

УДК 681.5:62-83

С. М. Пересада, д-р техн. наук,
С. С. Димко

СТРАТЕГІЯ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З МАКСИМІЗАЦІЄЮ СПІВВІДНОШЕННЯ МОМЕНТ-СТРУМ ПРИ ВРАХУВАННІ КРИВОЇ НАМАГНІЧУВАННЯ

Анотація. Вперше представлено розробку критерію максимізації співвідношення момент-струм статора асинхронного двигуна на основі моделі з урахуванням насичення контуру намагнічування. Розроблений критерій забезпечує суттєве покращення точності відпрацювання заданих траєкторій моменту в усьому робочому діапазоні і може використовуватись в існуючих та при створенні нових алгоритмів керування моментом. Ефективність запропонованого критерію підтверджена результатами експериментальних досліджень.

Ключові слова: максимізація, співвідношення момент-струм, векторне керування, асинхронний двигун, крива намагнічування

S. Peresada, ScD.,
S. Dymko

TORQUE PER AMPERE MAXIMIZATION STRATEGY FOR VECTOR CONTROLLED INDUCTION MOTORS CONSIDERING MAGNETIC SATURATION

Abstract. The article presents a novel maximum torque per Ampere criterion based on induction motor model with consideration of magnetic circuit saturation. Proposed criterion provides significant improvement of torque tracking accuracy in all control range and can be used in existing and new torque controllers. The efficiency of proposed solution is approved by experimental investigations.

Keywords: maximization, torque per Ampere, vector control, induction motor, magnetizing curve

С. М. Пересада, д-р техн. наук,
С. С. Димко

СТРАТЕГИЯ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С МАКСИМИЗАЦИЕЙ СООТНОШЕНИЯ МОМЕНТ-ТОК ПРИ УЧЕТЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Аннотация. Впервые представлена разработка критерия максимизации соотношения момент-ток статора асинхронного двигателя на основе модели с учетом насыщения контура намагничивания. Разработанный критерий обеспечивает существенное повышение точности отработки заданных траекторий момента во всем рабочем диапазоне и может быть использован в существующих и при создании новых алгоритмов управления моментом. Эффективность предложенного критерия подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: максимизация, соотношение момент-ток, векторное управление, асинхронный двигатель, кривая намагничивания

Вступ. Векторне керування асинхронними двигунами (АД) з максимізацією співвідношення момент-струм набуло розповсюдження в електромеханічних системах з обмеженнями по первинному джерелу живлення [1], [2]. Додатково, до можливості отримання максимального значення моменту при обмеженому струмі, цей критерій забезпечує роботу АД в режимах, що є близькими до оптимізованих по активним втратам, оскільки обидва критерії вимагають регулювання модуля вектора потокосцеплення в залежності від значення моменту, що розвивається АД [3], [4]. Головною перевагою критерію максимізації співвідношення момент-струм являється його простота, оскільки він передбачає регулювання польової компоненти вектору струму i_d на рівні його моментної компоненти i_q . Таке формулювання базується на розгляді моделі АД, що не враховує реальну криву намагнічу-

вання. Оскільки в реальних електричних машинах присутній ефект насичення магнітного кола, що призводить до зміни індуктивності намагнічуючого контуру, то регулювання моменту можливо лише з деякою точністю.

Головною метою даної роботи є розробка критерію максимізації співвідношення момент-струм на основі математичної моделі АД, яка враховує нелінійність кола намагнічування двигуна. Запропонований критерій оптимізації може використовуватись в алгоритмах [5] – [9], що дозволить забезпечити асимптотичність відпрацювання заданих траєкторій моменту із максимізацією співвідношення момент-струм в незалежності від місцезнаходження робочої точки на кривій намагнічування.

1. Математична модель і постановка задачі

Розглянемо динамічну модель АД, отриману на основі припущень симетричності АД і лінійності маг-

нітного кола, представлену в системі координат (d-q), що обертається з довільною кутовою швидкістю

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= J^{-1} (M - M_c), \quad M = \mu_1 (\psi_d i_q - \psi_q i_d), \\ \dot{i}_d &= -\gamma i_d + \omega_0 i_q + \alpha \beta \psi_d + \beta \omega \psi_q + u_d / \sigma, \\ \dot{i}_q &= -\gamma i_q - \omega_0 i_d + \alpha \beta \psi_q - \beta \omega \psi_d + u_q / \sigma, \\ \dot{\psi}_d &= -\alpha \psi_d + \omega_2 \psi_q + \alpha L_m \dot{i}_d, \\ \dot{\psi}_q &= -\alpha \psi_q - \omega_2 \psi_d + \alpha L_m \dot{i}_q, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0, \varepsilon_0(0) = 0, \omega_2 = \omega_0 - \omega, \end{aligned} \quad (1)$$

де $(u_d, u_q)^T$ – вектор керуючих напруг статора, $(i_d, i_q)^T$, $(\psi_d, \psi_q)^T$ – вектори струму і потокозчеплення ротора, ω – кутова швидкість ротора, M – електромагнітний момент, M_c – момент навантаження, ω_0, ε_0 – кутова швидкість та кутове положення системи координат (d-q) відносно стаціонарної системи координат (a-b), J – повний момент інерції. Без втрати загальності прийнято одну пару полюсів. Додатні константи в (1), пов'язані з електричними і механічними параметрами АД, визначені наступним чином: $\alpha = R_2 / L_2$, $\sigma = L_1 - L_m^2 / L_2$, $\beta = L_m / \sigma L_2$, $\gamma = R_1 / \sigma + \alpha \beta L_m$, $\mu_1 = 3L_m / (2L_2)$, R_1, R_2, L_1, L_2 – активні опори і індуктивності статора і ротора відповідно, L_m – індуктивність контуру намагнічування.

Модель (1) достатньо точно описує процеси, що протікають в електричній машині при роботі на лінійній ділянці кривої намагнічування. Для адекватного опису процесів в електричній машині при роботі зі змінним потокозчепленням використано підхід, який базується на наступних припущеннях [9]: а1) насичується лише контур намагнічування АД, який характеризується індуктивністю L_m ; а2) індуктивності статора і ротора визначаються як $L_1 = L_m + L_{1\sigma}$, $L_2 = L_m + L_{2\sigma}$, де $(L_{1\sigma}, L_{2\sigma}) = \text{const}$; а3) статична крива намагнічування при ідеальному полеорієнтуванні задається $|\psi| = f(i_d)$, де $|\psi|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора, i_d – польова компонента вектора струму статора; а4) статична індуктивність контуру намагнічування визначається як $L_m(i_d) \square \psi(i_d) / i_d$; а (5) відношення будь-якої пари L_1, L_2, L_m є постійним.

В умовах цих припущень необхідно для статичних режимів роботи АД розробити критерій максимізації співвідношення момент-струм (співвідношення струмів i_d та i_q).

2. Розробка нелінійного критерію максимізації. При ідеальній орієнтації по вектору потокозчеплення ротора рівняння електромагнітного моменту в (1) набуде наступного вигляду:

$$M = \mu_1 \psi(i_d) i_q. \quad (2)$$

Залежність $L_m(i_d)$ визначається експериментально шляхом зміни величини польової компоненти вектора струму статора i_d при роботі двигуна в режимі ідеального холостого ходу.

Відповідно до виразу електромагнітного моменту в (2) та визначення модуля вектора струму статора $|I_1| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$, запишемо співвідношення момент-струм

$$K_T = M / |I_1|. \quad (3)$$

Враховуючи а3) і а4), рівняння електромагнітного моменту в (2) може бути представлено у вигляді

$$M = \mu_1 L_m(i_d) i_d i_q. \quad (4)$$

Після підстановки (4) в (3) отримаємо

$$K_T = (\mu_1 L_m(i_d) i_d i_q) / (\sqrt{i_d^2 + i_q^2}). \quad (5)$$

При умові $M = \text{const}$ з (4) знайдемо залежність $i_q = f(i_d, M)$ у вигляді

$$i_q = \frac{M}{\mu_1 L_m(i_d) i_d}. \quad (6)$$

З урахуванням (6) вираз (5) перепишеться

$$K_T = \frac{\mu_1 L_m(i_d) i_d}{\sqrt{i_d^4 L_m^2(i_d) + M^2}} M. \quad (7)$$

Знаходження значення польової компоненти вектора струму статора i_d , при якому співвідношення момент-струм буде максимальним, визначається похідною від виразу (7) по i_d

$$\begin{aligned} \frac{\partial K_T}{\partial i_d} \Big|_{M=\text{const}} &= \frac{\mu_1 M \left(L_m(i_d) + i_d \frac{dL_m(i_d)}{di_d} \right)}{z} \\ &= \frac{M \left[4\mu_1^3 L_m^3(i_d) i_d^4 + 2\mu_1^3 L_m^2(i_d) \frac{dL_m(i_d)}{di_d} \right]}{2z^3}, \end{aligned} \quad (8)$$

де $z = \sqrt{i_d^4 L_m^2(i_d) + M^2}$.

Розв'язок рівняння (8) за умови, що ліва частина виразу дорівнює нулю дозволяє знайти екстремум функції (7). Враховуючи те, що порядок нелінійного алгебраїчного рівняння є більшим п'яти, його вирішення аналітичним методом є неможливим. Тому, для знаходження рішень рівняння (8) використано чисельний метод. Отримані розв'язки при різних значеннях M формують функціональну залежність $i_{dT}(M)$, що визначає значення струму збудження при максимальному значенні співвідношення момент-струм.

Для двигуна АР112М4 потужністю 5,5 кВт і номінальним значенням моменту 37 Н·м експериментальним шляхом було знято залежність модуля вектора потокозчеплення від величини струму збудження двигуна відносно номінального значення i_{df} , яку представлено на рис.1 суцільною лінією. Після визначення індуктивності намагнічування L_m , що представлена штриховою лінією на рис.1, і використання її в (8) знайдено залежність $i_{dT}(M)$

$$i_{дт}(M) = -1.06 \cdot 10^{-6} M^4 + 1.96 \cdot 10^{-4} M^3 - 0.013 M^2 + 0.547 M + 1.01. \quad (9)$$

3. Експериментальні дослідження. Для встановлення ефективності нелінійного критерію максимізації було досліджено чотири алгоритми:

A1. Стандартний алгоритм векторного керування моментом АД [10].

A2. Алгоритм векторного керування моментом АД з максимізацією співвідношення момент-струм статора [6], без врахування насичення.

A3. Алгоритм векторного керування моментом АД з максимізацією співвідношення момент-струм статора з врахуванням нелінійності контуру намагнічування лише в спостерігачі потокозчеплення [7].

A4. Алгоритм векторного керування моментом [7], із максимізацією співвідношення момент-струм статора на основі запропонованого нелінійного критерію у вигляді функціональної залежності (9).

Індуктивність намагнічування, Потокочеплення
 L_m (Гн) ротора, ψ_a (Вб)

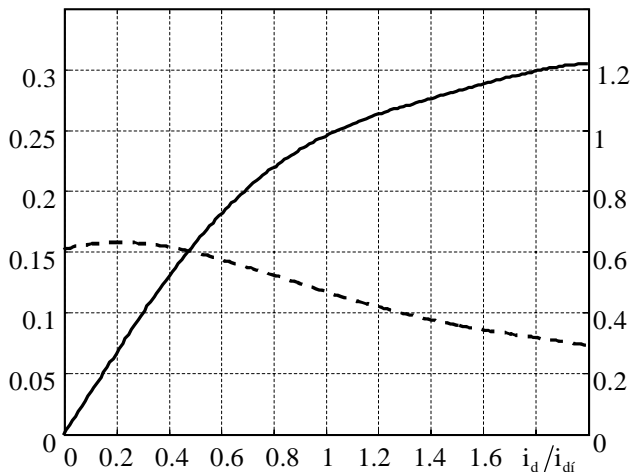


Рис. 1. Залежності модуля вектора потокозчеплення (суцільна лінія) і індуктивності намагнічування (штрихова) від відносного струму збудження АД.

Під час тестування від двигуна вимагалось відпрацювати задану траєкторію моменту, що зображена на рис. 2. Послідовність операцій керування була наступною: на початковому інтервалі часу ($0 \leq t < 0,5$ с) підтримується мінімальний рівень модуля вектора потокозчеплення; в час $t = 0,5$ с задана траєкторія моменту починає зростати і досягає значення 7 Н·м (приблизно 20 % від номінального значення); через кожен наступний інтервал часу тривалістю в 1 с задана траєкторія моменту зростає по лінійному закону на 7 Н·м поки не досягне значення 35 Н·м; в момент часу $t = 5,5$ с завдання моменту зменшується до нуля.

На рис. 3 та рис. 4 представлено графіки зміни оціненого значення модуля вектора потокозчеплення та модуля вектора струму статора для алгоритмів, що тестувались.

З результатів тестування слідує, що найбільше значення модуля вектора струму статора має місце при роботі стандартного алгоритму A1, через підтри-

мання модуля вектора потокозчеплення завжди на номінальному рівні.

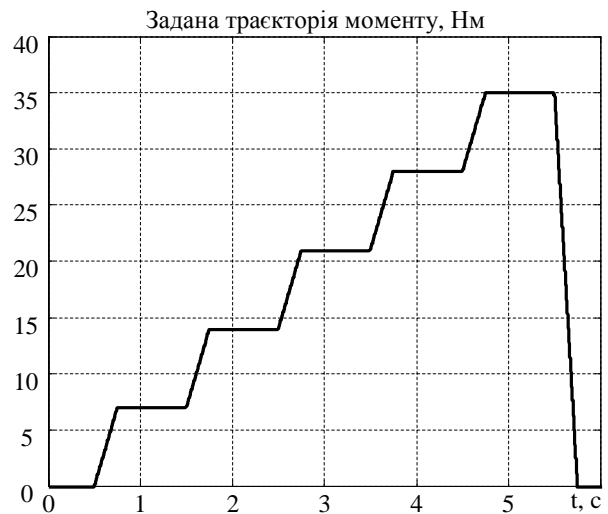


Рис. 2. Траєкторія заданого моменту

Алгоритми A2 і A3, які спроектовані на основі лінійного критерію максимізації, а саме рівності польової і моментної складових струму вектора статора, забезпечують максимізацію співвідношення момент-струм статора за умови, коли магнітне коло АД не насичується. Для досліджуваного двигуна діапазон моментів, при яких можлива реалізація даного критерію становить від 0 до 21 Н·м. При подальшому збільшенні моменту відбувається зростання польової компоненти вектора струму статора, що призводить до насичення магнітного кола АД. Тому при реалізації цих алгоритмів було введено обмеження для польової компоненти вектора струму статора на рівні номінального значення. В діапазоні моментів від 22 до 35 Н·м алгоритми A2 і A3 працюють аналогічно до стандартного алгоритму векторного керування A1. Це пояснює співпадання графіків модуля вектора потокозчеплення і струму статора для алгоритмів A1 – A3 в цьому діапазоні.

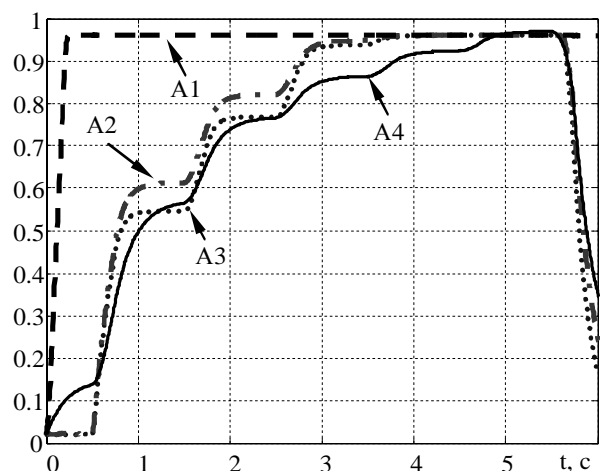


Рис. 3. Оцінене значення модуля вектора потокозчеплення

Алгоритм А4, розроблений на основі розв'язку рівняння (8), формує необхідні значення польової і моментної складових струму статора, які забезпечують максимізацію співвідношення момент-струм (7) в усьому діапазоні моментів M . Аналізуючи графік модулю струму статора (рис. 4), можна зробити висновок, що використання цього алгоритму забезпечує менше значення струму статора у порівнянні з іншими алгоритмами. Необхідно також зазначити, що при відпрацюванні номінального електромагнітного моменту значення модуля вектора потокозчеплення дещо перевищує номінальне, тобто передбачається робота в зоні насичення кола намагнічування АД.

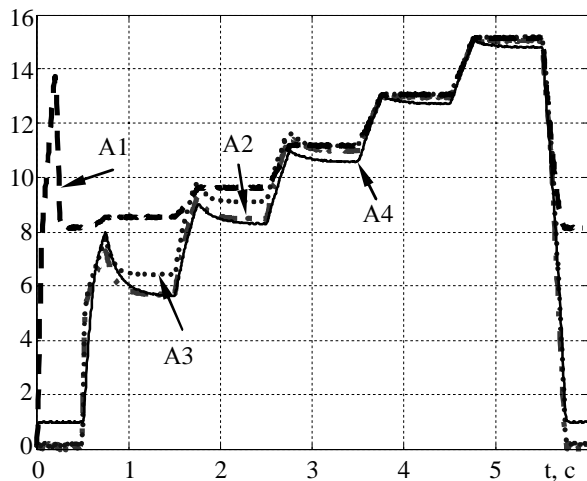


Рис. 4. Модуль вектора струму статора

Висновки. Вперше розроблено критерій максимізації співвідношення момент-струм на основі математичної моделі асинхронного двигуна, яка враховує насичення магнітного кола двигуна. Використання цього критерію в алгоритмах векторного керування моментом АД дозволить забезпечити асимптотичність відпрацювання заданих траєкторій моменту із максимізацією співвідношення момент-струм, не залежно від місцезнаходження робочої точки на кривій намагнічування. Ефективність розробленого критерію підтверджується результатами експериментальних досліджень.

Запропонований універсальний критерій оптимізації може бути використаний в алгоритмах векторного керування, які забезпечують асимптотичність відпрацювання модуля вектора потокозчеплення, струмів статора та асимптотичне полеорієнтування.

Список використаної літератури

1. Wasynchuk O., Sudhoff S.D., Corsine K.A., Tichenor J., Krause P., Hansen I., and Taylor L., (1998), A Maximum Torque per Ampere Control Strategy for Induction Motor Drives, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 2. pp. 163 – 169 (In English), doi 10.1109/60.678980
2. Grcar B., Cafuta P., Stumberger G., Stankovic A.M., and Hofer A., (2011), Non-Holonomy in Induction Machine Torque Control, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 367 – 375 (In English), doi 10.1109/TCST.2010.2042718.

3. Cacciato M., Consoli A., Scarcella G., and Scelba G., (2007), Indirect Maximum Torque per Ampere Control of Induction Motor Drives, *Proc. of Power Electronics and Applications 2007*, Aalborg, Denmark, pp. 1 – 10, September 2007 (In English), doi 10.1109/EPE.2007.4417542.

4. Famouri P., and Cathey J.J., (1991), Loss Minimization Control of an Induction Motor Drive, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 27, pp. 32 – 37, Jan. 1991 (In English), doi 10.1109/28.67529.

5. Peresada S., Kovbasa S., and Dymko S. (2010), Indirect Field-Oriented Torque Control of Induction Motors with Maximum Torque per Ampere Ratio, *Transactions of Kremenchuk State University*, No. 3/2010 (62), part 2, pp. 33 – 36 (In English).

6. Dymko S., Leidhold R., and Peresada S., (2013), Induction Motors Torque Control with Torque per Ampere ratio Maximization, *Proc. of Magdeburger Maschinenbau-Tage; 11* (Magdeburg): Paper B5-1, pp. 1 – 8, September 2013 (In English).

7. Dymko S, Peresada S., and Leidhold R., (2014), Torque Control of Saturated Induction Motor with Torque per Ampere Ratio Maximization, *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems(IEPS) 2014*, Kiev, Ukraine, pp. 251 – 256 (In English).

8. Kwon C., and D.Sudhoff S., (2005), An Improved Maximum Torque per amp Control Strategy for Induction Machine Drives, *Conf. Rec. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 6, Vol. 2, pp. 740 – 745 (In English), doi 10.1109/APEC.2005.1453052

9. Levi E., (1995), A Unified Approach to Main Flux Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Induction Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, September 1995. (In English), doi 10.1109/60.464868.

10. Peresada S, Tilli A., and Tonielli A., (2003), Theoretical and Experimental Comparison of Indirect field-oriented Controllers for Induction Motors, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 151 – 163 (In English), doi 10.1109/TPEL.2002.807123.

Отримано 08.07.2014

References

1. Wasynchuk O., Sudhoff S.D., Corsine K.A., Tichenor J., Krause P., Hansen I., and Taylor L., (1998), A Maximum Torque per Ampere Control Strategy for Induction Motor Drives, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 2. pp. 163 – 169 (In English), doi 10.1109/60.678980
2. Grcar B., Cafuta P., Stumberger G., Stankovic A.M., and Hofer A., (2011), Non-Holonomy in Induction Machine Torque Control, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 367 – 375 (In English), doi 10.1109/TCST.2010.2042718
3. Cacciato M., Consoli A., Scarcella G., and Scelba G., (2007), Indirect Maximum Torque per Ampere Control of Induction Motor Drives, *Proc. of Power Electronics and Applications 2007*, Aalborg, Denmark, pp. 1 –

10, September 2007 (In English), doi 10.1109/EPE.2007.4417542.

4. Famouri P., and Cathey J.J., (1991), Loss Minimization Control of an Induction Motor Drive, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 27, pp. 32 – 37, Jan. 1991 (In English), doi 10.1109/28.67529

5. Peresada S., Kovbasa S., and Dymko S. (2010), Indirect Field-Oriented Torque Control of Induction Motors with Maximum Torque per Ampere Ratio, *Transactions of Kremenchuk State University*, No. 3/2010 (62), part 2, pp. 33 – 36 (In English).

6. Dymko S., Leidhold R., and Peresada S., (2013), Induction Motors Torque Control with Torque per Ampere ratio Maximization, *Proc. of Magdeburger Maschinenbau-Tage; 11* (Magdeburg): Paper B5-1, pp. 1 – 8, September 2013 (In English).

7. Dymko S, Peresada S., and Leidhold R., (2014), Torque Control of Saturated Induction Motor with Torque per Ampere Ratio Maximization, *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems(IEPS) 2014*, Kiev, Ukraine, pp. 251 – 256 (In English).

8. Kwon C., and D. Sudhoff S., (2005), An Improved Maximum Torque per amp Control Strategy for Induction Machine Drives, *Conf. Rec. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 6, Vol. 2, pp. 740 – 745 (In English), doi 10.1109/APEC.2005.1453052

9. Levi E., (1995), A Unified Approach to Main Flux Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Induction Machines, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 10, No. 3, September 1995. (In English), doi 10.1109/60.464868.

10. Peresada S, Tilli A., and Tonielli A., (2003), Theoretical and Experimental Comparison of indirect field-oriented Controllers for Induction Motors, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 151 – 163 (In English), doi 10.1109/TPEL.2002.807123.



Пересада
Сергій Михайлович,
д-р техн. наук, проф., зав. каф.
автоматизації електромеха-
нічних систем та електроприводу
Нац. технічного ун-ту
України «Київський політехніч-
ний ін-т», пр. Перемоги, 37,
м. Київ, Україна, 03056.
Тел: (044) 236-99-30.
E-mail:
sergei.peresada@gmail.com



Димко
Сергій Сергійович,
асистент каф. автоматизації
електромеханічних систем та
електроприводу нац. техніч-
ного ун-ту України «Київсь-
кий політехнічний ін-т»,
пр. Перемоги, 37,
м. Київ, Україна, 03056.
Тел: (067) 362-36-64.
E-mail: sdymko@ukr.net