

УДК 621.879.33

ФОРМУВАННЯ ТЕЛЕСКОПІЧНОГО РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ОДНОКІВШЕВОГО ЕКСКАВАТОРА ЯК ЗАДАЧА ДИСКРЕТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

ХМАРА Л.А.¹, *д.т.н., проф.*,
ДАХНО О.О.^{2*}, *аспірант*

¹ Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (093) 267-03-86, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302.

^{2*} Кафедра будівельних і дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (066) 044-84-48, e-mail: olegdakhno@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6916-4327.

Анотація. *Постановка проблеми.* Перспективним напрямком розвитку землерийної техніки є телескопічне робоче обладнання одноковшового екскаватора, яке дозволяє збільшити глибину копання та висоту розвантаження, збільшити об'єм розроблюваного ґрунту з однієї стоянки та радіус роботи обладнання, швидко змінювати в широкому діапазоні геометричні параметри робочого обладнання та використовувати широкий спектр змінних робочих органів. Окрім цього, телескопічне робоче обладнання дає змогу об'єднувати робочі операції з одночасною зміною лінійних розмірів обладнання, що дозволяє зменшувати час циклу а також виконувати роботи які потребують поступального руху, наприклад, розосереджені роботи по зачистці та плануванню поверхонь земляних споруд у дорожньому будівництві. **Мета статті.** Розробити методику формування робочого обладнання одноковшового екскаватора зі змінними геометричними параметрами, а якому зміна параметрів відбувається за рахунок застосування телескопічних механізмів. **Висновок.** Запропонований метод формування робочого обладнання одноковшового екскаватора зі змінними геометричними параметрами, а якому зміна параметрів відбувається за рахунок застосування телескопічних механізмів, дозволяє отримувати коректні поєднання складових елементів у нові структури РО. Представлено спосіб зведення проблеми структурного синтезу до задачі лінійного дискретного програмування. Застосування методів структурного синтезу, гіперграфів та теорії множин дозволяє виключити фізично неможливі комбінації. Отримані структури з традиційних та телескопічних елементів включають всі можливі комбінації як кінематичних так і технологічних схем.

Ключові слова: одноковшевий екскаватор, формування телескопічного робочого обладнання, структурний синтез, дискретна оптимізація.

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОГО РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА КАК ЗАДАЧА ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

ХМАРА Л.А.¹, *д.т.н., проф.*,
ДАХНО О.А.^{2*}, *аспірант*.

¹ Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (093) 267-03-86, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302.

^{2*} Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (066) 044-84-48, e-mail: olegdakhno@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6916-4327.

Аннотация. *Постановка проблемы.* Перспективным направлением развития землеройной техники является телескопический рабочее оборудование одноковшового экскаватора, которое позволяет увеличить глубину копания и высоту разгрузки, увеличить объем разрабатываемого ґрунта с одной стоянки и радиус работы оборудования, быстро менять в широком диапазоне геометрические параметры рабочего оборудования и использовать широкий спектр сменных рабочих органов. Кроме этого, телескопическое рабочее оборудование позволяет объединять рабочие операции с одновременным изменением линейных размеров оборудования, что приводит к уменьшению времени цикла, а также выполнять работы, которые требуют поступательного движения, например, рассредоточенные работы по зачистке и планированию поверхностей земляных сооружений в дорожном строительстве. **Цель статьи.** Разработать методику формирования рабочего

оборудования одноковшового экскаватора с переменными геометрическими параметрами, в котором изменение параметров происходит за счет применения телескопических механизмов. **Вывод.** Предложенный метод формирования рабочего оборудования одноковшового экскаватора с переменными геометрическими параметрами, в котором изменение параметров происходит за счет применения телескопических механизмов, позволяет получать корректные сочетание составляющих элементов в новые структуры оборудования. Представлен способ сведения проблемы структурного синтеза к задаче линейного дискретного программирования. Применение методов структурного синтеза, гиперграфов и теории множеств позволили исключить физически невозможные комбинации. Полученные структуры из традиционных и телескопических элементов включают все возможные комбинации как кинематических, так и технологических схем.

Ключевые слова: одноковшовый экскаватор, формирование телескопического рабочего оборудования, структурный синтез, дискретная оптимизация.

CREATING OF THE TELESCOPIC WORKING EQUIPMENT OF EXCAVATOR AS A PROBLEM OF THE DISCRETE OPTIMIZATION

KHMARA L.A.¹ *Doctor of Technical Sciences, Professor.*

DAKHNO O.O.^{2*} *, postgraduate.*

¹ Department of Building and road machines. State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (093) 267-03-86, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302.

^{2*} Department of Building and road machines. State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (066) 044-84-48, e-mail: olegdakhno@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6916-4327.

Summary. Raising of problem. A promising area of earth-moving equipment is a telescopic working equipment of excavator, which can increase the digging depth and dump height, increase the amount of soil developed on one lot and the radius of the equipment, to quickly change a wide range of geometrical parameters of working equipment, and use a wide range of interchangeable working bodies. In addition, the telescopic working equipment allows workers to combine operations with the simultaneous change in the linear dimensions of the equipment, which leads to a reduction in the cycle time, and perform the work required by the translational movement, for example, the dispersed work for cleaning and planning surfaces earthworks in road construction. **The purpose of the article.** Develop a method of forming an excavator working equipment with variable geometrical parameters in which parameters are changing due to the use a telescopic mechanism. **Conclusion.** The proposed method of formation of the working equipment excavator with variable geometrical parameters in which parameters are changing due to the use a telescopic mechanism allows to obtain the correct combination of the constituent elements in the structure of the new equipment. Provided a method for the problem of structural synthesis of information to a linear discrete programming. Application of the methods of structural synthesis, hypergraphs and set theory allowed to eliminate physically impossible combination. The resulting structure of the conventional and telescopic elements include all possible combinations of both kinematic and technological schemes.

Keywords: excavator, telescopic the formation of of the working equipment, structural synthesis, discrete optimization.

Постановка проблеми. Перспективним напрямком розвитку землерийної техніки є телескопічне робоче обладнання одноковшового экскаватора (ТРО ОГЕ), яке дозволяє збільшити глибину копання та висоту розвантаження, збільшити об'єм розроблюваного ґрунту з однієї стоянки та радіус роботи РО, швидко змінювати в широкому діапазоні геометричні параметри РО та використовувати широкий спектр змінних робочих органів. Окрім цього, ТРО ОГЕ дає змогу об'єднувати робочі операції з одночасною зміною лінійних розмірів РО, що дозволяє зменшувати час циклу а також

виконувати роботи які потребують поступального руху РО, наприклад, розосереджені роботи по зачистці та плануванню поверхонь земляних споруд у дорожньому будівництві. Екскаватори оснащені ТРО здатні забезпечити до 70% механізації цих робіт [1, 2, 3, 4, 5].

Мета статті. Розробити методіку формування робочого обладнання одноковшового экскаватора зі змінними геометричними параметрами, а якому зміна параметрів відбувається за рахунок застосування телескопічних механізмів.

Основний матеріал. Ґрунтуючись на методиці розчленування об'єкту на складові елементи з наступним об'єднанням їх у нову структуру [1, 2, 3, 4] розглянемо РО ОґЕ, як

структуру, яка складається з n секцій елемента стріли A та k секцій елемента рукояті B . Методика розчленування передбачає виконання низки етапів (рис. 1).



Рис. 1. Схема формування нового РО ОґЕ методом структурного синтезу.

На першому етапі здійснюється операція по розділенню РО на елементів стріли A та рукояті B на секції n і k , відповідно, з використанням низки традиційних змінних робочих органів, таким чином отримується різноманіття традиційних елементів, з яких можливо отримати нові структури без модернізацій кожного з них. Далі розкриваються етапи по формуванню нових рішень. В [11] були розглянуті нові рішення, які полягають у формуванні нової структури РО, яка складається з традиційних елементів без їх зміни, а також рішень пов'язаних з вдосконаленням та модифікацією кожного елемента та формування традиційної

структури, а також формування нових структур з нових елементів (рис. 2) [4].

Формування як традиційних структур РО з телескопічних елементів, так і нових структур РО з телескопічних елементів здатне забезпечити різноманіття зміни лінійних параметрів РО для розробки ґрунту на глибинах в межах від $H_{к}=5.5...22$ м, а також до $H_{к}=35$ м з використанням грейферних ковшів. З означеним різноманіттям в повній мірі здатні впоратись одно-, двох-, і трисекційні телескопічні системи стріли ($A_{тр}=n$; $A_{т.1}=n+n_1$; $A_{т.2}=n+n_1+n_2$) та рукояті ($B_{тр}=k$; $B_{т.1}=k+k_1$; $B_{т.2}=k+k_1+k_2$), та їх синтез у нові

структури у поєднанні з основними видами робочих органів $\{E_w\}$. Структури з більшою кількістю телескопічних елементів є менш доцільними, оскільки виникають питання по забезпеченню жорсткості та розподіленню мас телескопічних елементів і їх приводів, а також складності конструкції. Для полегшення розрахунків та комбінаторної кількості варіацій РО, умовно вважаємо рівнозначними конструкції моноблочної та шарнірно-зчленованої стріли – $\{A1, A2\} = A$,

де $A1$ – моноблочна конструкція стріли; $A2$ – шарнірно-зчленована конструкція стріли. Описати подібні структури можна використовуючи метод орієнтованих гіперграфів. Представимо схему формування нового РО ОГЕ, зображену на рисунку 1 у вигляді орієнтованого гіперграфу – рисунок 2, а структурний гіперграф комбінацій реалізованих рішень на рисунку 3.

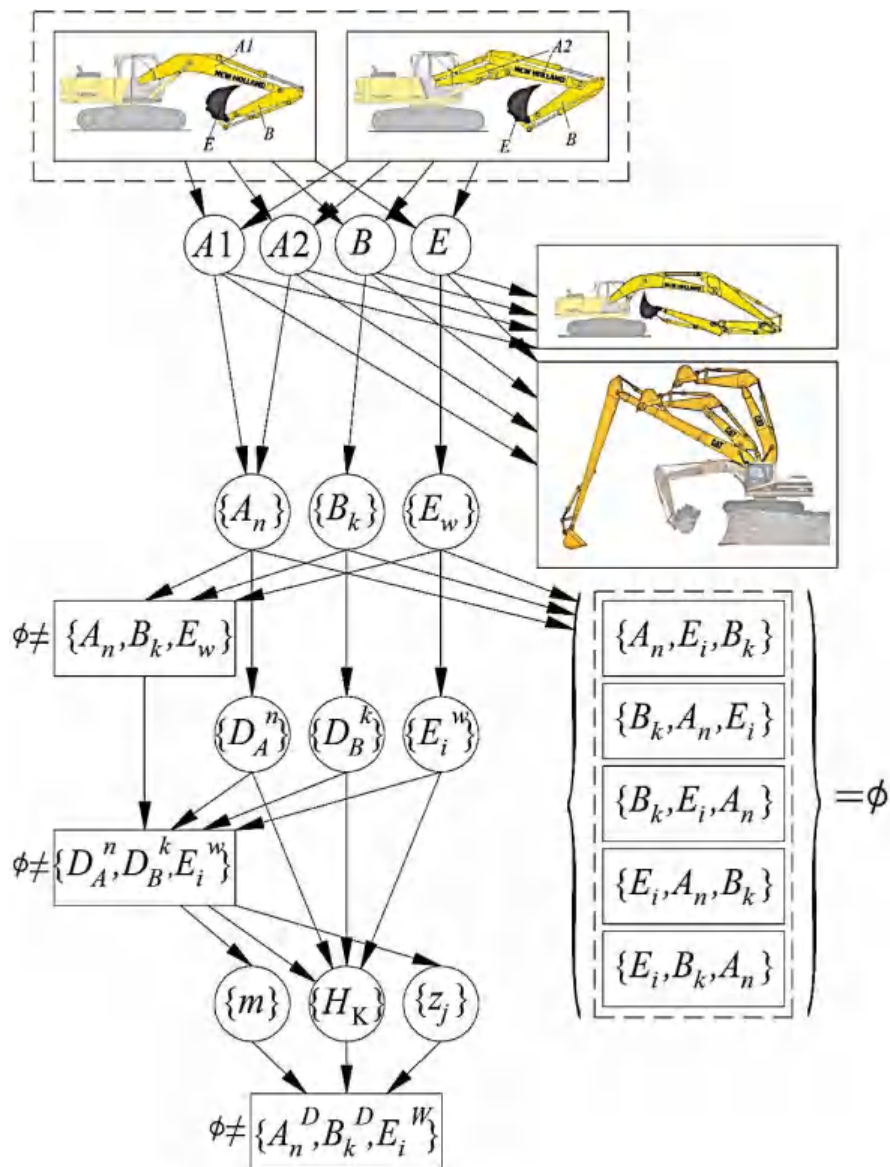


Рис. 2. Структурний гіперграф формування ТРО ОГЕ.

Компактна та впорядкована структура гіперграфу формування ТРО ОГЕ, показана на рисунку 2, дає підстави вважати рішенням деякий гіпершлях, який веде з

множини вершин $\{A1, A2, B, E\}$ в множину $\{\{m\}, \{H_k\}, \{z_j\}\}$, з наступним поєднанням у реалізовану структуру.

Позначимо через $in(\{A_n\})$, $in(\{B_k\})$, $in(\{E_w\})$ – відповідно входи дуг $\{A_n\}$, $\{B_k\}$, $\{E_w\}$, а через $out(\{A_n\})$, $out(\{B_k\})$, $out(\{E_w\})$ – виходи цих дуг. Будь яку множину гіпердуг будемо називати структурою та позначимо через c .

Коректною вважаємо структуру послідовності $\{A, B, E\}$. Позначимо $in(\{A, B, E\})$ – входи структури $\{A, B, E\}$, а через $out(\{A, B, E\})$ – її виходи.

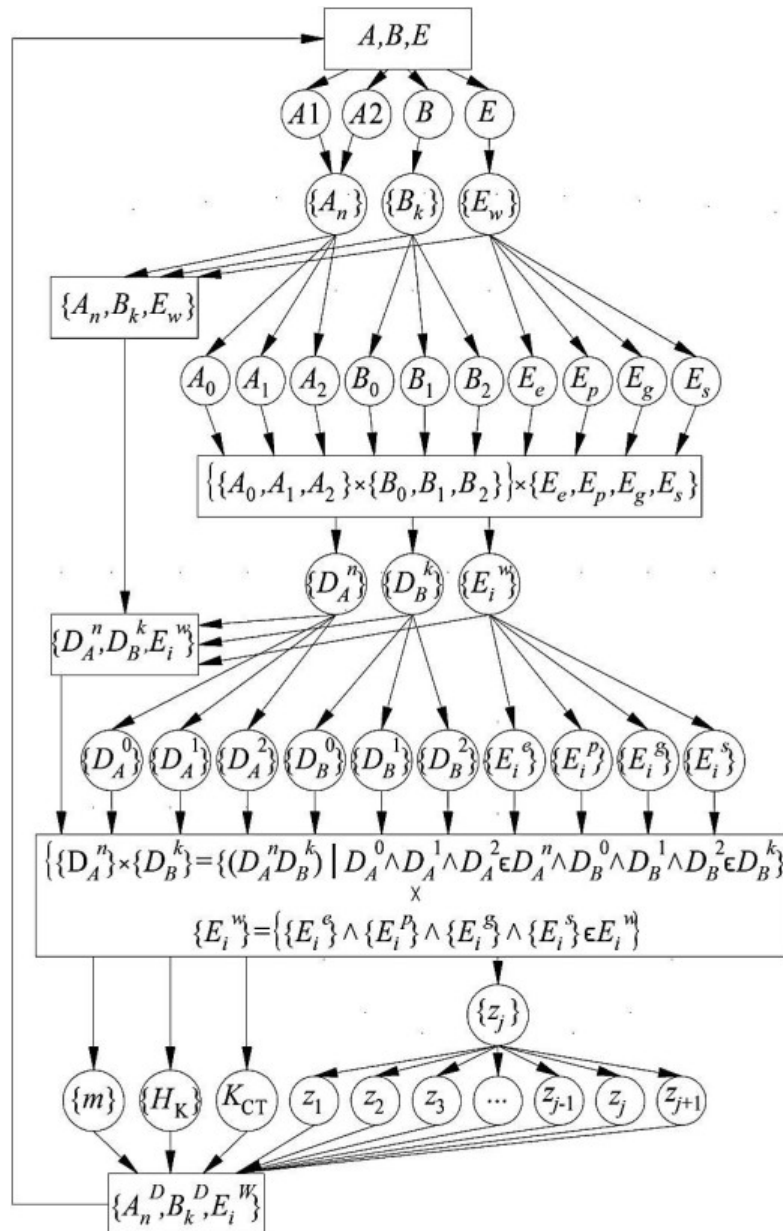


Рис. 3. Структурний граф комбінацій реалізованих рішень ТРО ОГЕ.

Вважаємо, що

$$out(\{A, B, E\}) = \bigcup_{(\{A_n\}, \{B_k\}, \{E_w\}) \in \{A, B, E\}} out(\{A_n\}, \{B_k\}, \{E_w\}), \quad (1)$$

тобто виходи структури – є поєднанням виходів всіх гіпердуг, які входять в неї.

Вважаємо, що

$$in(\{A, B, E\}) =$$

$$\bigcup_{(\{A_n\}, \{B_k\}, \{E_w\}) \in \{A, B, E\}} in(\{A_n\}, \{B_k\}, \{E_w\}) \setminus out(\{A, B, E\}), \quad (2)$$

тобто входами структури вважаються такі входи її елементів, котрі не є виходами цієї структури. Структуру будемо називати гіперциклом, якщо для неї виконується співвідношення:

$$in(c) = \emptyset, \quad (3)$$

тобто вона має пути множини входів. Гіперцикл називається не надлишковим, якщо

$$\forall (\{A_n\}, \{B_k\}, \{E_w\}) \in \{A, B, E\}, \text{in}(\{A, B, E\} \setminus (\{A_n\}, \{B_k\}, \{E_w\})) \neq \emptyset. \quad (4)$$

Рішенням задачі структурного синтезу є будь-який гіперцикл, який включає елемент z_1 – «зовнішнє середовище», який гарантує глобальність гіперциклу.

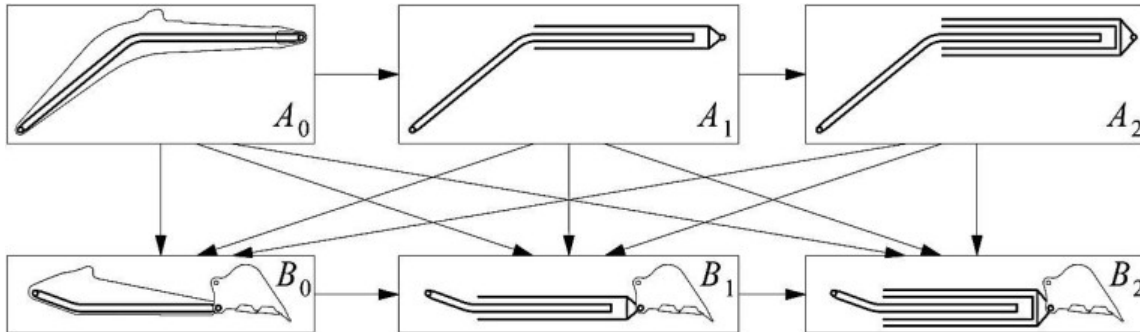


Рис. 4. Структурний граф комбінацій ТРО ОГЕ

Коректний синтез структури, утвореної поєднанням множин телескопічних систем стріли $\{A_n\}$ та рукояті $\{B_k\}$ (рис. 4) представимо у вигляді декартового добутку їх комбінацій $\{A_n\} \times \{B_k\} \Leftrightarrow \{A_0, A_1, A_2\} \times \{B_0, B_1, B_2\}$:

$$A \times B = \{(A_n B_k) | A_n \in A \wedge B_k \in B\}, \quad (5)$$

$$\{A_0, A_1, A_2\} \times \{B_0, B_1, B_2\} =$$

	B_0	B_1	B_2	
A_0	$A_0 B_0$	$A_0 B_1$	$A_0 B_2$	(6)
A_1	$A_1 B_0$	$A_1 B_1$	$A_1 B_2$	
A_2	$A_2 B_0$	$A_2 B_1$	$A_2 B_2$	

Різноманіття сполучень отриманих кінематичних схем представлено на рисунку 5.

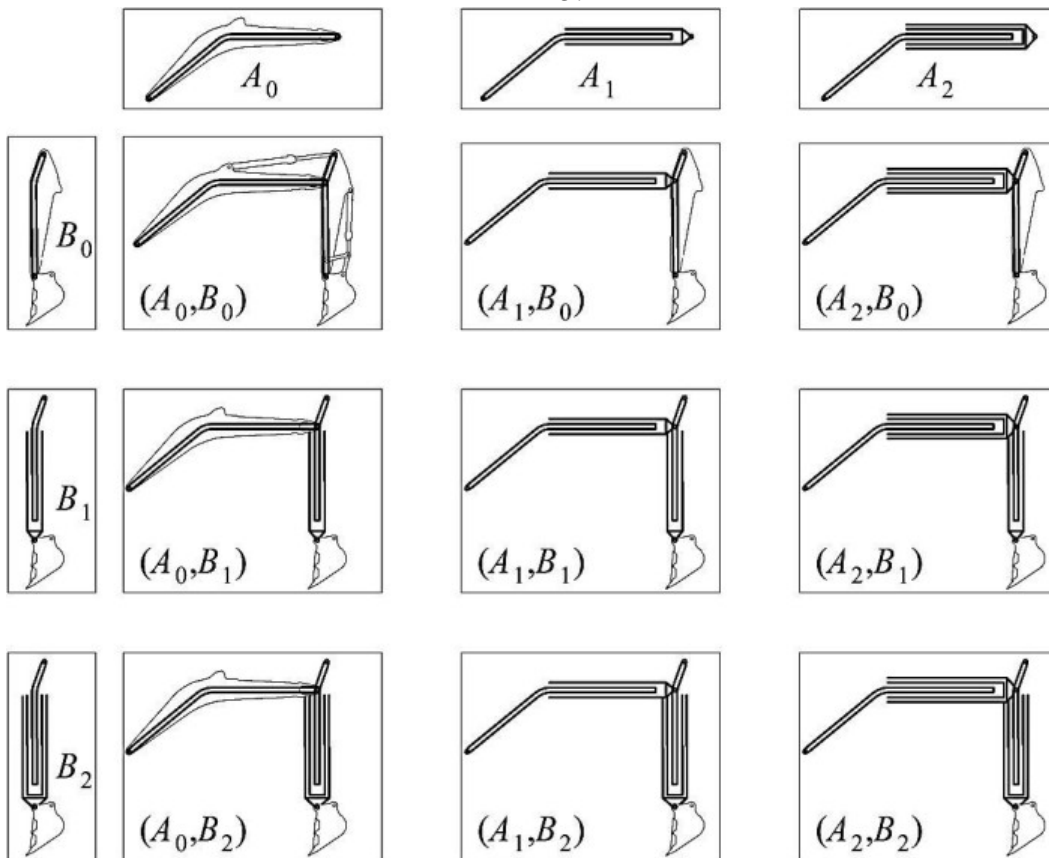


Рис. 5. Кінематичні схеми ТРО ОГЕ.

Представимо задачу структурного синтезу в формі дискретного математичного програмування [6].

Нехай існує ряд елементів робочого обладнання, а його узагальнена структура задана в виді орієнтованого гіперграфу. Позначимо через $Z = \{z_i, i = \overline{1, n}\}$ множини гіпердуг графу, а через $S = \{s_j\}$ – множини його вершин.

Для формалізації задачі введемо змінні:

$$1. z_i, i = \overline{1, n}$$

$$z_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо дуга входить в рішення;} \\ 0, \text{ в зворотньому випадку.} \end{cases}$$

2. $y_{ij}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, r_i}$, де y_{ij} – вихід елементу z_i під номером j , а r_i – загальна кількість виходів елементу z_i . Вважаємо, що:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j - \text{ий зв'язок ел. } z_i \text{ активовано;} \\ 0, & \text{в зворотньому випадку.} \end{cases}$$

3. $x_{ik}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, m_i}$, де x_{ik} – вхід елементу z_i під номером k , а m_i – загальна кількість входів елементу z_i . Вважаємо, що

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } k - \text{ий зв'язок ел. } z_i \text{ активовано;} \\ 0, \text{ в зворотньому випадку.} \end{cases}$$

Змінні z_i, y_{ij}, x_{ik} являють собою основні складові для формування системи обмежень для цільових функцій в задачі структурного синтезу.

Будь-яке рішення задачі структурного синтезу являє складатися з активованих дуг орієнтованого гіперграфу. Дуга є активованою тоді і тільки тоді, коли активовані всі її виходи. Запишемо цю умову в вигляді наступної системи рівнянь:

$$r_i z_i = \sum_{j=1}^{r_i} y_{ij}, i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Перевіримо, якщо $z_i = 0$, тоді усі змінні $y_{ij} = 0$, або якщо $z_i = 1$, то всі $y_{ij} = 1$.

Для активування елементу необхідно активувати усі його вхідні зв'язки. Це означає, що $z_i = 1$ тоді і тільки тоді, коли $x_{ik} = 1, k = \overline{1, m_i}$. Якщо $\exists x_{ik} = 0$, то $z_i = 0$. Для запису цієї умови в алгебраїчній формі введемо n допоміжних змінних $u_i \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, n}$. Розглянемо систему нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} - m_i \geq -m_i u_i; & (8.1) \\ z_i - 1 \geq -u_i; & (8.2) \\ \sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} \geq m_i z_i; & (8.3) \\ \sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} - m_i < 1 - u_i; & (8.4) \end{cases} \quad i = \overline{1, n}$$

Нехай $z_i = 1$, в цьому випадку підсистема (8.2) виконується тривіально при будь-яких значеннях u_i . Із (8.3) слідує, що $x_{ik} = 1, k = \overline{1, m_i}$. Підсистема (8.4) приймає вигляд $0 < 1 - u_i$, звідси виходить, що $u_i = 0, i = \overline{1, n}$ і підсистема (8.1) виконується автоматично.

Якщо $z_i = 0$, то (8.3) виконується автоматично для будь-яких значень аргументів в лівій частині. Підсистема (8.2) зводиться до вигляду $u_i \geq 1$, котрий має єдине рішення $u_i = 1, i = \overline{1, n}$. Підставимо ці значення в (8.1) та в (8.4). Перша підсистема прийме форму $\sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} \geq 0$, та виконується тривіально. Підсистема (8.4) перетвориться в $\sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} < m_i$, яка справедлива, якщо хоча б один з аргументів лівої частини дорівнює нулю.

Формалізуємо умову збуджуваності входів елементів узагальненої структури обладнання. Кожен активний вхід повинен бути забезпечений по крайній мірі одним активним виходом, який знято з іншого елементу гіперграфу. Для формалізації цієї умови усі змінні вигляду x_{ik} та y_{ij} впорядкуємо лексикографічно по значенням їх індексів. Після цієї операції змінна $x_{ik}(y_{ij})$ отримує новий одинарний індекс в лексикографічному впорядкуванні.

Позначимо через $M = \sum_{i=1}^n r_i$ та $K = \sum_{i=1}^n m_i$. Нехай задана прямокутна матриця $(0, 1)$ – матриця $P = \|p_{ij}\|$ розміру $K \times M$, в якій

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо вхід } x_i \text{ забезпечений виходом } y_j; \\ 0, \text{ в іншому випадку,} \end{cases}$$

де i та j – номери змінних x_i та y_j в новому лексикографічному впорядкуванні.

Систему нерівностей, які формалізують умову забезпеченості активованих входів, можна записати в наступному вигляді:

$$\sum_{j=1}^M p_{ij} \geq x_i, i = \overline{1, k}. \quad (9)$$

Якщо $x_i = 1$, то в цій сумі знайдеться хоча б один доданок виду 1×1 . Це значить, що існує активований вихід, який забезпечує вхід x_i . Якщо $x_i = 0$, то нерівність виконується автоматично.

Будь-яке вірне рішення задачі структурного синтезу ТРО повинно задовольняти поставленим технічним вимогам, таким як: відповідність вазі базової машини m , максимальній глибині копання H_K , машина повинна бути стійкою $K_{CT} > 1$, а також комплексу показників

критеріїв оптимізації (табл. 1) [7, 8, 9, 10]. Для цього включимо в рішення гіперграфу умовний елемент «зовнішнє середовище»:

$$z_1 = 1. \quad (10)$$

Система рівнянь (7) – (10) виражає фізичний сенс структурного синтезу по узагальненій структурі, зображеної у вигляді орієнтованого гіперграфу. Будь-яке рішення цієї системи являє собою допустимий варіант структури ТРО. Система є відкритою і допускає включення додаткових обмежень, які описують особливості прийняття технічного рішення в конкретній ситуації.

Усі залежності приведеної системи обмежень (7)-(10) є лінійними, а областю визначення змінних є множина $\{1,0\}$, таким чином, поставлена задача відноситься до задач лінійного булевого програмування.

Таблиця 1.

Система показників для оцінки ефективності ТРО ОГЕ

№ п/п	Показники	Розмірність	Загальна форма запису показників	Умови раціоналізації та оптимізації	Шифр в гіперграфі
1	2	3	4	5	6
1.	Експлуатаційна продуктивність на i -му виді робіт	$\frac{m^3}{год}$	Π_{e_i}	$\Pi_{e_i} \rightarrow max$	z_2
2.	Об'єм ґрунту, розроблюваного в періоді одного переміщення ОГЕ	m^3	$V_{тех.i}$	$V_{тех.i} \rightarrow max$	z_3
3.	Глибина копання	m	H_K	$H_K \rightarrow max$	z_4
4.	Радіус копання	m	R	$R \rightarrow max$	z_5
5.	Місткість ковша	m^3	q	$q \rightarrow max$	z_6
6.	Маса (сила тяжіння) ОГЕ	кг (кН)	G	$G \rightarrow min$	z_7
7.	Потужність ОГЕ	кВт	N	$N \rightarrow min$	z_8
8.	Час циклу, робочих операцій та переміщення	c	$t_{ц}, t_{орк}, t_{пер.}$	$t_{ц} \rightarrow min$ $t_{пер.} \rightarrow min$ $t_{орк} \rightarrow min$	z_9 z_{10} z_{11}
9.	Енергоємність	$\frac{кВт}{m^3/год.}$	$N_{ПТ} = \frac{N}{\Pi_{e_i}}$	$N_{ПТ} \rightarrow min$	z_{12}
10.	Матеріалоємність	$\frac{кг}{m^3/год.}$	$G_{ПТ} = \frac{G}{\Pi_{e_i}}$	$G_{ПТ} \rightarrow min$	z_{13}
11.	Узагальнений показник енергоємності та матеріалоємності,	$\frac{кВт \cdot кН}{(m^3/год.)^2}$	$\Pi_{NG} = \frac{NG}{\Pi_{e_i}^2}$	$\Pi_{NG} \rightarrow min$	z_{14}
12.	Показник оцінки енергоємності глибини копання	$\frac{кВт}{m}$	$H_N = \frac{N}{H_K}$	$H_N \rightarrow min$	z_{15}
13.	Показник оцінки матеріалоємності глибини копання	$\frac{кг}{m}$	$H_G = \frac{G}{H_K}$	$H_G \rightarrow min$	z_{16}

продовження таблиці 1.

1	2	3	4	5	6
14.	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності глибини копання	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2}$	$H_{NG} = \frac{NG}{H_k^2}$	$H_{NG} \rightarrow \min$	Z_{17}
15.	Показник енергоємності по радіусу копання	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}}$	$R_N = \frac{N}{R}$	$R_N \rightarrow \min$	Z_{18}
16.	Показник матеріалоємності по радіусу копання	$\frac{\text{кг}}{\text{м}}$	$R_G = \frac{G}{R}$	$R_G \rightarrow \min$	Z_{19}
17.	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по радіусу копання	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2}$	$R_{NG} = \frac{NG}{R^2}$	$R_{NG} \rightarrow \min$	Z_{20}
18.	Питома продуктивність по масі ОГЕ	$\frac{(\text{м}^3/\text{ГОД})}{\text{кг}}$	$\Pi_{\text{ПТГ}} = \frac{\Pi_{ei}}{G}$	$\Pi_{\text{ПТГ}} \rightarrow \max$	Z_{21}
19.	Питома продуктивність по потужності ОГЕ	$\frac{(\text{м}^3/\text{ГОД})}{\text{кВт}}$	$\Pi_{\text{ПТН}} = \frac{\Pi_{ei}}{N}$	$\Pi_{\text{ПТН}} \rightarrow \max$	Z_{22}
20.	Показник енергоємності по місткості ковша	$\frac{\text{кВт}}{\text{м}^3}$	$q_N = \frac{N}{q}$	$q_N \rightarrow \min$	Z_{23}
21.	Показник матеріалоємності по місткості ковша	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$q_G = \frac{G}{q}$	$q_G \rightarrow \min$	Z_{24}
22.	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по місткості ковша	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{кг}}{\text{м}^6}$	$q_{NG} = \frac{NG}{q^2}$	$q_{NG} \rightarrow \min$	Z_{25}
23.	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по глибині копання та місткості ковша	$\frac{\text{кВт}^2 \cdot \text{кг}^2}{\text{м}^8}$	$H_{NGq} = \frac{N^2 G^2}{H_k^2 q^2}$	$H_{NGq} \rightarrow \min$	Z_{26}
24.	Узагальнений показник економії енергоємності та матеріалоємності по радіусу копання та місткості ковша	$\frac{\text{кВт}^2 \cdot \text{кг}^2}{\text{м}^8}$	$q_{NG\Delta R} = \frac{N^2 G^2}{R^2 q^2}$	$q_{NGR} \rightarrow \min$	Z_{27}
25.	Виробіток на одного робітника	$\frac{(\text{м}^3/\text{ГОД})}{w}$	$w_{\text{ПТ}} = \frac{\Pi_{ei}}{w}$	$w_{\text{ПТ}} \rightarrow \max$	Z_{28}
26.	Узагальнений показник енергоємності, матеріалоємності та виробітку на одного робітника	$\frac{\text{кВт} \cdot \text{кг} \cdot w}{(\text{м}^3/\text{ГОД})^3}$	$\Pi_{NGw} = \frac{NGw}{\Pi_{ei}^3}$	$\Pi_{NGw} \rightarrow \min$	Z_{29}

Описана комбінаторна-логічна модель дозволяє отримувати нові рішення за рахунок коректного поєднання елементів, які належать реалізованим рішенням.

Користуючись методами комбінаторики, теорії множин та структурного синтезу визначаємо загальну кількість можливих технологічних схем, перемінними факторами в яких буде кількість задіяних для роботи приводів в телескопічних системах рукояті та стріли.

Нехай об'єкти A і B являють собою сукупність телескопічних елементів n і k , а число технологічних схем визначатиметься кількістю задіяних приводів z елементів n і k , в об'єктах A і B , тоді кількість варіативних комбінацій роботи ТРО ОГЕ дорівнюватиме:

$$A_n B_k \rightarrow \{A_0 \vee \{A_1^z\} \vee \{A_2^z\}\} \times \{B_0 \vee \{B_1^z\} \vee \{B_2^z\}\}, \quad (11)$$

де A_0 – стріла ОГЕ традиційної конструкції;

$\{A_1^0, A_1^1\} \in A_1^z$ – варіації технологічних схем двосекційної телескопічної стріли ОГЕ;

$\{A_2^0, A_2^1, A_2^{1'}, A_2^2\} \in A_2^z$ – варіації технологічних схем трисекційної телескопічної стріли ОГЕ;

B_0 – рукоять ОГЕ традиційної конструкції;

$\{B_1^0, B_1^1\} \in B_1^z$ – варіації технологічних схем двосекційної телескопічної рукояті ОГЕ;

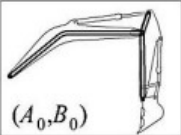
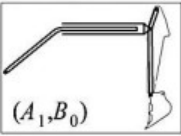
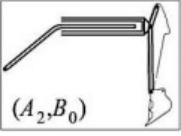
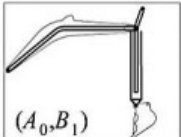
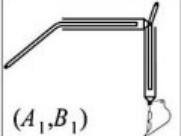
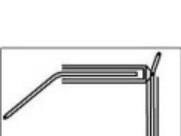
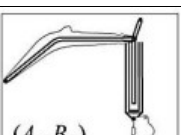
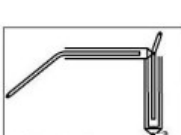
$\{B_2^0, B_2^1, B_2^{1'}, B_2^2\} \in B_2^z$ – варіації технологічних схем трисекційної телескопічної рукояті ОГЕ.

Варіації реалізованих технологічних схем ТРО ОГЕ зображених на рисунку 5 представлено у таблиці 2. Отримані структури із традиційних та телескопічних елементів включають усі можливі

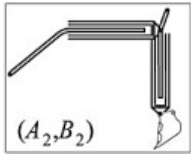
комбінації та варіації технологічних схем. Описана комбінаторна-логічна модель дозволяє отримувати нові рішення за рахунок коректного поєднання елементів, які належать реалізованим рішенням.

Таблиця 2.

Варіації технологічних схем ТРО ОГЕ

Кінематична схема $A \times B = \{(A_n B_k) A_n \in A \wedge B_k \in B\}$	Число 47ел.. Ланок та їх приводів			Структурна формула $(A_n B_k) = \{A_n\} \times \{B_k\}$	Варіації технологічних схем $\{A_n^z B_k^z\} = \{A_n^z\} \times \{B_k^z\}$	
	n	k	z		С	формула
1	2	3	4	5	6	7
	0	0	0	$(A_0 B_0) = A_0 \times B_0$	1	$A_0^z B_0^z = A_0 \times B_0$
	1	0	1	$(A_1 B_0) = \{A_1\} \times B_0$	2	$A_1^z B_0^z = A_1^0 \times B_0$ $A_1^z B_0^z = A_1^1 \times B_0$
	2	0	2	$(A_2 B_0) = \{A_2\} \times B_0$	4	$A_2^z B_0^z = A_2^0 \times B_0$ $A_2^z B_0^z = A_2^1 \times B_0$ $A_2^z B_0^z = A_2^{1'} \times B_0$ $A_2^z B_0^z = A_2^2 \times B_0$
	0	1	1	$(A_0 B_1) = A_0 \times \{B_1\}$	2	$A_0^z B_1^z = A_0 \times B_1^0$ $A_0^z B_1^z = A_0 \times B_1^1$
	1	1	2	$(A_1 B_1) = \{A_1\} \times \{B_1\}$	4	$A_1^z B_1^z = A_1^0 \times B_1^0$ $A_1^z B_1^z = A_1^1 \times B_1^0$ $A_1^z B_1^z = A_1^0 \times B_1^1$ $A_1^z B_1^z = A_1^1 \times B_1^1$
	2	1	3	$(A_2 B_1) = \{A_2\} \times \{B_1\}$	8	$A_2^z B_1^z = A_2^0 \times B_1^0$ $A_2^z B_1^z = A_2^1 \times B_1^0$ $A_2^z B_1^z = A_2^{1'} \times B_1^0$ $A_2^z B_1^z = A_2^2 \times B_1^0$ $A_2^z B_1^z = A_2^0 \times B_1^1$ $A_2^z B_1^z = A_2^1 \times B_1^1$ $A_2^z B_1^z = A_2^{1'} \times B_1^1$ $A_2^z B_1^z = A_2^2 \times B_1^1$
	0	2	2	$(A_0 B_2) = A_0 \times \{B_2\}$	4	$A_0 B_2^z = A_0 \times B_2^0$ $A_0 B_2^z = A_0 \times B_2^1$ $A_0 B_2^z = A_0 \times B_2^{1'}$ $A_0 B_2^z = A_0 \times B_2^2$
	1	2	3	$(A_1 B_2) = \{A_1\} \times \{B_2\}$	8	$A_1^z B_2^z = A_1^0 \times B_2^0$ $A_1^z B_2^z = A_1^1 \times B_2^0$ $A_1^z B_2^z = A_1^0 \times B_2^1$ $A_1^z B_2^z = A_1^1 \times B_2^1$ $A_1^z B_2^z = A_1^0 \times B_2^{1'}$ $A_1^z B_2^z = A_1^1 \times B_2^{1'}$ $A_1^z B_2^z = A_1^0 \times B_2^2$ $A_1^z B_2^z = A_1^1 \times B_2^2$

продовження таблиці 2.

1	2	3	4	5	6	7
	2	2	4	$(A_2B_2) = \{A_2\} \times \{B_2\}$	16	$A_2^z B_2^z = A_2^0 \times B_2^0$ $A_2^z B_2^z = A_2^0 \times B_2^1$ $A_2^z B_2^z = A_2^0 \times B_2^{1'}$ $A_2^z B_2^z = A_2^0 \times B_2^2$ $A_2^z B_2^z = A_2^1 \times B_2^0$ $A_2^z B_2^z = A_2^1 \times B_2^1$ $A_2^z B_2^z = A_2^1 \times B_2^{1'}$ $A_2^z B_2^z = A_2^1 \times B_2^2$ $A_2^z B_2^z = A_2^{1'} \times B_2^0$ $A_2^z B_2^z = A_2^{1'} \times B_2^1$ $A_2^z B_2^z = A_2^{1'} \times B_2^{1'}$ $A_2^z B_2^z = A_2^{1'} \times B_2^2$ $A_2^z B_2^z = A_2^2 \times B_2^0$ $A_2^z B_2^z = A_2^2 \times B_2^1$ $A_2^z B_2^z = A_2^2 \times B_2^{1'}$ $A_2^z B_2^z = A_2^2 \times B_2^2$

Висновок. Запропоновано метод формування робочого обладнання одноковшового екскаватора зі змінними геометричними параметрами, в якому зміна параметрів відбувається за рахунок застосування телескопічних механізмів дозволяє отримувати коректні поєднання складових елементів у нові структури РО. Представлено спосіб зведення проблеми

структурного синтезу до задачі лінійного дискретного програмування. Застосування методів структурного синтезу, гіперграфів та теорії множин дозволяє виключити фізично неможливі комбінації. Отримані структури з традиційних та телескопічних елементів включають всі можливі комбінації як кінематичних так і технологічних схем.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баловнев В. И., Хмара Л. А. Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1983. – 184 с.
2. Беляков Ю. И., Левинзон А. Л., Галимуллин В. А. Земляные работы, 2-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Стройиздат, 1990, 281с.
3. Божко А. Н. Структурный синтез как задача дискретной оптимизации. Электронное издательство «Наука и образование». – М.: ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н. Э. Баумана", 2010. №9. – С. 25-46.
4. Гаркави Н. Г. Машины для земляных работ / Гаркави Н. Г. // – М.: Высш. шк. 1982. – 335с.
5. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход. Пер. с польск. – М.: Мир, 1981. – 456 с.
6. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптрика). Пер. с англ. – М.: Наука, 1972. – 544 с.
7. Хмара Л. А., Кравець С.В., Скоблюк М. П., та ін. Машины для земляных работ: підручник. – Х.: ХНАДУ, 2014 – 548 с.
8. Хмара Л. А., Дахно О. А. Теоретические основы формирования телескопического рабочего оборудования одноковшового гидравлического экскаватора. Строительные и дорожные машины. – М.: ооо «СДМ-Пресс», 2015. №12. – С. 44-50.
9. Хмара Л. А., Дахно О. А. Телескопическое рабочее оборудование гидравлического экскаватора и оценка его эффективности. Строительные и дорожные машины. – М.: ооо «СДМ-Пресс», 2013. №11. – С. 8-11.
10. Хмара Л. А., Дахно О. О. Оцінка ефективності телескопічного робочого обладнання одноковшового екскаватора та визначення продуктивності. Вестник ХНАДУ. – Х.: ХНАДУ, 2014. №65-66. – С. 263-272.
11. Хмара Л. А., Дахно О. О., Романовський О. Л. Тенденції розвитку робочого обладнання гідравлічних екскаваторів зі змінними геометричними параметрами. Вісник НУВГтП. – Рівне: НУВГтП, 2015. №2 (70). – С. 433-448.

REFERENCES

1. Balovnev V. I., Khmara L. A. *Intensifikatsiya zemlyanyih rabot v dorozhnom stroitelstve* [Intensification of earthworks in road construction]. – М.: Transport, 1983. – 184 p.

2. Belyakov Yu. I., Levinzon A. L., Galimullin V. A. *Zemlyanye raboty, 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe* [Earthwork, 2nd edition, revised and enlarged]. – M.: Stroyizdat, 1990, 281 p.
3. Bozhko A. N. *Strukturnyy sintez kak zadacha diskretnoy optimizatsii* [Structural synthesis as a discrete optimization problem.]. Elektronnoe izdatelstvo «Nauka i obrazovanie» [Electronic publishing "Science and Education"]. – M.: FGBOU VPO "MGTU im. N. E. Baubana", 2010. #9. – P. 25-46.
4. Garkavi N. G. *Mashiny dlya zemlyanykh rabot* [Machines for earthworks] / Garkavi N. G. // – M.: Vyssh. shk. 1982. – 335 p.
5. Ditrh Ya. *Proektirovanie i konstruirovaniye. Sistemyy podhod. Per. s polsk.* [Engineering and designing. Systems approach. Trans. from Polish.] – M.: Mir, 1981. – 456 p.
6. Kron G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam (diakoptika). Per. s angl.* [Investigation difficult systems in parts (Diakoptics). Trans. from English] – M.: Nauka, 1972. – 544 p.
7. Khmara L. A., Kravets' S.V., Skoblyuk M. P., ta in. *Mashyny dlya zemlyanykh robit: pidruchnyk* [Machines for earthworks: manual]. – Kh.: KhNADU, 2014 – 548 p.
8. Khmara L. A., Dakhno O. A. *Teoreticheskie osnovy formirovaniya teleskopicheskogo rabocheho oborudovaniya odnokovshovogo gidravlicheskogo ekskavatora.* [Theoretical bases of formation of a telescopic working equipment of hydraulic excavator]. Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny [Building and road machines]. – M.: Ltd. «SDM-Press», 2015. #12. – P. 44-50.
9. Khmara L. A., Dakhno O. A. *Teleskopicheskoe rabochee oborudovanie gidravlicheskogo ekskavatora i otsenka ego effektivnosti* [The telescopic working equipment of hydraulic excavator and evaluation of its effectiveness]. Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny [Building and road machines]. – M.: Ltd. «SDM-Press», 2013. #11. – P. 8-11.
10. Khmara L. A., Dakhno O. O. *Otsinka efektyvnosti teleskopichnoho robochoho obladdannya odnokivshevoho ekskavatora ta vyznachennya produktyvnosti* [Evaluating the effectiveness of telescopic working equipment of excavator and definition performance]. Vestnyk KhNADU. – Kh.: KhNADU, 2014. #65-66. – P. 263-272.
11. Khmara L. A., Dakhno O. O., Romanovs'kyi O. L. *Tendentsiyi rozvytku robochoho obladdannya hidravlichnykh ekskavatoriv zi zminnyimi heometrychnymi parametramy* [Tendencies of Development of hydraulic excavator working equipment with variable geometric parameters]. Visnyk NUVHtP. – Rivne: NUVHtP, 2015. №2 (70). – P. 433-448.