УДК 621.87 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.71944

ОДНОКІВШЕВИЙ ЕКСКАВАТОР З ПРОСТОРОВО-ОРІЄНТОВАНОЮ СТРІЛОЮ

Канд. техн. наук Д.О. Міщук,
Є.В. Горбатюк, О.А. Тетерятник

ОДНОКОВШОВЫЙ ЭКСКАВАТОР С ПРОСТРАНСТВЕННО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СТРЕЛОЙ

Канд. техн. наук Д.А. Мищук,
Е.В. Горбатюк, А.А. Тетерятник

SINGLE-BUCKET EXCAVATOR WITH THE SPATIALLY-ORIENTED JIB

Cand. of techn. sciences D.A. Mischuk, E.V. Gorbatyuk, O.A. Teterjatnik

У статті представлено конструкцію одноківшевого екскаватора з просторово-орієнтованою стрілою для виконання аварійно-рятувальних робіт. Наведено методику та представлено результати визначення статичної стійкості даної машини за різних просторових орієнтацій робочого органа. На основі проведеного дослідження запропонована конструкція рухомої противаги екскаватора.

Ключові слова: *екскаватор для розбору завалів, просторово-орієнтована стріла, стійкість екскаватора.*

В статье предложена конструкция одноковшового экскаватора с пространственно-ориентированной стрелой для выполнения аварийно-спасательных работ. Приведена методика и представлены результаты определения статической устойчивости данной машины при различных пространственных ориентаций рабочего органа. На основе проведенного исследования предложена конструкция подвижного противовеса экскаватора.

Ключевые слова: *экскаватор для разбора завалов, пространственно-ориентированная стрела, устойчивость экскаватора.*

For the effective perform rescue operations require special high-performance machinery for fast parsing blockages. This machine must work in cramped conditions and to be universal. For such purposes, the article suggests to use work equipment single-bucket excavator in the form of spatially oriented jib. Using this machine will increase the effectiveness of the rescue works.

In the article the study of the stability of the excavator jib spatially-oriented based on transition matrices. Result is useful for the development of the program safe operation of rescue machine. The paper also proposed scheme movable counterweight excavator from pantograph.

Key words: *excavator for parsing blockages, space-oriented jib, excavator stability.*

Постановка проблеми. Аварії, природні та техногенні катастрофи призводять до людських втрат [1]. Оперативність реагування на такі складні ситуації та виконання аварійно-рятувальних робіт підвищує вірогідність порятунку людей [2]. Тому існує необхідність наявності спеціальної високопродуктивної техніки, яка б дозволяла максимально швидко проводити розбирання завалів.

До виконання аварійно-рятувальних робіт залучаються спеціальні машини такі як ИМР-2М, УМЗР-1 та цивільна техніка [3-5]. Одноківшевий екскаватор є однією з основних машин, що використовується для розбирання завалів при виконанні рятувальних та відновлювальних робіт [6]. При ліквідації завалів простих і середніх типів використовують одноківшеві екскаватори з навісним обладнанням у вигляді гідромолотів, гідрозубил, дискових пил, зубів-розпушників, гідросколювачів, грейферних ковшів для кускових та сипучих матеріалів. Перед розбиранням складних завалів виконують розрізання (сколювання) довгомірних

залізобетонних конструкцій гідросколювачами чи дисковими пилами, які встановлюють на екскаваторах або замість відвалів інженерних машин розгороджування, з наступним транспортуванням конструкцій шляхопрокладачами чи машинами-захватами [7].

При роботі одноківшевого екскаватора значна кількість часу витрачається на його перебазування в місці розбору завалу [8]. Такі операції пов'язані з обмеженістю його робочої зони [9]. Для підвищення продуктивності виконання рятувальних робіт одноківшевим екскаватором пропонується удосконалити його робоче обладнання за рахунок використання просторово-орієнтованої стрілової системи (рис. 1).

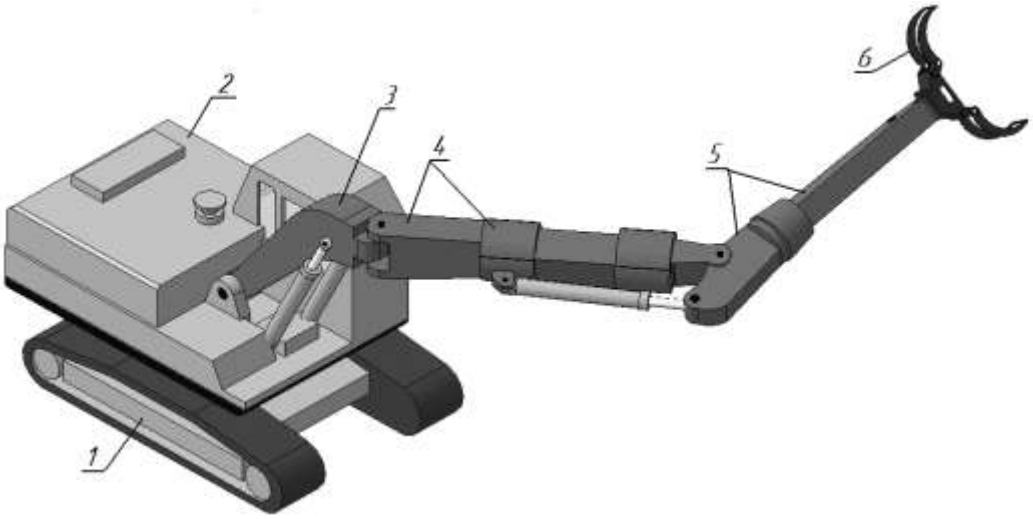


Рис. 1. Прототип одноківшевого екскаватора з просторово-орієнтованою стрілою

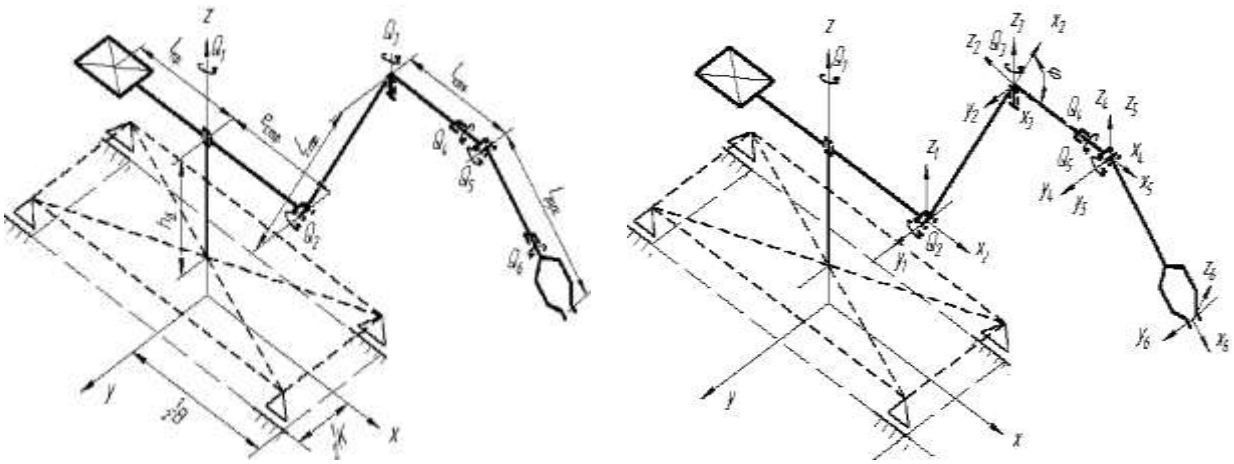
Запропонована конструкція стрілової системи екскаватора дає можливість маніпулювати робочим органом в стиснених умовах завалів зруйнованих споруд, зменшуючи небезпеку знаходження рятувальників в цих умовах. Окрім цього підвищується продуктивність виконання рятувальних робіт з одного місця стоянки машини. Проте застосування подібного робочого обладнання потребує перерахунку та дослідження забезпечення стійкості машини в процесі роботи.

Мета роботи полягає у дослідженні статичної стійкості одноківшевого екскаватора з просторово орієнтованою стрілою та створення засобів забезпечення його стійкості.

Виклад основного матеріалу. Для проведення дослідження статичної стійкості екскаватора з просторово-орієнтованою стрілою представлено його кінематичну схему (рис. 2).

До основних частин екскаватора належать (рис. 1): ходова частина *1*, поворотна платформа *2*, стріла *3*, збірна консоль *4*, збірна рукоять *5* то робочий орган *6* у вигляді захватного пристрою. Даний екскаватор має шість ступенів рухомості робочого органа. Із них п'ять ступенів рухомості (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5) відповідають за переміщення захватного пристрою в просторі та одна координата (Q_6) – за його орієнтацію. На рис. 2. прийнято, що *B* – база екскаватора, а *K* – його колія. Колія і база екскаватора утворюють його опорний контур відносно якого повинна забезпечуватися статична стійкість даної системи.

Зв'яжемо з опорним контуром екскаватора нерухому систему координат *XYZ*, причому приймемо умову, що вісь *Z* повинна співпадати з віссю повороту поворотної платформи. Прийнято положення, що центри мас ланок екскаватора знаходяться в їхніх геометричних центрах. Для визначення координат центрів ваги кожної із ланок маніпулятора в нерухомій системі координат, використаємо матричний метод опису даної кінематичної схеми [10].



а б

Рис. 2. Кінематична схема екскаватора з просторово-орієнтованою стрілою (а) та схема переносу систем координат (б)

Так як координата Q_6 не впливає на положення стріли екскаватора, тож нею знехтуємо. На рис. 2, б представлено схему переносу системи координат. Переміщення нерухомої системи координат, для зручності, почато з точки обертання поворотної платформи. Для переміщення в систему $X_1Y_1Z_1$, необхідно здійснити поворот на кут Q_1 навколо осі Z, піднятися по осі Y на величину $h_б$ та переміститися по осі X на розмір $e_{стр.}$ (рис. 2). З системи координат $X_1Y_1Z_1$ для переміщення в систему $X_2Y_2Z_2$ необхідно здійснити поворот навколо осі Y_1 на кут Q_2 та переміститися по осі X_1 на розмір $l_{стр.}$. Для переведення в систему $X_3Y_3Z_3$ виконується поворот на кут φ навколо осі Y_2. Далі для переходу в систему $X_4Y_4Z_4$ здійснюється поворот навколо осі Z_3 на кут Q_3 та переміщення вздовж осі X_3 на величину $l_{кон.}$. Наступний етап – це поворот навколо осі X_4 на кут Q_4. Після повороту навколо осі Y_5 на кут Q_5 та переміщення вздовж осі X_5 на розмір l_{ryk} потрапляємо в систему координат $X_6Y_6Z_6$.

В матричній формі описані перетворення будуть такі:

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h_b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(Q_1) & -\sin(Q_1) & 0 & 0 \\ \sin(Q_1) & \cos(Q_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & e_{стр.} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} \cos(-Q_2) & 0 & \sin(-Q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-Q_2) & 0 & \cos(-Q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{стр.} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$C_3 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \; C_4 = \begin{pmatrix} \cos(Q_3) & -\sin(Q_3) & 0 & 0 \\ \sin(Q_3) & \cos(Q_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{кон.} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$C_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(Q_4) & -\sin(Q_4) & 0 \\ 0 & \sin(Q_4) & \cos(Q_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \; C_6 = \begin{pmatrix} \cos(Q_5) & 0 & \sin(Q_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(Q_5) & 0 & \cos(Q_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{рук.} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для переходу з нерухомої системи координат стрілової системи екскаватора, яка пов'язана з його опорним контуром в рухому систему координат, яка пов'язана із захватом, необхідно здійснити матричне перетворення:

$$T_{0-6} = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 . \qquad (1)$$

Результатом виконання виразу (1) буде матриця 4×4, в якій останній стовпець визначатиме положення захватного пристрою в нерухомій системі *XYZ*.

Для визначення координат центрів мас ланок створено додаткові матриці переходу:

- для стріли $A_2 = \begin{pmatrix} \cos(-Q_2) & 0 & \sin(-Q_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(-Q_2) & 0 & \cos(-Q_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{l_{стр.}}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$;

- для консолі $A_4 = \begin{pmatrix} \cos(Q_3) & -\sin(Q_3) & 0 & 0 \\ \sin(Q_3) & \cos(Q_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{l_{кон.}}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$;

- для рукояті $A_6 = \begin{pmatrix} \cos(Q_5) & 0 & \sin(Q_5) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(Q_5) & 0 & \cos(Q_5) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{l_{рук.}}{2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Відповідно, матриці переходу від рухомої системи координат центрів мас ланок до нерухомих координат: для стріли – $T_{0-1} = C_1 A_2$; для консолі – $T_{0-2} = C_1 C_2 C_3 A_4$; для рукояті – $T_{0-3} = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 A_6$.

Досліджено статичну стійкість екскаватора при його роботі на горизонтальній поверхні. Перекидний момент для такого випадку буде визначатися як сума добутків ваги ланок та координат центрів їх ваги в нерухомій системі координат (пов'язаній з опорним контуром), враховуючи вантаж та захватний пристрій.

Перекидний момент екскаватора створюють стріла ($m_{стр}$), консоль ($m_{кон}$), рукоять ($m_{рук}$) та вантаж із захватним пристроєм ($m_{ван}$).

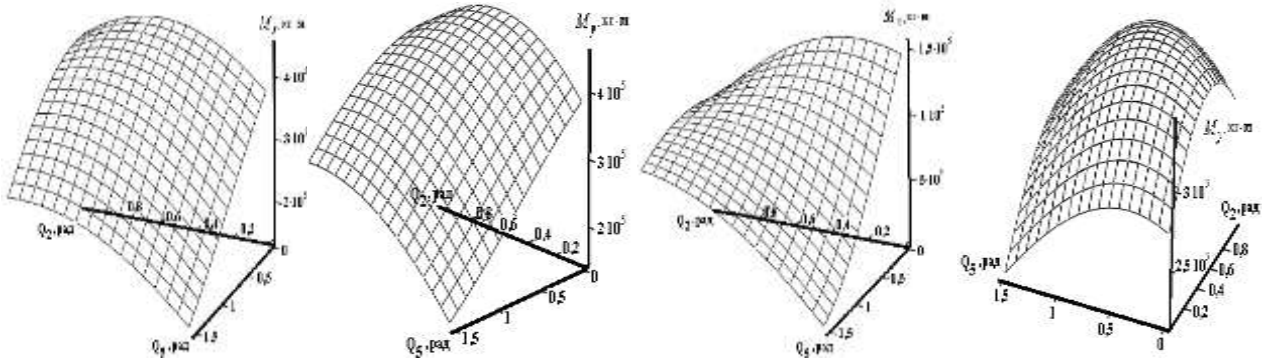
Перекидні моменти по координатам *X* та *Y*:

$$M_x = m_{стр} g \cdot (x_{стр} - \frac{1}{2}B) + m_{кон} g \cdot (x_{кон} - \frac{1}{2}B) + m_{рук} g \cdot (x_{рук} - \frac{1}{2}B) + m_{ван} g \cdot (x_{ван} - \frac{1}{2}B) . \quad (2)$$

$$M_y = m_{стр} g \cdot (y_{стр} - \frac{1}{2}K) + m_{кон} g \cdot (y_{кон} - \frac{1}{2}K) + m_{рук} g \cdot (y_{рук} - \frac{1}{2}K) + m_{ван} g \cdot (y_{ван} - \frac{1}{2}K), \quad (3)$$

де $x_{стр}$, $x_{кон}$, $x_{рук}$, $x_{ван}$, $y_{стр}$, $y_{кон}$, $y_{рук}$ та $y_{ван}$ – координати центрів мас ланок та вантажу в нерухомій системі координат, що відповідають відповідно першому та другому елементам четвертого стовпця матриць T_{0-1}, T_{0-2}, T_{0-3} та T_{0-6}.

Для бази одноківшевого екскаватора Doosan Daewoo Solar 175LC-V з розробленою просторово-орієнтованою стріловою системою, досліджено характер зміни статичних перекидних моментів, що у вигляді графіків представлено на рис. 3 при переміщенні вантажу 4 т.



а б в г

Рис. 3. Величини перекидних моментів в залежності від зміни кутів повороту Q_2 та Q_5:
а – $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$; б – $Q_1 = 90^\circ, Q_2 = Q_3 = 0$; в – $Q_1 = Q_3 = 0, Q_2 = 80^\circ$;
г – $Q_1 = 40^\circ, Q_2 = 10^\circ, Q_3 = 50^\circ$

Основною характеристикою стійкості екскаватора є коефіцієнт стійкості:

$$K_{ст_x(y)} = \frac{M_{утр_x(y)}}{M_{x(y)}}, \quad (4)$$

де $K_{ст_x(y)}$ – коефіцієнти повздовжньої та поперечної стійкості машини, $M_{утр_x(y)}$ – утримуючі моменти:

$$M_{утр_x} = m_b g \cdot B + m_{pr} g \cdot (l_k \cos(Q_1) + \frac{B}{2}),$$

$$M_{утр_y} = m_b g \cdot K + m_{pr} g \cdot (l_k \sin(Q_1) + \frac{K}{2}), \quad (5)$$

де m_b, m_{pr} – маси відповідно неповоротної та поворотної частин екскаватора, l_k - координата центра маси поворотної частини.

Використовуючи залежності (2) – (5) оперативно визначається коефіцієнт стійкості машини та є основою для створення програми попередження перевертання екскаватора. У випадках втрати стійкості екскаватора запропоновано модернізувати його додатковою рухомою противагою (рис. 4).

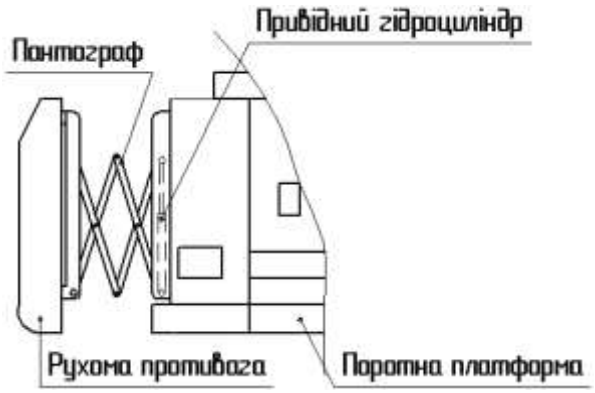


Рис. 4. Схема рухомої противаги на основі пантографу

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. В ході дослідження було встановлено, що існуючі вітчизняні машини для виконання аварійно-рятувальних робіт мають недоліки в ефективності виконання робіт. Було запропоновано екскаватор з просторово-орієнтованою стріловою системою, який дозволяє підвищити ефективність розбору завалів зруйнованих будівель і на сучасному етапі для виконання комплексних аварійно-рятувальних робіт доцільно комплектувати серійні одноківшеві гусеничні екскаватори відповідним робочим обладнанням.

Представлена методика оперативного визначення коефіцієнта стійкості машини дозволяє розробити відповідні системи для забезпечення безпечного виконання рятувальних робіт.

Напрямком подальшої роботи передбачається розробка ефективної системи керування екскаватора на основі матриць переходу та дослідження динамічної стійкості.

Список використаних джерел

1. Хмара, Л.А. Використання будівельної техніки для виконання рятувальних та відновлювальних робіт при ліквідації наслідків стихійних лих та аварій [Текст] / Л.А. Хмара, С.В. Шатов // Будівництво України. – 2008. – № 5 – С. 34-39.
2. Хмара, Л.А. Технология ведения спасательных работ землеройно-мани-пуляторным оборудованием многоцелевого назначения [Текст] / Л.А. Хмара, С.В. Шатов // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. — 2008. – № 71. – С. 24-29.
3. Хмара, Л.А. Технологія і організація розбирання завалів зруйнованих будівель та споруд [Текст] / Л.А. Хмара, С.В. Шатов // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2010. – №76. – С. 83-93.
4. Одинцов, Л.Г. Технология и технические средства ведения поисково-спасательных и аварийно-спасательных работ [Текст]: справочное пособие / Л.Г. Одинцов, В.В. Парамонов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 232 с.
5. Ветров, Ю.А. Машины для специальних земляных работ [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ю.А. Ветров, В.Л. Баладинский. – К.: Вища школа, 1980. – 192 с.
6. Волянюк, В.О. Напрямки розвитку закордонної будівельної техніки для земляних робіт [Текст] / В.О. Волянюк // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: Всеукр. зб. наук. праць. – К.: КНУБА, 2006. – Вип.. 67. – С. 54-58.
7. Добронравов, С.С. Строительные машины и основы автоматизации [Текст] / С.С. Добронравов, В.Г. Дронов. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.
8. Баладінський, В.Л. Будівельна техніка [Текст] / В.Л. Баладінський, І.І. Назаренко, О.Г. Оніщенко. – К.; Полтава: КНУБА – ПНТУ, 2002 – 463 с.
9. Домбровский, Н.Г. Строительные машины [Текст] / Н.Г. Домбровский, Ю.Л. Картвелт-швили, М.Н. Гальпенин. – М.: Машиностроение, 1976. – 391 с.
10. Спину, Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение [Текст]: учеб. пособие / Г.А. Спину. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1991. – 311 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор Ю.Д. Абрашкевич

Міщук Дмитро Олександрович, канд. техн. наук, кафедра будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури, E-mail: tdmid@ukr.net.
Горбатюк Євген Володимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури.
Тетерятник Олександр Анатолійович, кафедра будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури.

Mishchuk Dmitry Alexandrovich, Ph.D., department of construction machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture, e-mail: tdmid@ukr.net.
Gorbatyuk Evgeniy Volodimirovich, Ph.D., associate professor, department of construction machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture.
Teterjatnik Alexander Anatolijovich, department of construction machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture.