

УДК 621.313

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.133>

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ОДНОЦИЛІНДРОВОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА

Ю.В. Шуруб*, канд. техн. наук, О.М. Попович**, докт. техн. наук, І.В. Головань***, канд. техн. наук, О.В. Бібік****, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: yvshur@ukr.net

Розглянуто особливості роботи замкнутих систем регулювання швидкості електроприводів одноциліндрових поршневих компресорів, обумовлені наявністю нелінійної залежності між моментом навантаження двигуна та кутового переміщення його ротора. Показано, що присутність внутрішнього нелінійного зв'язку, що формує момент навантаження, у замкнутій системі регулювання може призводити до субгармонічних механічних автоколивань, які погіршують енергетичні та експлуатаційні показники електропривода. Запропоновано використання статичних регуляторів для усунення субгармонічних автоколивань та збільшення ККД електропривода. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: поршневий компресор, автоколивання, метод гармонічної лінеаризації, статичний регулятор.

Вступ. Досить великим класом електроприводів, що працюють під дією змінних за періодичними законами моментами навантаження, є електроприводи поршневих компресорів холодильних агрегатів та теплових насосів. Застосування регульованих за частотою електроприводів є ефективним засобом підвищення їхньої енергоефективності [1–4]. Проте, наявність періодичного навантаження суттєво впливає на ефективність регульованого асинхронного двигуна (АД) порівняно з режимом роботи в разі статичного навантаження. Так, аналіз динамічних характеристик квазістатичного режиму роботи двигуна 4А63В2У3 за частоти живлення 15 Гц із навантаженням типу одноциліндрового поршневого компресора, момент опору якого змінюється періодично в діапазоні від 0 до 4 Нм, показав зниження ККД на 9,47 % порівняно з режимом роботи зі сталим навантаженням, що дорівнює середньому за період значенню [5]. Причому зі збільшенням ступеня завантаження АД зниження ККД і пульсації швидкості досягають критичного рівня за меншого діапазону зміни частоти живлення.

Підвищити ефективність роботи електроприводів із динамічними змінними навантаженнями можливо завдяки створенню замкнутих систем з оптимальними за динамічними показниками якості регуляторами, що дає можливість збільшити цикловий ККД таких асинхронних електроприводів до 5–7 % [6]. Подібні результати були отримані для електроприводів, моменти навантаження яких не залежать від координат електропривода, тобто існує незалежне, зовнішнє до електродвигуна, джерело збурення. Тоді як особливістю поршневого компресора є суттєво нелінійна залежність моменту навантаження двигуна від кута повороту ротора.

Метою цієї роботи є визначення підходів до вибору типу регулятора швидкості асинхронного електропривода поршневого компресора із забезпеченням підвищення енергоефективності режимів його роботи з урахуванням періодичності навантаження, що нелінійно залежить від кутового переміщення ротора виконавчого механізму, за допомогою створення ефективних замкнутих систем зі скалярними методами регулювання асинхронним двигуном.

Матеріали досліджень. Дослідження буде проводитись на прикладі одноциліндрового компресора з частотно-регульованим електроприводом на базі асинхронного двигуна потужністю 550 Вт. Асинхронний електропривод із лінеаризованою механічною характеристикою як об'єкт регулювання за скалярного керування може бути описаний передатною функцією за керуванням [7]:

$$W_U(s) = \frac{K_U}{T_e T_M s^2 + T_M s + 1}, \quad (1)$$



де K_U – коефіцієнт передачі за сигналом керування; T_e – електромагнітна постійна часу; T_M – електромеханічна постійна часу.

Передатна функція об'єкта регулювання за збуренням визначається такою формулою [7]:

$$W_M(s) = \frac{K_f(T_e s + 1)}{T_e T_M s^2 + T_M s + 1}, \quad (2)$$

де K_f – коефіцієнт передачі за збуренням.

У цій роботі розрахунки будуть проводитись для частотно регульованого двигуна 4А63В2У3, якщо $T_e = 0,0058$ с, $T_M = 0,0261$ с. Прийнято, що АД привода компресора працює за періодичної зміни моменту опору M_o залежно від кута повороту ротора φ [8], причому ця залежність $M_o = f(\varphi)$ є нелінійною (рис. 1).

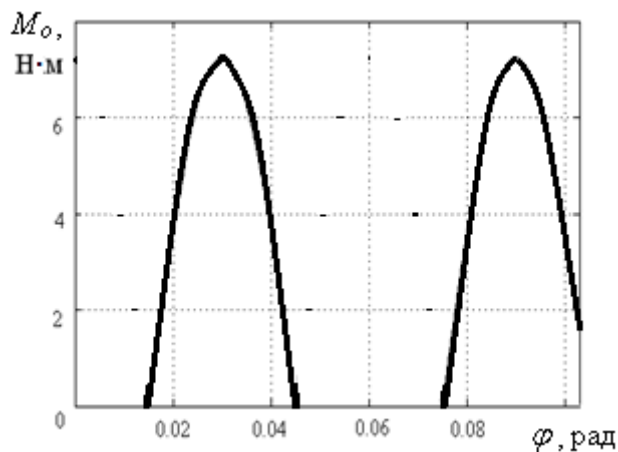


Рис. 1

Таким чином, об'єктом керування в цьому випадку буде електродвигун із внутрішнім нелінійним зворотним зв'язком, що формує момент навантаження. Контур внутрішнього зворотного зв'язку вміщує суттєво нелінійну ланку $f(\varphi)$, що пов'язує момент опору та кутове переміщення двигуна φ , інтегруючи ланку $1/s$, що пов'язує кутове переміщення двигуна та його швидкість обертання, та передатну функцію об'єкта регулювання за збуренням $W_M(s)$. Отже, нелінійний контур внутрішнього зворотного зв'язку для замкнутої системи регулювання швидкості, поданої на рис. 2, є нелінійним динамічним елементом.

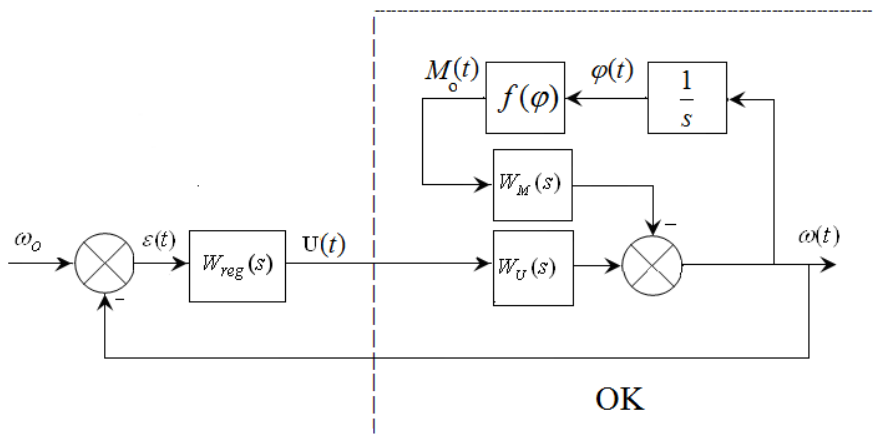


Рис. 2

Відповідно до об'єкта керування (ОК) системи регулювання швидкості на рис. 2 відносяться передатна функція об'єкта за керуванням та нелінійний контур внутрішнього зворотного зв'язку.

За принципом роботи компресора вихідна величина – швидкість обертання $\omega(t)$ знаходиться в режимі коливань, що залежать від частоти напруги живлення та обумовлені взаємодією послідовного з'єднання інтегруючої та нелінійної ланок у контурі внутрішнього зворотного зв'язку. Водночас замикання системи зовнішнім зворотним зв'язком за швидкістю може викликати додаткові субгармонічні автоколивання з частотою, що залежить від структури та параметрів системи, а не від частоти напруги живлення. Тому серед можливих видів регуляторів слід обирати такі, в яких субгармонічних автоколивань у замкнутій системі регулювання не існуватиме.

Для дослідження розглянутої нелінійної системи використаємо метод гармонічної лінеаризації. Згідно з [9], передатна функція нелінійної ланки за її гармонічної лінеаризації має такий вигляд:

$$W_{нл}(s) = \frac{x_{вих}(s)}{x_{вх}(s)} = q + \frac{q'}{\omega} \cdot s, \quad (3)$$

де q та q' – коефіцієнти гармонічної лінеаризації, які залежать від виду нелінійності; a, ω – амплітуда й частота автоколивань.

Коефіцієнти гармонічної лінеаризації визначаються за формулами:

$$q = \frac{1}{\pi \cdot a} \int_0^{2\pi} x_{вих} \cdot \sin(\omega t) d(\omega t); \quad (4)$$

$$q' = \frac{1}{\pi \cdot a} \int_0^{2\pi} x_{вих} \cdot \cos(\omega t) d(\omega t), \quad (5)$$

де $x_{вих}$ – реальний сигнал на виході нелінійної ланки.

Знайдемо коефіцієнти гармонічної лінеаризації нелінійної ланки $f(\varphi)$, вихідний сигнал $x_{вих}$ якої, як видно з рис. 1, дорівнює $M_{\max} \sin(\omega t)$ протягом першого півперіоду зміни вхідного сигналу φ та нулю протягом другого півперіоду. Інтегруючи частинами, отримаємо:

$$q = \frac{1}{\pi \cdot a} \cdot \left(\int_0^{\pi} M_{\max} \sin^2(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) \right) = \frac{M_{\max}}{2 \cdot a}; \quad (6)$$

$$q' = \frac{1}{\pi \cdot a} \cdot \left(\int_0^{\pi} M_{\max} \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \cdot \cos(\omega t) d(\omega t) \right) = 0. \quad (7)$$

Передатна функція гармонічно лінеаризованого нелінійного контуру внутрішнього зворотного зв'язку матиме вигляд:

$$W_{HK}(s) = \frac{1}{1 + \frac{(T_e s + 1) / \beta}{T_e T_M s^3 + T_M s^2 + s} \cdot \frac{M_{\max}}{2 \cdot a}}. \quad (8)$$

Передатна функція лінійної частини системи:

$$W_{лч}(s) = W_{рег}(s) \frac{1}{T_e T_M (s^2) + T_M s + 1}. \quad (9)$$

Для обґрунтування вибору типу регулятора швидкості скористаємось критерієм стійкості Найквіста, згідно з яким умова знаходження гармонічно лінеаризованої системи на границі стійкості, тобто умова існування автоколивань, має вигляд:

$$W_{лч}(j\omega) = -\frac{1}{W_{HK}(j\omega)}. \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (10) може бути знайдений графічно як перетин кривих на комплексній площині. Якщо криві амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) лінійної частини $W_{лч}(j\omega)$ та зворотна АФЧХ нелінійного контуру $-\frac{1}{W_{HK}(j\omega)}$ перетинаються (рис. 3),

то періодичне рішення існує, і в замкнутій системі регулювання швидкості будуть існувати автоколивання з частотою, що залежить від структури та параметрів системи, а в загальному випадку – не від частоти напруги живлення. Якщо ж указані криві не перетинаються (рис. 5), то періодичне рішення відсутнє, і автоколивання в системі не існують. Оскільки АФЧХ нелінійного динамічного контуру внутрішнього зворотного зв'язку залежить від двох параметрів

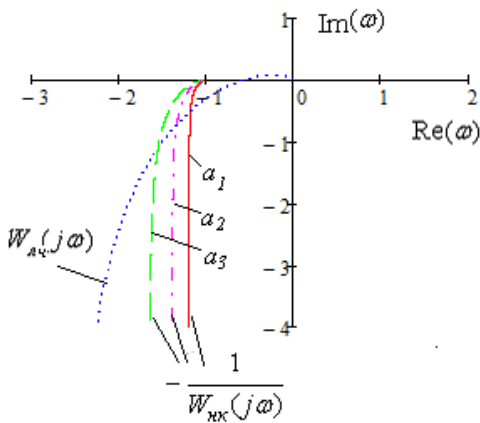


Рис. 3

На рис. 3 показані годографи АФЧХ лінійної частини та зворотної АФЧХ динамічного нелінійного контуру в разі застосування астатичних регуляторів, що вміщують інтегруючу ланку.

Завдяки фазовому зсуву на 90 град., що вносить інтегруюча ланка, АФЧХ лінійної частини за застосування будь-якого з астатичних регуляторів буде починатись із третього квадранта комплексної площини, тобто годограф АФЧХ лінійної частини системи з астатичним регулятором може перетинати годографи зворотної АФЧХ динамічного нелінійного контуру.

Отже, у системі з астатичним регулятором додатково до коливань швидкості, обумовлених нелінійним зворотним зв'язком між моментом навантаження та кутовим переміщенням та залежних від частоти живлення, можуть бути присутні субгармонічні автоколивання, обумовлені взаємодією в замкнутій системі інтегруючої ланки регулятора з нелінійним внутрішнім контуром та залежні від параметрів системи (рис. 4). Крива зміни швидкості в режимі

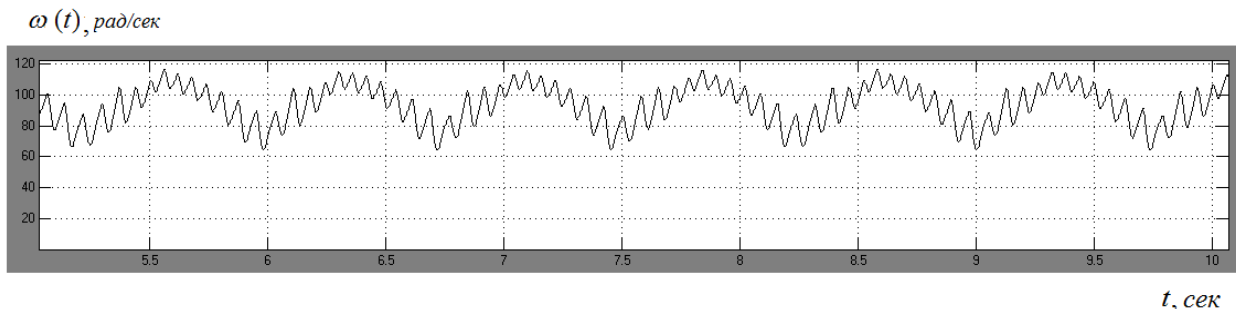


Рис. 4

автоколивань, отримана за допомогою моделі в системі імітаційного моделювання [5], показана на рис. 4. Водночас цикловий ККД електроприводу зменшується, наприклад, за заданої частоти живлення 20 Гц з 56,4 % у разі нерегульованого електроприводу до 36 % у разі замикання зворотним зв'язком за швидкістю.

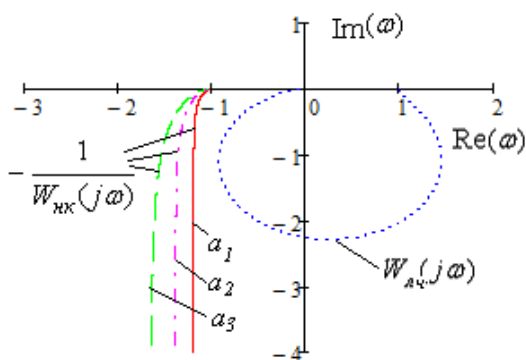


Рис. 5

Тому для стабілізації швидкості в електроприводі, момент навантаження якого нелінійно залежить від переміщення, доцільно використовувати статичні регулятори, що не містять інтегруючої ланки. Годографи АФЧХ лінійної частини та зворотної АФЧХ динамічної нелінійної ланки в разі застосування статичних регуляторів подані на рис. 5.

З рис. 5 видно, що за відповідного вибору параметрів статичного регулятора перетину цих годографів не існуватиме через початковий фазо-

вий зсув 0 град. Відповідно додаткові субгармонічні автоколивання, обумовлені взаємодією в замкнутій системі регулятора з нелінійним внутрішнім контуром, у цьому випадку відсутні (рис. 6), що дає змогу застосовувати для систем зі статичними регуляторами методи параметричної та структурної оптимізації регуляторів швидкості для цілей збільшення циклового ККД асинхронних електроприводів [10]. Дослідження показали, що застосування статичних регуляторів дає змогу збільшити цикловий ККД електропривода одноциліндрового компресора з 56,4 % у випадку нерегульованого електропривода до 57,4 % за заданої частоти живлення 20 Гц. За заданої частоти 15 Гц це збільшення відбувається з 41,6 до 45,6 %.

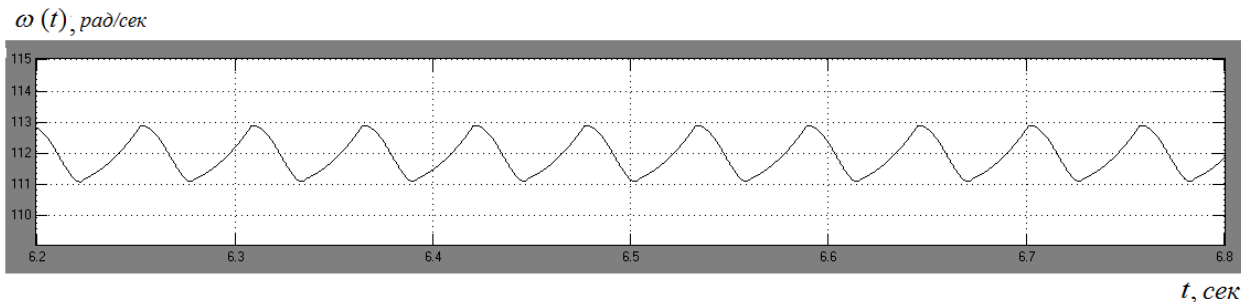


Рис. 6

Висновки. На прикладі частотно-регульованого електропривода поршневого компресора з АД 4А63В2У3 визначено підходи до вибору регуляторів швидкості для цілей збільшення циклового ККД асинхронних електроприводів, чий момент навантаження нелінійно залежить від кута повороту ротора. За допомогою методу гармонічної лінеаризації показано, що в системі регулювання швидкості електропривода поршневого компресора є доцільним застосування статичного регулятора через нелінійні властивості об'єкта керування.

Фінансується за держбюджетною темою “Наукові засади та засоби комплексного проектного синтезу інтегрованих асинхронних машин систем генерування, накопичення і використання енергії відновлювальних джерел підвищеної ефективності” (шифр «АСЕЛМА-В»). Державний реєстраційний номер 0123U100710.

1. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators Major energy saving by use of variable speed compressors and evaporator fans. *International Appliance Manufacturing*. 1998. Vol. 1. No 2. Pp. 105–109.
2. Binneberg P., Kraus E., Quack H. Reduction In Power Consumption Of Household Refrigerators By Using Variable Speed Compressors. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, USA. 2002. Pp. 1–9. DOI: <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/615>
3. Monasry J.F., Hirayama T., Aoki T., Shida S., Hatayama M., Okada M. Development of large capacity and high efficiency rotary compressor. *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. USA. 2018. Pp. 1–10. DOI: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2576>
4. Huang P. PD Compression: A Quasi-Static or Dynamic Process? *Purdue International Compressor Engineering Conference*, July 14–17, USA. 2014. Pp. 1–11. DOI: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2259>
5. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Y.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.033>.
6. Shurub Y., Dudnyk A. Realization Techniques of Statistical Optimization Modes of Induction Drives. *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, 2017. Pp. 68–71. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240805>.
7. Ключев В. И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
8. Редкозуб Б.Д., Якобсон В.Б. Динамические характеристики поршневого компрессора. *Холодильная техника*. 1972. № 4. С. 9–12.
9. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. К.: Либідь, 2007. 656 с.
10. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Джюра О.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І. Електричні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 29. С. 62–70.

SUBSTANTIATION OF THE SELECTION OF THE SPEED CONTROLLER OF THE SINGLE-CYLINDER PISTON COMPRESSOR ELECTRIC DRIVE

Yu.V. Shurub, O.M. Popovych, I.V. Golovan, O.V. Bibik

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteyskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: yvshur@ukr.net

The peculiarities of the operation of closed systems of speed regulation of electric drives of single-cylinder piston compressors due to the presence of a non-linear dependence between the load torque and the angular movement of its rotor are considered. It is shown that the presence of an internal nonlinear connection, which forms a load torque, in a closed control systems can lead to subharmonic mechanical self-oscillations, which worsen the power and performance indicators of the electric drive. The use of static controllers is proposed to eliminate subharmonic self-oscillations and increase the efficiency of the electric drive. Ref. 10, fig. 6.

Keywords: piston compressor, self-oscillation, method of harmonic linearization, static controller.

1. Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators Major energy saving by use of variable speed compressors and evaporator fans. *International Appliance Manufacturing*. 1998. Vol. 1. No 2. Pp. 105–109.
2. Binneberg P., Kraus E., Quack H. Reduction In Power Consumption Of Household Refrigerators By Using Variable Speed Compressors. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, USA. 2002. Pp. 1–9. DOI: <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/615>
3. Monasry J.F., Hirayama T., Aoki T., Shida S., Hatayama M., Okada M. Development of large capacity and high efficiency rotary compressor. *International Compressor Engineering Conference at Purdue*. USA. 2018. Pp. 1–10. DOI: <https://docs.lib.purdue.edu/icec/2576>
4. Huang P. PD Compression: A Quasi-Static or Dynamic Process? *Purdue International Compressor Engineering Conference*, July 14–17, USA. 2014. Pp. 1–11. DOI: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/2259>
5. Bibik O.V., Golovan I.V., Popovych O.M., Shurub Y.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.01.033>.
6. Shurub Y., Dudnyk A. Realization Techniques of Statistical Optimization Modes of Induction Drives. *International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenichuk, 2017. Pp. 68–71. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240805>.
7. Kliuchev V.I. Theory of electric drive: textbook for universities. Moskva: Energoatomizdat, 2001. 704 p. (Rus)
8. Redkozub B.D., Jacobson V.B. Dynamic characteristics of piston compressor. *Kholodilnaya tekhnika*. 1972. No 4. Pp. 9–12. (Rus)
9. Popovych M.G., Kovalchuk O.V. Theory of automatic control: textbook. Kyiv: Lybid, 2007. 656 p. (Ukr)
10. Mazurenko L.I., Popovych O.M., Grebenikov V.V., Bibik O.V., Holovan I.V., Dzhura O.V., Shurub Yu.V., Verbovyi A.P., Romanenko A.I. Alternative current electric machines and electromechanical systems on their base. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2011. No 29. Pp. 62–70. (Ukr)

Надійшла: 30.05.2023

Прийнята: 13.06.2023

Submitted: 30.05.2023

Accepted: 13.06.2023