + \omega_2 L_{2\sigma} i_{2d} + \frac{d}{dt} \psi_{mq} + \omega_2 \psi_{md}, \\ \psi_{md} &= L_m (i_{1d} + i_{2d}), \quad \psi_{mq} = L_m (i_{1q} + i_{2q}), \\ \dot{\theta}_k &= \omega_k, \quad \omega_2 = \omega_k - p_n \omega, \\ L_{1\sigma} &= L_1 - L_m, \quad L_{2\sigma} = L_2 - L_m, \end{aligned} \quad (1)$$

© Михальський В.М., Дорошенко А.Л.,
Шаповал І.А., 2014

де $(u_{1d}, u_{1q}), (u_{2d}, u_{2q})$ – напруги статора та ротора;
 $(i_{1d}, i_{1q}), (i_{2d}, i_{2q})$ – струми статора та ротора;
 (ψ_{md}, ψ_{mq}) – головний магнітний потік МПЖ; θ, ω – кутове положення та швидкість ротора МПЖ; θ_k, ω_k – кутове положення та кутова швидкість системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної системи координат $(a-b)$; – електромагнітний момент; M_c – момент навантаження; J – момент інерції машини; p_n – кількість пар полюсів; r_1, r_2, L_1, L_2 – активні опори та індуктивності статора і ротора відповідно; L_m – індуктивність намагнічування; $L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – індуктивності розсіювання статора та ротора.

2. Алгоритм керування головним магнітним потоком. Побудова алгоритмів векторного керування базується на орієнтації обертової системи координат вздовж одного з векторів стану електричної машини. В даній роботі приймаємо, що вісь d обертової системи координат $(d-q)$ співпадає з напрямом вектора головного магнітного потоку ψ_m , тобто

$$\begin{aligned} \psi_{md} &= |\psi_m|, \\ \psi_{mq} &\equiv 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Умова (2) відома як умова точної орієнтації обертової системи координат $(d-q)$ вздовж вектора головного магнітного потоку. Визначимо похибки відпрацювання головного магнітного потоку у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_{md} &= \psi_{md} - \psi_m^*, \\ \tilde{\psi}_{mq} &= \psi_{mq}, \end{aligned} \quad (3)$$

де ψ_m^* – заданий головний магнітний потік. Враховуючи (2) та (3), визначимо залежність головного магнітного потоку від струмів статора та ротора у вигляді

$$\begin{aligned} i_{1d} &= \frac{1}{L_m} \psi_m^* - i_{2d}, \\ i_{2d} &= \frac{1}{L_m} \psi_m^* - i_{1d}. \end{aligned} \quad (4)$$

3. Алгоритм керування електромагнітним моментом МПЖ. Використовуючи рівняння проєкцій головного магнітного потоку та рівняння моменту в (1), знайдемо вирази для електромагнітного моменту МПЖ, визначені через проєкції:

1) струмів статора та головного магнітного потоку

$$M = \frac{3}{2} p_n (i_{1q} \psi_{md} - i_{1d} \psi_{mq}); \quad (5)$$

2) струмів ротора та головного магнітного потоку

$$M = \frac{3}{2} p_n (i_{2d} \psi_{mq} - i_{2q} \psi_{md}). \quad (6)$$

З рівнянь (5) та (6) стає очевидним, що електромагнітним моментом МПЖ можна керувати як струмами статора, так і струмами ротора [10]. Визначимо похибку відпрацювання електромагнітного моменту у вигляді

$$\tilde{M} = M - M^*, \quad (7)$$

де \tilde{M} – похибка відпрацювання моменту, M^* – заданий електромагнітний момент. З рівнянь (5) та (6), враховуючи (3) та (7), визначимо закон керування електромагнітним моментом МПЖ

$$\begin{aligned} i_{1q} &= \frac{2}{3} \frac{1}{p_n \psi_m^*} M^*, \\ i_{2q} &= -\frac{2}{3} \frac{1}{p_n \psi_m^*} M^*. \end{aligned} \quad (8)$$

4. Рівняння динаміки МПЖ. В реальній електричній машині єдиними вхідними величинами керування є вектор напруг статора $\vec{u}_1 = (u_{1d}, u_{1q})^T$ та вектор напруг ротора $\vec{u}_2 = (u_{2d}, u_{2q})^T$, тому вихідні величини регуляторів моменту та потоку в (4) та (8) можуть бути лише бажаними траєкторіями $(i_{1d}^*, i_{2d}^*, i_{1q}^*, i_{2q}^*)$ струмів $(i_{1d}, i_{2d}, i_{1q}, i_{2q})$. Визначимо похибки струмів статора та ротора МПЖ у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{1d} &= i_{1d} - i_{1d}^*, \quad \tilde{i}_{2d} = i_{2d} - i_{2d}^*, \\ \tilde{i}_{1q} &= i_{1q} - i_{1q}^*, \quad \tilde{i}_{2q} = i_{2q} - i_{2q}^*, \end{aligned} \quad (9)$$

де $(\tilde{i}_{1d}, \tilde{i}_{1q}), (\tilde{i}_{2d}, \tilde{i}_{2q})$ – похибки відпрацювання проєкцій векторів струмів статора і ротора, $(i_{1d}^*, i_{1q}^*); (i_{2d}^*, i_{2q}^*)$ – задані траєкторії проєкцій векторів струмів статора і ротора.

З (1), враховуючи (2), (3) та (9), запишемо рівняння динаміки струмів статора та ротора МПЖ:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= r_1 i_{1d}^* + L_{1\sigma} \frac{d}{dt} i_{1d}^* - \omega_k L_{1\sigma} i_{1q}^* + \frac{d}{dt} \psi_m^* - k_{id} \tilde{i}_{1d} - v_{1d}, \\ u_{1q} &= r_1 i_{1q}^* + L_{1\sigma} \frac{d}{dt} i_{1q}^* + \omega_k L_{1\sigma} i_{1d}^* + \omega_k \psi_m^* - k_{iq} \tilde{i}_{1q} - v_{1q}, \\ u_{2d} &= r_2 i_{2d}^* + L_{2\sigma} \frac{d}{dt} i_{2d}^* - \omega_2 L_{2\sigma} i_{2q}^* + \frac{d}{dt} \psi_m^* - k_{id} \tilde{i}_{2d} - v_{2d}, \\ u_{2q} &= r_2 i_{2q}^* + L_{2\sigma} \frac{d}{dt} i_{2q}^* + \omega_2 L_{2\sigma} i_{2d}^* + \omega_2 \psi_m^* - k_{iq} \tilde{i}_{2q} - v_{2q}, \end{aligned} \quad (10)$$

де $k_{id} > 0, k_{iq} > 0$ – пропорційні коефіцієнти регуляторів струму; v_{1d}, v_{1q}, v_{2d} та v_{2q} – компоненти інтегральної дії, що дорівнюють

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v_{1d} &= k_{id} \tilde{i}_{1d}, \quad \frac{d}{dt} v_{1q} = k_{iq} \tilde{i}_{1q}, \\ \frac{d}{dt} v_{2d} &= k_{id} \tilde{i}_{2d}, \quad \frac{d}{dt} v_{2q} = k_{iq} \tilde{i}_{2q}, \end{aligned} \quad (11)$$

де $k_{id} > 0, k_{iq} > 0$ – коефіцієнти інтегральних складових регуляторів струму.

5. Результати моделювання. В пакеті прикладних програм Matlab\Simulink побудовано математичну модель електропривода МПЖ. Моделювання виконувалось в наступній послідовності:

- на інтервалі часу 0 – 0,2 с електромеханічна система розганяється до 105 рад/с первинним рушієм;
- на інтервалі часу 0,25 – 0,5 с МПЖ збуджується;
- в момент часу 0,55 с подається завдання на відпрацювання моменту.

При моделюванні була використана МПЖ з наступними параметрами: потужність $P=1,4$ кВт, число пар полюсів $p_n=3$; $J=0,2$ кгм²; $L_1=L_2=0,317$ Гн; $L_m=0,3$ Гн; $R_1=4,5$ Ом; $R_2=7,4$ Ом. Пропорційні та інтегральні коефіцієнти регуляторів струму: $k_{id}=100$; $k_{iq}=50$; $k_{iud}=2500$; $k_{iud}=625$.

На рис. 1 показано задані траєкторії первинного рушія, головного магнітного потоку та електромагнітного моменту. На рис. 2 показано похибки відпрацювання головного магнітного потоку та електромагнітного моменту.

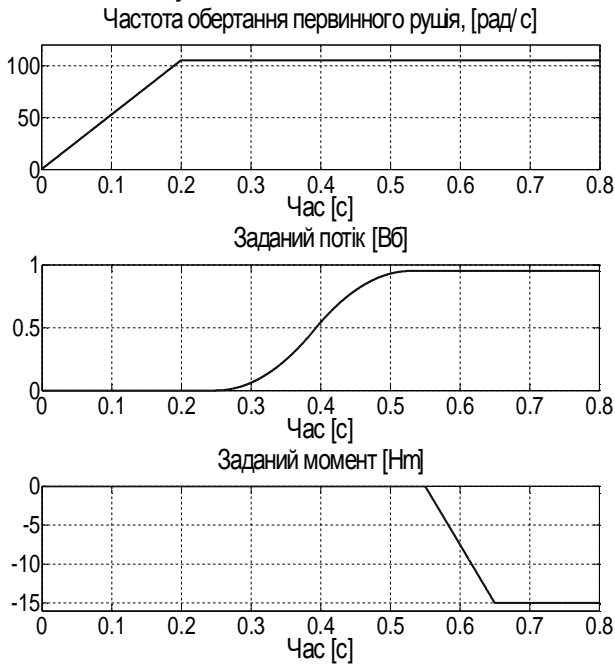


Рис. 1. Задані траєкторії первинного рушія, головного магнітного потоку та електромагнітного моменту

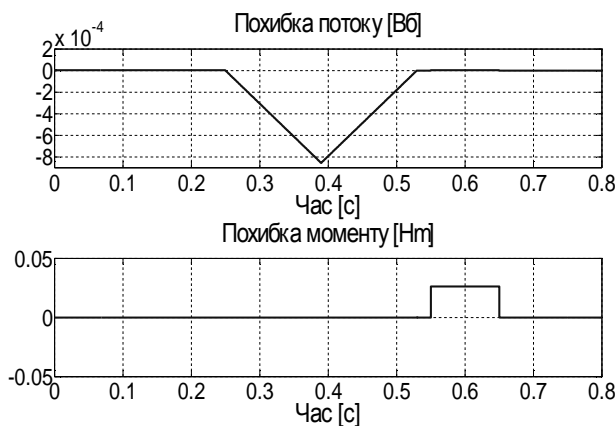


Рис. 2. Похибки відпрацювання головного магнітного потоку та електромагнітного моменту МПЖ

Математичне моделювання виконувалось для двох тестів:

1 – траєкторія відпрацювання головного магнітного потоку МПЖ задавалась струмами статора ($i_{1d}^* \neq 0, i_{2d}^* = 0$), траєкторія відпрацювання електромагнітного моменту задавалась одночасно струмами статора та ротора ($i_{1q}^* \neq 0, i_{2q}^* \neq 0$);

2 – траєкторія відпрацювання головного магнітного потоку машини задавалась струмами ротора ($i_{1d}^* = 0, i_{2d}^* \neq 0$), траєкторія відпрацювання електромагнітного моменту задавалась одночасно струмами статора та ротора ($i_{1q}^* \neq 0, i_{2q}^* \neq 0$).

Аналіз графіків перехідних процесів свідчить, що похибки відпрацювання головного магнітного потоку та електромагнітного моменту однакові для обох тестів моделювання і є достатньо малими.

Висновки. В даній роботі було виконано дослідження алгоритмів векторного керування електромагнітним моментом МПЖ за умови керування по колу статора та колу ротора. Побудовано математичну модель системи електропривода МПЖ, на основі якої виконано математичне моделювання відпрацювання електромагнітного моменту електричної машини за умови її збудження окремо по колу статора та колу ротора. Результати моделювання підтверджують правильність запропонованих підходів та надлишковість координат керування при побудові векторних алгоритмів керування, що в подальшому можна використати для підвищення ККД системи або покращення якості керування.

Список використаної літератури

- Pena R., Clare J.C., and Asher G.M., (1996), Doubly fed Induction Generator using back-to-back PWM Converters and its Application to Variable-Speed Wind-Energy Generation, *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol.143, No.3, May, pp. 231 – 241, doi: 10.1049/ip-epa:19960288.
- Hopfensperger B., Atkinson D.J., and Lakin R.A., (2000), Stator-Flux-Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine with and without Position Encoder, *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol.147, No. 4, July, pp. 241 – 250, doi: 10.1049/ip-epa:20000442.
- Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (2004), Power Control of Doubly fed Induction Machine via Output Feedback, *Control Engineering Practice*, Vol. 12, No. 1, January, pp. 41 – 57, doi: 10.1016/S0967-0661(02)00285-X.
- Bonnet F., Vidal P.E., and Pietrzak-David M., (2007), Dual Direct Torque Control of Doubly Fed Induction Machine, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 5, October, pp. 2482 – 2490, doi: 10.1109/TIE.2007.900330.
- Безденежных Д. В. Разработка и исследование электропривода на базе машины двойного питания с подключением обмоток статора и ротора к преобразователям частоты: дис. канд. техн. наук : 05.09.03 / Даниил Владимирович Безденежных. – Липецк, 2011. – 200 с.
- Poddar G., (2002). Control of Double fed wound Rotor Induction Motor Drive: *Ph.D. dissertation; Dept. Elect. Eng., Indian Inst. Science, Bangalore, India*, 172 p.
- Debbou M., Gillet J., Achour T., (2013), Pietrzak-David M. Control System for Doubly fed Induction Machine in Electrical Naval Propulsion, *Proceedings of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, September 2013, pp. 1 – 10, doi: 10.1109/EPE.2013.6631879.
- Дорошенко А. Л. Обзор систем электропривода на базе машины подвійного живлення з різними типами

перетворювачів частоти / А. Л. Дорошенко, І. А. Шаповал // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації, Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, 09–11 квітня 2013 р., м. Кременчук : КрНУ, 2013. – С. 41 – 42, url: <http://esmo.kdu.edu.ua/publ/ESMO2013.pdf>.

9. Попович М. Г. Електромеханічні системи керування та електроприводи : навч. посібник / [М. Г., Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін.]; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.

10. Дорошенко А. Л. Дослідження алгоритмів керування електромагнітним моментом машини подвійного живлення / А. Л. Дорошенко, І. А. Шаповал // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації, Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів, 10–11 квітня 2014 р., м. Кременчук : КрНУ, 2014. – С. 25 – 26, url: http://saue.kdu.edu.ua/files/ESMO_2014/ESMO2014.pdf.

Отримано 11.07.2014

References

1. Pena R., Clare J.C., and Asher G.M., (1996), Doubly fed Induction Generator using back-to-back PWM Converters and its Application to Variable-Speed Wind-Energy Generation. *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol.143, No. 3, May, pp. 231 – 241 (In English), doi: 10.1049/ip-epa:19960288.

2. Hopfensperger B., Atkinson D.J., and Lakin R.A., (2000), Stator-Flux-Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine with and Without Position Encoder. *IEE Proceedings of Electric Power Applications*, Vol.147, No. 4, July, pp. 241 – 250 (In English), doi: 10.1049/ip-epa:20000442.

3. Peresada S., Tilli A., and Tonielli A., (2004), Power Control of Doubly fed Induction Machine via Output feed-back. *Control Engineering Practice*, Vol.12, No. 1, January, pp. 41 – 57 (In English), doi: 10.1016/S0967-0661(02)00285-X.

4. Bonnet F., Vidal P.E., and Pietrzak-David M., (2007), Dual Direct Torque Control of Doubly Fed Induction Machine, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 5, October, pp. 2482 – 2490 (In English), doi: 10.1109/TIE.2007.900330.

5. Bezdenezhnyh D.V. Razrabotka i issledovanie jelektroprivoda na baze mashiny dvojnogo pitanija s podkljucheniem obmotok statora i rotora k preobrazovateljam chastoty [Development and Research of Electric Drive on the Basis of Doubly-Fed Induction Machine with Connection of Stator and Rotor Frequency Converters], (2011), Ph.D. Dissertation, Lipeck, Russian Federation, 200 p. (In Russian).

6. Poddar G., (2002), Control of Double fed wound Rotor Induction Motor Drive: Ph.D. Dissertation – *Dept. Elect. Eng., Indian Inst. Science*, Bangalore, India, 172 p. (In English).

7. Debbou M., Gillet J., Achour T., Pietrzak-David M., (2013), Control System for Doubly fed Induction Machine in

Electrical Naval Propulsion, *Proceedings of the 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, September 2013, pp. 1 – 10 (In English), doi: 10.1109/EPE.2013.6631879.

8. Doroshenko A.L., and Shapoval I.A. Ohliad system elektroprivoda na bazi mashyny podviinoho zhyvlennia z riznymy typamy peretvoriuvachiv chastoty [Review of Electric Drives on the Basis of Doubly-Fed Induction Machine with Different Types of Frequency Converters], (2013), *Elektromekhanichni ta Enerhetychni Systemy, Metody Modeliuvannia ta Optymizatsii, Zbirnyk Naukovykh Prats XI Mizhnarodnoi Naukovo-Tekhnichnoi Konferentsii Molodykh Uchenykh i Spetsialistiv*, Kremenchuk, Ukraine, pp. 41–42 (In Ukrainian), url: <http://esmo.kdu.edu.ua/publ/ESMO2013.pdf>.

9. Popovych M.H., Lozynskyi O.Yu., Klepikov V.B. and others Elektromekhanichni systemy keruvannya ta elektroprivody [Electromechanical Control Systems and Electric Drives]; (2005), Kiev, Ukraine, *Lybid'*, 680 p. (In Ukrainian).

10. Doroshenko A.L., and Shapoval I.A. Doslidzhennia alhorytmiv keruvannya elektromagnitnym momentom mashyny podviinoho zhyvlennia [Study of Electromagnetic Torque Control Algorithms of the Doubly-Fed Induction Machine], (2014), *Elektromekhanichni ta Enerhetychni Systemy, Metody Modeliuvannia ta Optymizatsii, Zbirnyk Naukovykh Prats XII Mizhnarodnoi Naukovo-tekhnichnoi Konferentsii Molodykh Uchenykh i Spetsialistiv*, Kremenchuk, Ukraine, pp. 25–26 (In Ukrainian), url: http://saue.kdu.edu.ua/files/ESMO_2014/ESMO2014.pdf.



Дорошенко Андрій Леонідович, аспірант відділа перетворення та стабілізації електромагнітних процесів Ін-ту електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, м. Київ-57, Україна, 03680. Тел.: (044) 366-24-62. E-mail: dfim@ukr.net



Михальський Валерій Михайлович, д-р техн. наук, проф. провідний науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів Ін-ту електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, м. Київ-57, Україна, 03680. Тел.: (044) 366-24-66. E-mail: mikhalsky@ied.org.ua



Шаповал Іван Андрійович, канд. техн. наук, ст. науковий співробітник відділу перетворення та стабілізації електромагнітних процесів Ін-ту електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, м. Київ-57, Україна, 03680. Тел.: (044) 366-26-47. E-mail: shapoval@ied.org.ua