

УДК 621.9.04

**В.П. ЯГЛІНСЬКИЙ**, д.т.н., професор каф. М і ДМ, ОНПУ, Одеса;  
**Г.В. КОЗЕРАЦЬКИЙ**, асистент каф. управління системами БЖД ОНПУ;  
**А.С. ОБАЙДИ**, аспірант каф. М і ДМ ОНПУ;  
**М.М. МОСКВИЧОВ**, аспірант каф. М і ДМ ОНПУ

### **ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРУ ГОЛОВНИХ ЧАСТОТ ТРЕНАЖЕРА-ГЕКСАПОДУ**

У статті розроблено аналітичні залежності визначення головних частот динамічного тренажера екіпажів бойових мобільних машин. Визначені резонансні режими функціонування за шістьма узгаляльними координатами. За результатами чисельного моделювання побудовано діаграми залежності головних частот від просторової конфігурації платформи гексаподу. Встановлено, що відхилення платформи від горизонтального положення зменшує першу, другу та четверту головні частоти, а третя і пята головні частоти збільшуються. Отримані аналітичні моделі дають змогу обрати умови функціонування тренажера в діапазоні допустимих значень резонансних частот.

**Ключові слова:** частотне рівняння, матриця Якобі, резонанс, жорсткість.

**Вступ. Актуальність задачі.** Ефективне використання механізмів паралельної структури і кінематики (МПСК) у сучасних тренажерних системах привело до появи тренажерів нового покоління, що дозволяє не тільки значно скоротити а навіть виключити підготовку екіпажів бойових мобільних машин (БММ) на реальних об'єктах, скоротити затрати на навчання та збільшити рівень їх професіоналізму. Динамічні тренажери на основі гексаподу відтворюють реальні перевантаження і кутові положення БММ, мають можливість моделювати рух транспортного засобу в умовах складного маневру та небезпечних зовнішніх дій: вібрацій корпусу, несприятливого стану дороги, збурень атмосферного середовища, при відмові систем машини або частковому її руйнуванні і т.ін. [1, 2].

© В.П. Яглінський, Г.В. Козерацький, А.С. Обайді, М.М. Москвичов, 2015

У надзвичайних ситуаціях маневру БММ виникають складні просторові рухи і перевантаження машини, які стають визначальними під час відпрацювання професійних навичок маневрування. Тому дослідження коливальних параметрів тренажера є актуальною проблемою.

**Аналіз відомих досліджень.** Конструюванню і дослідженню устаткування на основі МПСК присвячені роботи Ю.М. Кузнецова, Д.А. Дмитрієва, М.І. Черновола, А.Ш. Коліска, А.Ф. Крайнева, В.А. Глазунова, Ж.Р. Merlet та ін. [3-5]. Кінематика та підвищена рухомість тренажерів на основі гексаподу для операторів БММ розглянута в роботах С.С. Гутирі, В.Т. Белікова, М.В. Фелька, В.В. Бачинського, В.М. Ярмолюка, О.В. Поповіченко, О.В. Толстого та ін. [1, 6, 7]. Запропоновані нові конструкції комбінованих тренажерів мобільних машин [8, 9].

Дослідженню жорсткості гексаподів присвячені роботи В.Б. Струтинського, А.М. Кириченко, І.В. Вайнштейна, Н.А. Серкова, Р.О. Сироткіна і ін. [10, 11]. Невирішеною проблемою залишається функціонування тренажерів при резонансних режимах, під час критичних перевантажень, в умовах нестійкості орієнтації і позиціонування та у непередбачених ситуаціях.

Не дослідженими залишаються головні частоти тренажера-гексапода та їх зміна в залежності від просторової орієнтації механізму.

**Ціль досліджень. Постановка задачі.** Ціллю даних досліджень є розробка аналітичних моделей для визначення спектру головних частот тренажера-гексапода в залежності від узагальнених параметрів, які однозначно визначають просторову конфігурацію, а також розробка рекомендацій щодо сприятливих умов функціонування тренажера за наявності коливань.

Під час руху тренажера змінюється його просторова орієнтація і відповідно коливальні параметри. Однак при коливаннях тренажера-гексапода навколо заданої конфігурації допустимо вважати Якобіан системи незмінним. За такої умови слід сформувати матриці узагальнених коефіцієнтів жорсткості і інерції, які теж можна вважати незмінними. Із частотного (вікового) рівняння тренажера можливо визначити спектр головних частот та дослідити його зміну при переході від однієї конфігурації гексаподу до іншої.



Рисунок 1 – Тренажер-гексапод для пілотів за програмою *Shuttle* (NASA, США)

**Розрахункові моделі спектру головних частот тренажера-гексапода.**

Перші моделі динамічних тренажерів мали три ступеня вільності, обмежені рухи з виконання маневрів типу тангажу і крену [1]. Сучасна компоновка тренажера екіпажу мобільних машин на основі платформи Стюарта має 6 ступенів вільності і являє собою систему, що складається з рухомої платформи (рухомий базис) й нерухомого базису (стояка), з'єднаних за допомогою карданних та сферичних кінематичних пар з шістьма рухливими ланками (штангами) змінної довжини (рисунок 1).

Координати центрів шарнірів  $A_i$  нерухомої основи у своєму базисі  $Ox_0Y_0Z_0$

і центрів шарнірів  $B_i$  платформи в рухомому базисі  $SX_SY_SZ_S$ , пов'язаному з платформою, під час руху платформи не змінюються і визначаються так [7]:

$${}^0A_i = (x_{Ai} \ y_{Ai} \ z_{Ai}), \quad {}^S B_i = (B_{xi} \ B_{yi} \ B_{zi}), \quad i = 1 \dots 6,$$

або

$$\begin{pmatrix} {}^0A_1 \\ {}^0A_2 \\ {}^0A_3 \\ {}^0A_4 \\ {}^0A_5 \\ {}^0A_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_A \cos(0,5\gamma_1) & -R_A \sin(0,5\gamma_1) & 0 \\ R_A \cos(\gamma_1 + 0,5\gamma_2) & -R_A \sin(\gamma_1 + 0,5\gamma_2) & 0 \\ R_A \cos(0,5\gamma_2) & -R_A \sin(0,5\gamma_2) & 0 \\ R_A \cos(0,5\gamma_2) & R_A \sin(0,5\gamma_2) & 0 \\ R_A \cos(\gamma_1 + 0,5\gamma_2) & R_A \sin(\gamma_1 + 0,5\gamma_2) & 0 \\ -R_A \cos(0,5\gamma_1) & R_A \sin(0,5\gamma_1) & 0 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{pmatrix} {}^S B_{1,2} \\ {}^S B_{3,4} \\ {}^S B_{5,6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R_B \cos 60^\circ & -R_B \sin 60^\circ & -h_0 \\ R_B & 0 & -h_0 \\ -R_B \cos 60^\circ & R_B \sin 60^\circ & -h_0 \end{pmatrix}^T \right\} \quad (2)$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\gamma_2}{2}\right) = \frac{A_1 A_2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right)}{A_1 A_6 + 0,5 \cdot A_1 A_2}; \quad \gamma_1 = \frac{2\pi}{3} - \gamma_2; \quad A_1 A_2 = R_A \sin \gamma_2,$$

де  $R_A$  та  $R_B$  – радіуси центрів шарнірів  $A_i$  та  $B_i$  відповідно.

Строки матриць визначають координати центрів шарнірів відповідно.

Для просторової конфігурації ПП з урахуванням матриць перетворення координат (при повороті осей – кути  $\psi, \theta, \varphi$ , та поступальному переміщенні з центром  $S$  ПП –  $x_S, y_S, z_S$ ) отримано координати центрів шарнірів  $B_i$  у нерухомій системі  $Ox_0Y_0Z_0$  у вигляді [2]:

$$\begin{pmatrix} x_{Bi} \\ y_{Bi} \\ z_{Bi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{xi}(c_\psi c_\varphi - s_\psi s_\theta s_\varphi) + B_{yi}(-s_\psi c_\theta) + B_{zi}(c_\psi s_\varphi + s_\psi s_\theta c_\varphi) + x_S \\ B_{xi}(s_\psi c_\varphi + c_\psi s_\theta s_\varphi) + B_{yi}c_\psi c_\theta + B_{zi}(s_\psi s_\varphi - c_\psi s_\theta c_\varphi) + y_S \\ B_{xi}(-c_\theta s_\varphi) + B_{yi}s_\theta + B_{zi}c_\theta c_\varphi + z_S \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$i = 1 \dots 6; \quad c_\psi = \cos \psi, \quad s_\psi = \sin \psi, \quad c_\theta = \cos \theta, \quad s_\theta = \sin \theta, \quad c_\varphi = \cos \varphi, \quad s_\varphi = \sin \varphi.$$

Довжини штанг гексаподу для певної просторової конфігурації ПП визначено з урахуванням (1-3) так

$$L_i = A_i B_i = \sqrt{(x_{Bi} - x_{Ai})^2 + (y_{Bi} - y_{Ai})^2 + (z_{Bi} - z_{Ai})^2}, \quad i = 1 \dots 6. \quad (4)$$

Матриця коефіцієнтів жорсткості тренажера-гексапода отримана так [2]:

$$C = J^T \cdot C_D \cdot J; \quad C_D = \operatorname{diag}(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, ), \quad (5)$$

де  $J$  – матриця Якобі на основі (4);  $C_D$  – діагональна матриця коефіцієнтів жорсткості  $c_i$  штанг гексаподу.

Таким чином, складові матриці  $C$  визначаються за формулами (5) з урахуванням (1-4): в залежності від просторової орієнтації.

У заданій просторовій конфігурації механізму знаходиться у рівновазі і узагальнені параметри конфігурації  $(x_S, y_S, z_S, \psi, \theta, \varphi)$  є константи. Під час коливань системи ПП навколо заданої просторової конфігурації змінюються пружні відхилення  $(\Delta x_S, \Delta y_S, \Delta z_S, \Delta u_\psi, \Delta u_\theta, \Delta u_\varphi)$  та відповідні їм деформації штанг гексаподу  $\Delta L_i, \Delta u_\psi = R_B \Delta \psi; \Delta u_\theta = R_B \Delta \theta; \Delta u_\varphi = R_B \Delta \varphi$ .

Матриця узагальнених коефіцієнтів інерції платформи гексаподу [2]

$$A = \text{diag}(m, m, m, J_z/R_B^2, J_x/R_B^2, J_y/R_B^2). \quad (6)$$

де  $m$  – маса платформи;  $J_x, J_y, J_z$  – осьові моменти інерції рухомої платформи відносно своїх власних осей  $SX, SY, SZ$  (осі вважаємо головними, центральними)

Частотне рівняння для ПП тренажера-гексапода з урахуванням (5, 6) має вигляд  $\|C - p^2 A\| = 0$ . Зміна просторової конфігурації ПП характеризується зміною головних частот тренажера-гексапода (рисунки 2-4).

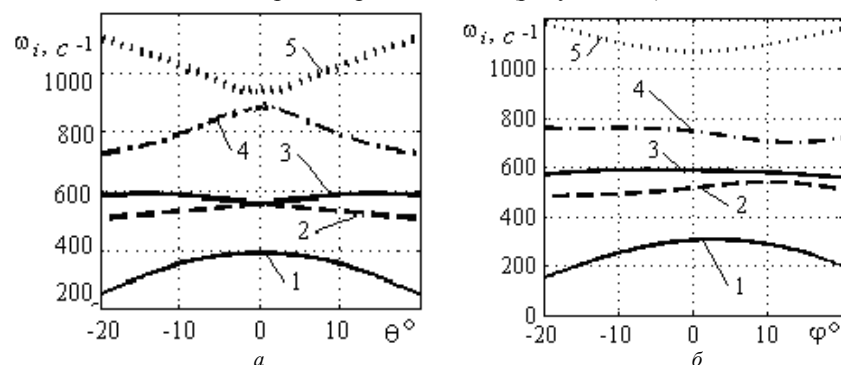


Рисунок 2 – Діаграми головних частот тренажера при зміні кутів нахилу: а –  $\varphi$  при  $\theta=0$ ; б –  $\theta$  при  $\varphi=15^\circ$ ; номер кривої означає номер головної частоти

Усі діаграми частот побудовані для тренажера за конструктивними розмірами  $A_1 A_2 = 4,254$  м,  $A_1 A_6 = 0,76$  м та  $R_A = A_1 A_2 / \sin \gamma_2 = 2,702$  м;  $h_0 = 0,8$  м – відстань полюса  $S$  від площини рухомої платформи;  $R_B = 2,456$ ;  $\gamma_1 = 16,2^\circ$ ;  $\gamma_2 = 103,8^\circ$  [2]. Коефіцієнти жорсткості штанг прийняті однаковими:  $c_i = c_0 = 10^8$  Н/м. Шоста головна частота на рівні  $3000 \text{ c}^{-1}$  і майже не залежить від повороту платформи.

Аналіз результатів досліджень показує, що при відхиленні платформи від горизонтального положення друга і п'ята головні частоти збільшуються на 10%, а інші частоти зменшуються: перша – до 30%, третя і четверта – до 15% (рисунок 2).

Із аналізу діаграм головних частот (рисунки 3, 4) видно, що більш низьким частотам відповідають конфігурації тренажера з нахиленими положеннями рухомої платформи на рівні нахилу  $5^\circ \dots 10^\circ$ .

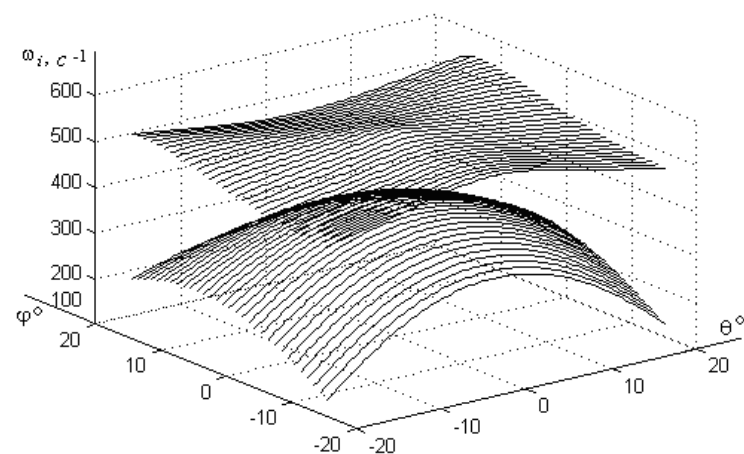


Рисунок 3 – Діаграми головних частот тренажера: першої (нижня) і другої (верхня) для множини конфігурацій з різними дискретними кутами орієнтації  $\theta$  і  $\varphi$

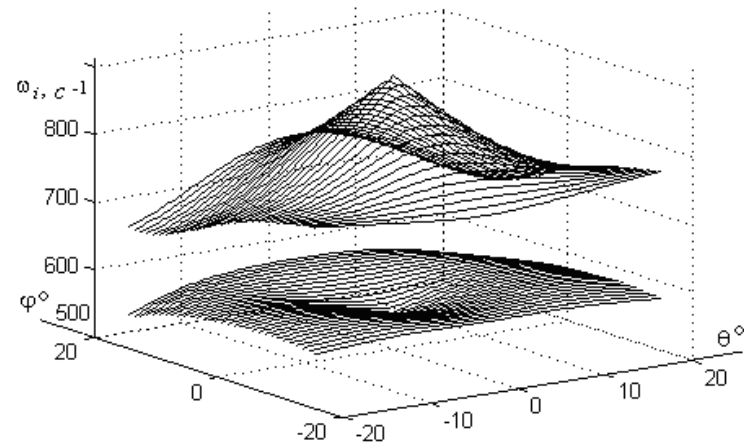


Рисунок 4 – Діаграми головних частот тренажера: третьої (нижня) і четвертої (верхня) для множини конфігурацій з різними дискретними кутами орієнтації  $\theta$  і  $\varphi$

### Висновки:

1. Розроблено аналітичні залежності визначення головних частот тренажера-гексапода від просторової конфігурації МПСК, яка характеризується шістьма узагальненими координатами: трьома координатами полюса  $S$  платформи та трьома кутами орієнтації (кути Ейлера-Крилова). За результатами чисельного моделювання на прикладі певної конструкції тренажера визначено розподіл головних частот для множини конфігурацій МПСК.

2. Встановлено, що відхилення платформи від горизонтального положення зменшує першу, другу та четверту головні частоти, а третя і п'ята головні частоти збільшуються. Шоста головна частота має значення на рівні  $3000 \text{ c}^{-1}$  та майже не залежить від відхилення платформи до  $20^\circ$  від горизонтального по-

ложення. Визначено множини просторових конфігурацій, яка відповідає низьким головним частотам.

3. Отримані аналітичні моделі визначення головних частот тренажера-гексапода дають змогу обрати для виконання тренувальних операцій необхідну конфігурацію МПСК з передбаченими значеннями головних частот та унеможливити виникнення резонансних режимів функціонування.

**Список літератури:** 1. *Бачинський В.В.* Оцінка системи рухомості тренажерів бойових машин [Текст] / *В.В. Бачинський, В.М. Ярмолюк* // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – №1(23). – С.137-141. 2. *Ягінський В.П.* Повышение подвижности кабин динамических тренажеров мобильных машин [Текст] / *В.П. Ягінський, А.С. Обайди, Н.В. Фелько* // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – 3/4(17). – С. 44-48. 3. *Кузнецов Ю.М.* Компонировки верстагов з механізмами паралельної структури [Текст] / *Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв, Г.Ю. Діневич*. – Херсон: ПП Вишмирський В.С., 2009. – 456с. 4. *Глазунов В.А.* Пространственные механизмы параллельной структуры [Текст] / *В.А. Глазунов, А.Ш. Коліско, А.Ф. Крайнев*. – М.: Наука, 1991. – 95с. 5. *Merlet, J.P.* Parallel Robots [Text] // *J.P. Merlet*. –The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. – 417p. 6. *Ягінський В.П.* Надійність авіаційного тренажера на основі гексапода при екстремальних навантаженнях [Текст] / *В.П. Ягінський, С.С. Гутиря* // Вісн. СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія. –2011. – Вип.120. – С.196-205. 7. *Ягінський В.П.* Кінематика комбінованого модульного динамічного тренажера [Текст] / *В.П. Ягінський, А.С. Обайди* // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – №2/1(16). – С. 38-41. 8. Патент України № 104273. Багатокоординатний двосторонній модульний електропривод аерокосмічних тренажерних систем / *Ягінський В.П., Васильєв В.В., Ковалішин С.С., Фелько М.В., Беліков В.Т.* – 10.01.2014. Режим доступу: [www/URL: http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhernikh-sistem.html](http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhernikh-sistem.html). 9. Патент України № 108055. Багатокоординатний силовий тренажер стрільця з комбінованими електромеанічними приводами / *Фелько М.В., Ягінський В.П., Кравчук О.І., Гутиря С.С., Беліков В.Т.* – 10.03.2015. Режим доступу: [www/URL: http://base.uipv.org/search/NV/search.php?action=view\\_details&ldClaim=210056](http://base.uipv.org/search/NV/search.php?action=view_details&ldClaim=210056). 10. *Кириченко А.М.* Моделювання жорсткості верстага-гексапода [Текст] / *А.М. Кириченко* // Зб. наук. праць Кіровоградського НТУ. Техніка в сільгоспвиробництві, галузеve машинобудування, автоматизація. – Вип.20. – Кіровоград: КНТУ, 2008. – С.122-126. 11. *Струтинський В.Б.* Теоретичний аналіз жорсткості шестикоординатного механізму паралельної структури [Текст] / *В.Б. Струтинський, А.М. Кириченко* // Вісник націон. техн. ун-та України "КПІ". Машинобудування. – Т.57. – К.: НТУУ "КПІ", 2009. – С.198-207.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Bachyns'kyi, V.V.* Otsinka systemy rukhomosti trenazheriv boyovykh mashyn [Tekst] / *V.V. Bachyns'kyi, V.M. Yarmolyuk* // Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl. – 2010. – No1(23). – P.137-141. 2. *Yahlyns'kyi, V.P.* Povyshenye podvyzhnosti kabin dynamycheskykh trenazherov mobyl'nykh mashyn [Tekst] / *V.P. Yahlyns'kyi, A.S. Obaydy, N.V. Fel'ko* // Tekhnolohycheskyi audyt y rezervy proyzvodstva. – 2014. – 3/4(17). – P.44-48. 3. *Kuznyetsov, Yu.M.* Komponovky verstativ z mekhanizmyu paralel'noyi struktury [Tekst] / *Yu.M. Kuznyetsov, D.O. Dmytryiev, H.Yu. Dinevych*. – Kherson: PP Vyshemyr's'kyi V.S., 2009. – 456p. 4. *Hlazunov, V.A.* Prostranstvennye mekhanizmy paralel'noy struktury [Tekst] / *V.A. Hlazunov, A.Sh. Kolyshkor, A.F. Kraynev*. – Moscow: Nauka, 1991. – 95p. 5. *Merlet, J.P.* Parallel Robots [Text] // *J.P. Merlet*. –The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2006. – 417p. 6. *Yahlyns'kyi V.P.* Nadiynist' aviatsiynoho trenazhera na osnovi heksapoda pry ekstremal'nykh navantazhenyakh [Tekst] / *V.P. Yahlyns'kyi, S.S. Hutryya* // Visn. SevNTU. Mekhanika, enerhetyka, ekolohiya. –2011. – No120. – P.196-205. 7. *Yahlyns'kyi, V.P.* Kinematyka kombinovanoho modul'noho dynamichnoho trenazhera [Tekst] / *V.P. Yahlyns'kyi, A.S. Obaydi* // Tekhnolohycheskyi audyt y rezervy proyzvodstva. – 2014. – No2/1(16). – P. 38-41. 8. Patent Ukrayiny No 104273. Bahatokoordynatnyy dvostoronniy modul'nyy elektroprivod aerokosmichnykh trenazhernykh system / *V.P. Yahlyns'kyi, V.V. Vasylyev, S.S. Kovalishyn, M.V. Fel'ko, V.T. Belikov* // – 10.01.2014. Rezhym dostupu: [www/URL: http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhernikh-sistem.html](http://uapatents.com/16-104273-bagatokoordinatnij-dvos-toronnij-modulnij-elektroprivod-aerokosmichnikh-trenazhernikh-sistem.html). 9. Patent Ukrayiny No108055. Bahatokoordynatnyy silovyy trenazher stril'tsya z kombinovanymy elektromechanichnymy pryvodamy / *M.V. Fel'ko, V.P. Yahlyns'kyi, O.I. Kravchuk, V.T. Belikov* // – 10.03.2015. Rezhym dostupu: [www/URL: http://base.uipv.org/search/NV/search.php?action=view\\_details&ldClaim=210056](http://base.uipv.org/search/NV/search.php?action=view_details&ldClaim=210056). 10. *Kyrychenko, A.M.* Modelyuvannya zhorstkosti verstaty-heksapoda [Tekst] / *A.M. Kyrychenko* // Zb. nauk. prats' Kirovohrads'koho NTU. Tekhnika v sil'hospyrobnyts'vi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya. – No20. – Kirovohrad: KNTU, 2008. – P.122-126. 11. *Strutyns'kyi, V.B.* Teoretichnyy analiz zhorstkosti shestykoordynatnoho mekhanizmu paralel'noyi struktury [Tekst] / *V.B. Strutyns'kyi, A.M. Kyrychenko* // Visnyk natsion. tekhn. un-ta Ukrayiny "KPI". Mashynobuduvannya, T.57. – Kyiv: NTUU "KPI", 2009. – P.198-207.

Надійшла (received) 09.03.2015