

Міністерство освіти і науки України

Вінницький національний технічний університет

Кафедра галузевого машинобудування

Магістерська кваліфікаційна робота на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ  
КОЛИВАНЬ СТІЛОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ З  
УСТАНОВЛЕНИМ НА НІЙ  
СТРІЧКОВИМ КОНВЕЄРОМ

Виконав: ст. гр. 1ГМ-18м Нечипорук А. М.

Науковий керівник: д.т.н., проф. Поліщук Л. К.

**Метою роботи** є підвищення довговічності стрілової конструкції з улаштованим на ній стрічковим конвеєром за рахунок уникнення резонансних явищ на основі визначення параметрів її вільних коливань.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- проаналізувати існуючі стрілові конструкції мобільних машин з улаштованими на них стрічковиз конвеєрів та виділенням характерних ознак;
- проаналізувати методи розрахунків динамічних процесів у стрілових конструкціях конвеєрів;
- удосконалити математичну модель вільних коливань конструкції стріли стрічкового конвеєра;
- виконати теоретичні дослідження вільних коливань стрілової конструкції з улаштованим на ній стрічковим конвеєром та проаналізувати вплив параметрів стріли і конвеєра на амплітудно-частотні характеристики;
- провести кінематичні та розрахунки на міцність елементів привода стрічкового конвеєра, що улаштований на стріловій конструкції мобільної машини;
- розробити складальне креслення приводу стрічкового конвеєра мобільної машини;
- визначити економічні показники розробки, для підтвердження доцільності впровадження у виробництво розробленої конструкції;
- розробити заходи щодо забезпечення охорони праці та цивільного захисту під час експлуатації розробленого обладнання.

**Об'єкт дослідження** – динамічні процеси в стрижневих конструкціях.

**Предмет дослідження** – метод аналізу вільних коливань в стріловій конструкції мобільної машини.

**Методи дослідження:** Порівняльний аналіз стрілових конструкцій та економічних показників з метою виділення характерних ознак та доцільності проведення досліджень. Математичне моделювання стрілової конструкції стрічкового конвеєра проведено з використанням методів динаміки механічних систем з розподіленими параметрами. Застосовано технічну теорію згину з використанням некласичної теорії балок Тимошенка. Розрахунки на ПК вільних коливань стрижневої моделі стріли виконано матричним методом початкових параметрів.

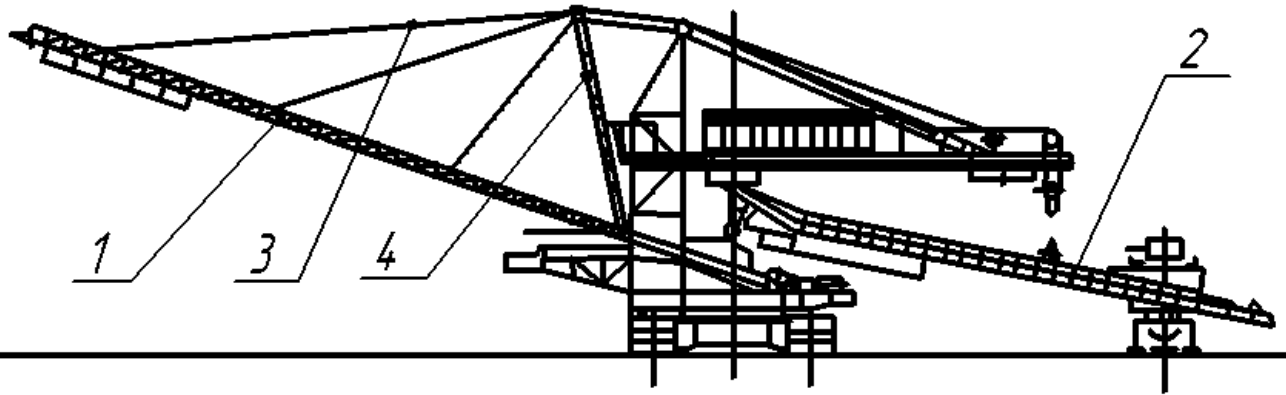
**Наукова новизна отриманих результатів та їх значення:**

- поглиблено наукові основи розрахунку вільних коливань за рахунок узагальнення математичної моделі для суцільної стрілової конструкції за умови рівномірного чи нерівномірного розподілу маси по довжині та різних жорсткостей елементів конструкції;
- удосконалено математичну модель вільних коливань стрижневих систем.

**Особистий внесок автора** Запропонував застосувати метод початкових параметрів для визначення амплітуд та частот вільних коливань, провів узагальнення результатів теоретичних досліджень запропонував рекомендації щодо уникнення резонансних явищ стрілової конструкції. Запропонував встановити як гальмівний пристрій в приводі конвеєра муфту вільного ходу. Провів проектні розрахунки та розрахунки на міцність елементів приводу.

**Публікації** – тези доповідей на регіональну науково-практичну Інтернет-конференцію студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2019), м. Вінниця (2019)

# Аналіз існуючих стрілових конструкцій



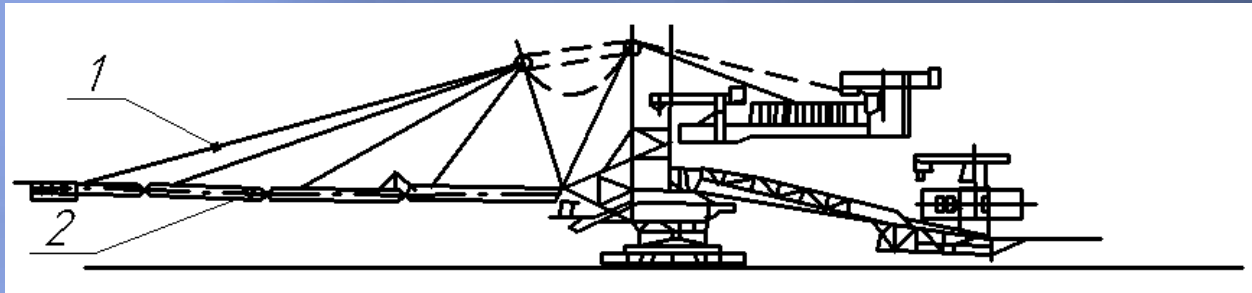
Відвалоутворювач  
ОГ-7000/85

Технічна характеристика відвалоутворювача ОГ-7000/85

Параметри, одиниці вимірювання	Значення
1	2
Продуктивність: – об'ємна, м <sup>3</sup> /год; – вагова, т/год	5000...8000 6450...10000
Радіус розвантаження, м	85
Висота розвантаження, м	27
Кут повороту машини, градус	360
Ширина конвеєрних стрічок, мм	2000
Швидкість конвеєрних стрічок, м/с	4,5
Транспортна швидкість машини, м/год	130
Питомий тиск на ґрунт, середній не більше, МПа	0,12
Встановлена потужність, кВт	2000
Підведена напруга, кВ	6...10
Середня споживана потужність, кВт	1600
Маса конструктивна, т	1350

# Аналіз існуючих стрілових конструкцій

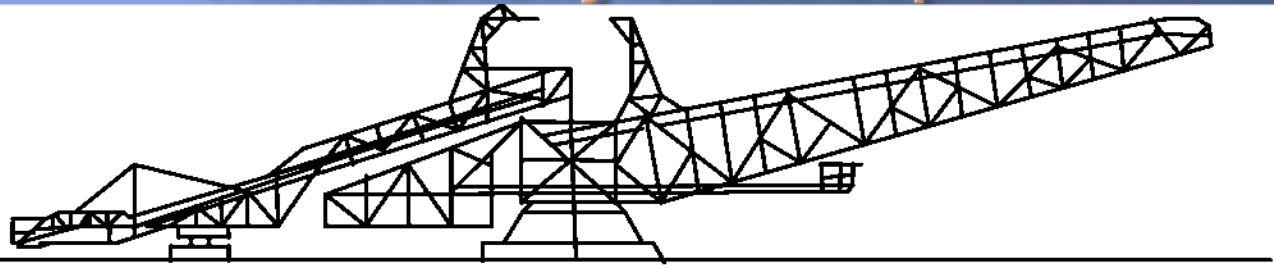
Відвалоутворювач ЗД 2500



Технічна характеристика відвалоутворювача ЗД 2500

Параметри, одиниці вимірювання	Значення
Теоретична потужність, м <sup>3</sup> /год	2500
Довжина стріли, м	76
Довжина приймального мосту, м	38
Швидкість стрічки стріли, м/с	5
Швидкість стрічки приймального мосту, м/с	4
Ширина стрічки стріли, мм	1400
Ширина стрічки приймального мосту, мм	1400
Максимальна висота складування, м	24
Діапазон кута повороту, град	±115
Тип візка	Колійний
Ширина колій, м	1,435
Колісна база порталу, м	10
Максимальний нахил основи – транспортний/робочий	1:40
Тиск на колесо, кН	104
Підведена напруга, кВ	6
Споживана потужність, кВт	1050
Повна маса, т	1075

# Аналіз існуючих стрілових конструкцій

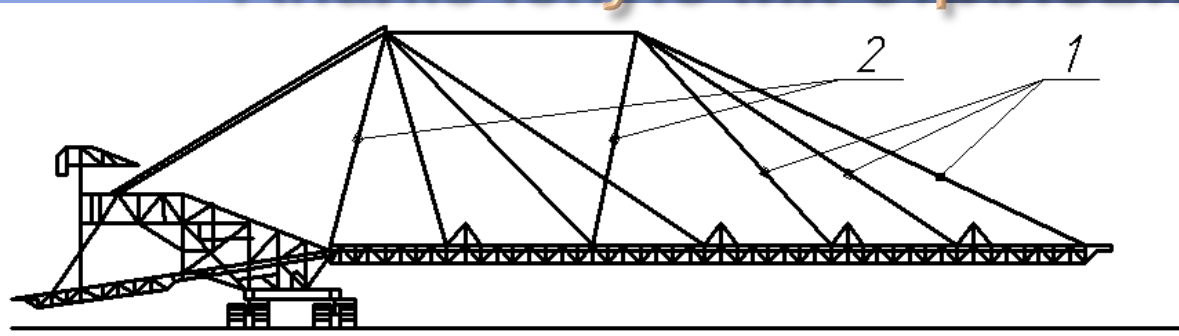


Відвалоутворювач ЗП 3500

Технічна характеристика відвалоутворювача ЗП 3500

Параметри, одиниці вимірювання	Значення
1	2
Теоретична потужність, м <sup>3</sup> /год	3500
Довжина стріли, м	56
Довжина приймального мосту, м	46
Швидкість стрічки стріли, м/с	5,8
Швидкість стрічки приймального мосту, м/с	4,85
Ширина стрічки стріли, мм	1400
Ширина стрічки приймального мосту, мм	1400
Максимальна висота складування, м	18
Діапазон кута повороту, °	±120
Тип візка	Крокуючий
Максимальний нахил основи - транспортний/робочий	1:20/1:25
Питомий тиск на основу, МПа	0,07
Підведена напруга, кВ	6
Споживана потужність, кВт	1100
Повна маса, т	634

# Аналіз існуючих стрілових конструкцій



Відвалоутворювач ЗПГП  
4200

Технічна характеристика відвалоутворювача ЗПГП 4200

Параметри, одиниці вимірювання	Значення
Теоретична потужність, м <sup>3</sup> /год	4200
Довжина стріли, м	200
Довжина приймального мосту, м	72
Швидкість стрічки стріли, м/с	8,7
Швидкість стрічки приймаючого мосту, м/с	–
Ширина стрічки стріли, мм	1400
Ширина стрічки приймаючого мосту, мм	1400
Максимальна висота складування, м	50
Діапазон кута повороту, град	–
Тип візка	Гусеничний
Максимальний нахил основи – транспортний/робочий	1:20
Питомий тиск на основу, МПа	0,12
Підведена напруга, кВ	35
Споживана потужність, кВт	2700
Повна маса, т	3300

# Математична модель вільних коливань багатопрогонової стріли відвалоутворювача

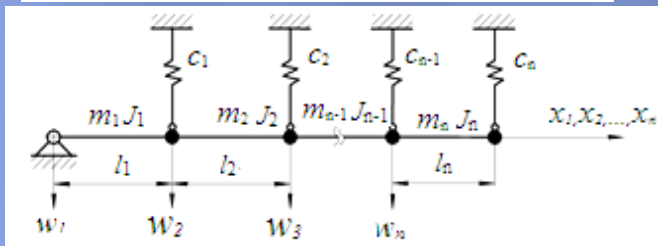
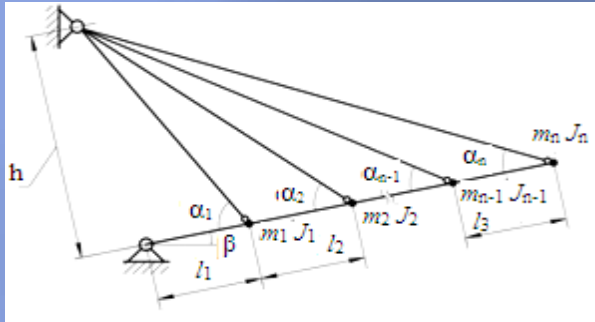


Схема стріли відвалоутворювача (а) та її розрахункова модель (б)

Беручи до уваги, що довжини ділянок стріли невеликі, рівняння руху записуємо з урахуванням деформацій зсуву та інерції обертання поперечних перерізів

$$\begin{aligned} EI_i \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial x_i^2} + \kappa_i GA_i \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_i} - \varphi_i \right) - I_i \rho_i \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} &= 0; \\ \rho_i A_i \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} - \kappa_i GA_i \left( \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i^2} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_i} \right) + P_i \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i^2} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$(i = 1, 2, \dots, n).$

Виключаючи з рівнянь (1) невідому функцію  $\varphi_i(x_i, t)$ , отримуємо

$$\begin{aligned} EI_i \left( 1 - \frac{P_i}{\kappa_i GA_i} \right) \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^4} - \rho_i I_i \left( 1 + \frac{E}{\kappa_i G} - \frac{P_i}{\kappa_i GA_i} \right) \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^2 \partial t^2} + \\ + P_i \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i^2} + \rho_i A_i \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} + \frac{\rho_i^2 I_i}{\kappa_i G} \frac{\partial^4 w_i}{\partial t^4} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Згинальний момент та силу з урахуванням деформацій згину і зсуву записуємо як

$$\begin{aligned} M_i &= -EI_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial x}; \\ F_i &= \kappa_i GA_i \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_i} - \varphi_i \right) - P_i \frac{\partial w_i}{\partial x_i}. \end{aligned} \quad (3)$$

Граничні умови на лівому кінці стріли мають вигляд

$$W_1(0, t) = 0; \quad M_1(0, t) = 0. \quad (4)$$

Граничні умови для стиків сусідніх ділянок запишемо в узагальненій формі

$$\begin{aligned} M_i(l_i, t) - J_i \frac{\partial^2 \varphi_i(l_i, t)}{\partial t^2} - M_{i+1}(0, t) &= 0; \quad F_i(l_i, t) + m_i \frac{\partial^2 w_i(l_i, t)}{\partial t^2} + c_i w_i(l_i, t) - F_{i+1}(0, t) &= 0; \\ w_i(l_i, t) &= w_{i+1}(0, t), \quad \varphi_i(l_i, t) = \varphi_{i+1}(0, t) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1). \end{aligned} \quad (5)$$

Аналогічно записуємо граничні умови для правого кінця стріли

$$M_n(l_n, t) - J_n \frac{\partial^2 \varphi_n(l_n, t)}{\partial t^2} = 0; \quad F_n(l_n, t) + m_n \frac{\partial^2 w_n(l_n, t)}{\partial t^2} + c_n w_n(l_n, t) = 0 \quad (6)$$

Розв'язки рівнянь (1) подаємо у вигляді

$$w_i(x_i, t) = W_i(x_i) \sin \omega t; \quad \varphi_i(x_i, t) = \Phi_i(x_i) \sin \omega t, \quad (7)$$

Після підстановки виразів (7) до рівностей (3) останні залежності набувають вигляду

$$M_i(x_i, t) = M_i^*(x_i) \sin \omega t, \quad F_i(x_i, t) = F_i^*(x_i) \sin \omega t. \quad (8)$$

Підставляючи першу залежність (7) до рівності (2), отримуємо звичайне диференціальне рівняння амплітудних функцій

$$\frac{d^4 W_i}{dx_i^4} + b_i^2 \frac{d^2 W_i}{dx_i^2} - a_i^4 W_i = 0. \quad (9)$$

Розв'язок рівняння (10) подаємо відповідно до методу початкових параметрів у вигляді

$$X_i(x_i) = R_i(x_i) X_i(0), \quad X_i(x_i) = \text{col} [W_i(x_i), W_i'(x_i), W_i''(x_i), W_i'''(x_i)]; \quad (10)$$

$$R_i(x_i) = \begin{pmatrix} Z_{1i} & Z_{2i} & Z_{3i} & Z_{4i} \\ Z'_{1i} & Z'_{2i} & Z'_{3i} & Z'_{4i} \\ Z''_{1i} & Z''_{2i} & Z''_{3i} & Z''_{4i} \\ Z'''_{1i} & Z'''_{2i} & Z'''_{3i} & Z'''_{4i} \end{pmatrix}.$$



# Математична модель вільних коливань багатопрогонової стріли відвалоутворювача та параметри конструкції стріл

$Z_{1i}, Z_{2i}, Z_{3i}, Z_{4i}$  – фундаментальна система інтегралів рівняння

Параметри механічної системи чотирьохпрогонової стріли

$$Z_{1i} = \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} (\lambda_{2i}^2 \cos \lambda_{1i} x_i + \lambda_{1i}^2 ch \lambda_{2i} x_i); \quad (11)$$

$$Z_{2i} = \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} \left( \frac{\lambda_{2i}^2}{\lambda_{1i}} \sin \lambda_{1i} x_i + \frac{\lambda_{1i}^2}{\lambda_{2i}} sh \lambda_{2i} x_i \right);$$

$$Z_{3i} = \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} (-\cos \lambda_{1i} x_i + ch \lambda_{2i} x_i);$$

$$Z_{4i} = \frac{1}{\lambda_{1i}^2 + \lambda_{2i}^2} \left( -\frac{1}{\lambda_{1i}} \sin \lambda_{1i} x_i + \frac{1}{\lambda_{2i}} sh \lambda_{2i} x_i \right);$$

Приймаючи до уваги залежність (10), отримуємо співвідношення, що дає можливість визначити силові та геометричні параметри довільного перерізу стрижня за значеннями цих параметрів на початку ділянки

$$Y_i(x_i) = B_{1i} R_i(x_i) B_{2i} Y_i(0). \quad (12)$$

Після розділення змінних у граничних умовах (4)–(6) з урахуванням залежностей (7) і (8) записуємо матричні співвідношення

$$Y_{i+1}(0) = S_i Y_i(I_i); (i = 1, 2, \dots, n-1); Y_{n+1}(0) = S_n Y_n(I_n). \quad (13)$$

Ураховуючи залежності (12), (13), записуємо матричне співвідношення

$$Y_{n+1} = \left( \prod_{i=n}^1 S_i B_{1i} R_i B_{2i} \right) Y_1(0), \quad (14)$$

причому, як впливає з граничних умов

$$Y_1(0) = \text{col}(0, \Phi_i(0), 0, F_i^*(0)). \quad (15)$$

Параметр	Од-ця виміру	Числове значення	Параметр	Одиниця виміру	Числове значення
n	–	4	$K_1 \dots K_4$	–	0,2000
$c_1$	Н/м	$42,84 \cdot 10^5$	$l_1$	м <sup>4</sup>	0,1480
$c_2$	Н/м	$10,87 \cdot 10^5$	$l_2$	м <sup>4</sup>	0,1480
$c_3$	Н/м	$4,350 \cdot 10^5$	$l_3$	м <sup>4</sup>	0,1480
$c_4$	Н/м	0	$l_4$	м <sup>4</sup>	0,1480
A	м <sup>2</sup>	$7,660 \cdot 10^{-2}$	$m_1$	кг	1142,7
$l_1$	м	37,00	$m_2$	кг	1142,7
$l_2$	м	21,00	$m_3$	кг	1142,7
$l_3$	м	20,00	$m_4$	кг	1142,7
$l_4$	м	7,000	$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	50,87
E	Н/м <sup>2</sup>	$2,100 \cdot 10^{11}$	$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	50,87
G	Н/м <sup>2</sup>	$8,100 \cdot 10^{10}$	$J_3$	кг·м <sup>2</sup>	50,87
$\rho_1 \dots \rho_4$	кг/м <sup>3</sup>	$11,20 \cdot 10^3$	$J_4$	кг·м <sup>2</sup>	50,87

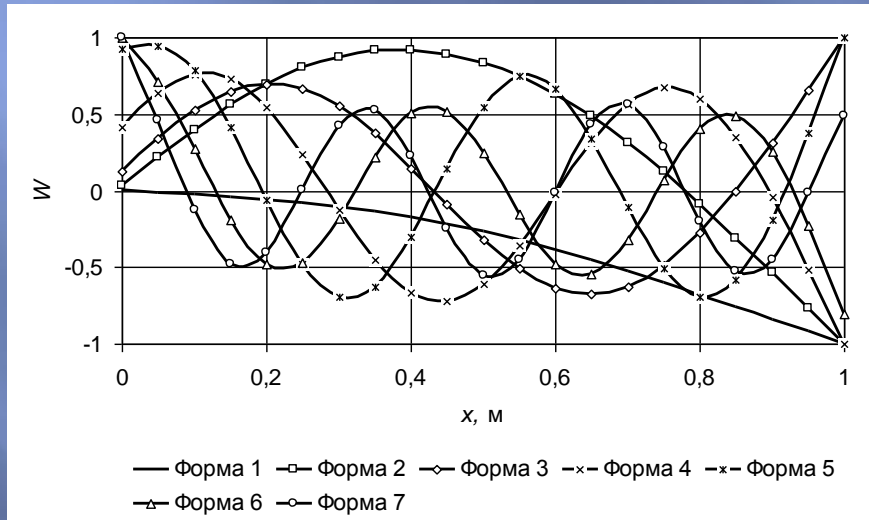
Параметри механічної системи п'ятипрогонової стріли

Параметр	Од-ця виміру	Числове значення	Параметр	Одиниця виміру	Числове значення
n	–	5	$K_1 \dots K_5$	–	0,200
$c_1$	Н/м	$25,14 \cdot 10^5$	$l_1$	м <sup>4</sup>	0,150
$c_2$	Н/м	$16,19 \cdot 10^5$	$l_2$	м <sup>4</sup>	0,150
$c_3$	Н/м	$10,06 \cdot 10^5$	$l_3$	м <sup>4</sup>	0,150
$c_4$	Н/м	$6,26 \cdot 10^5$	$l_4$	м <sup>4</sup>	0,150
$c_5$	Н/м	0	$l_5$	м <sup>4</sup>	0,150
A	м <sup>2</sup>	$8,790 \cdot 10^{-2}$	$m_1$	кг	1142,7
$l_1$	м	28,00	$m_2$	кг	1142,7
$l_2$	м	17,00	$m_3$	кг	1142,7
$l_3$	м	21,00	$m_4$	кг	1142,7
$l_4$	м	24,00	$m_5$	кг	1142,7
$l_5$	м	5,000	$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	49,91
E	Н/м <sup>2</sup>	$2,100 \cdot 10^{11}$	$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	49,91
G	Н/м <sup>2</sup>	$8,100 \cdot 10^{10}$	$J_3$	кг·м <sup>2</sup>	49,91
$\rho_1 \dots \rho_5$	кг/м <sup>3</sup>	$10,80 \cdot 10^3$	$J_4$	кг·м <sup>2</sup>	49,91
			$J_5$	кг·м <sup>2</sup>	49,91

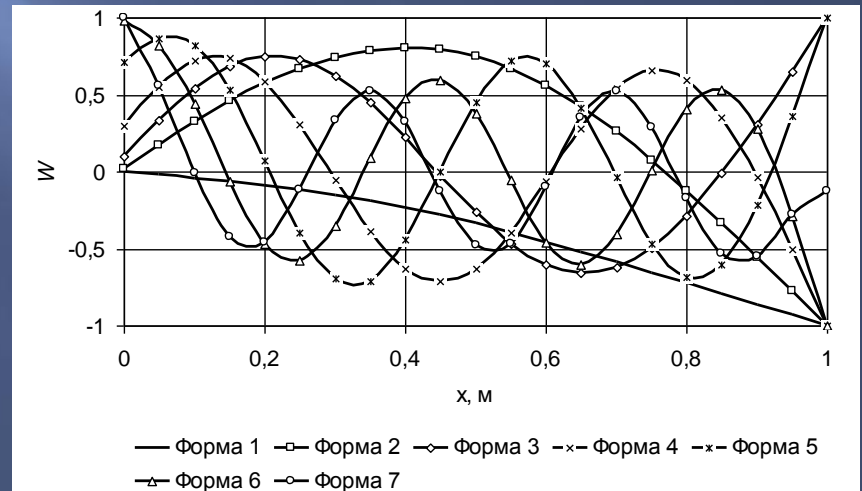
# Результати теоретичних досліджень вільних коливань багатопрогової стріли відвалоутворювача

## Власні частоти стрілових конструкцій

Тип стріли	Значення власної частоти, Гц						
	1	2	3	4	5	6	7
Чотирьохпрогонова	1,252	2,710	6,501	2,83	0,09	8,29	37,92
П'ятипрогонова	1,134	2,169	5,084	9,909	15,95	22,69	30,30



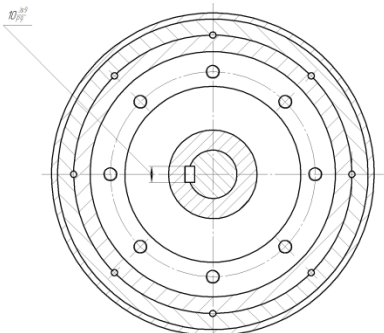
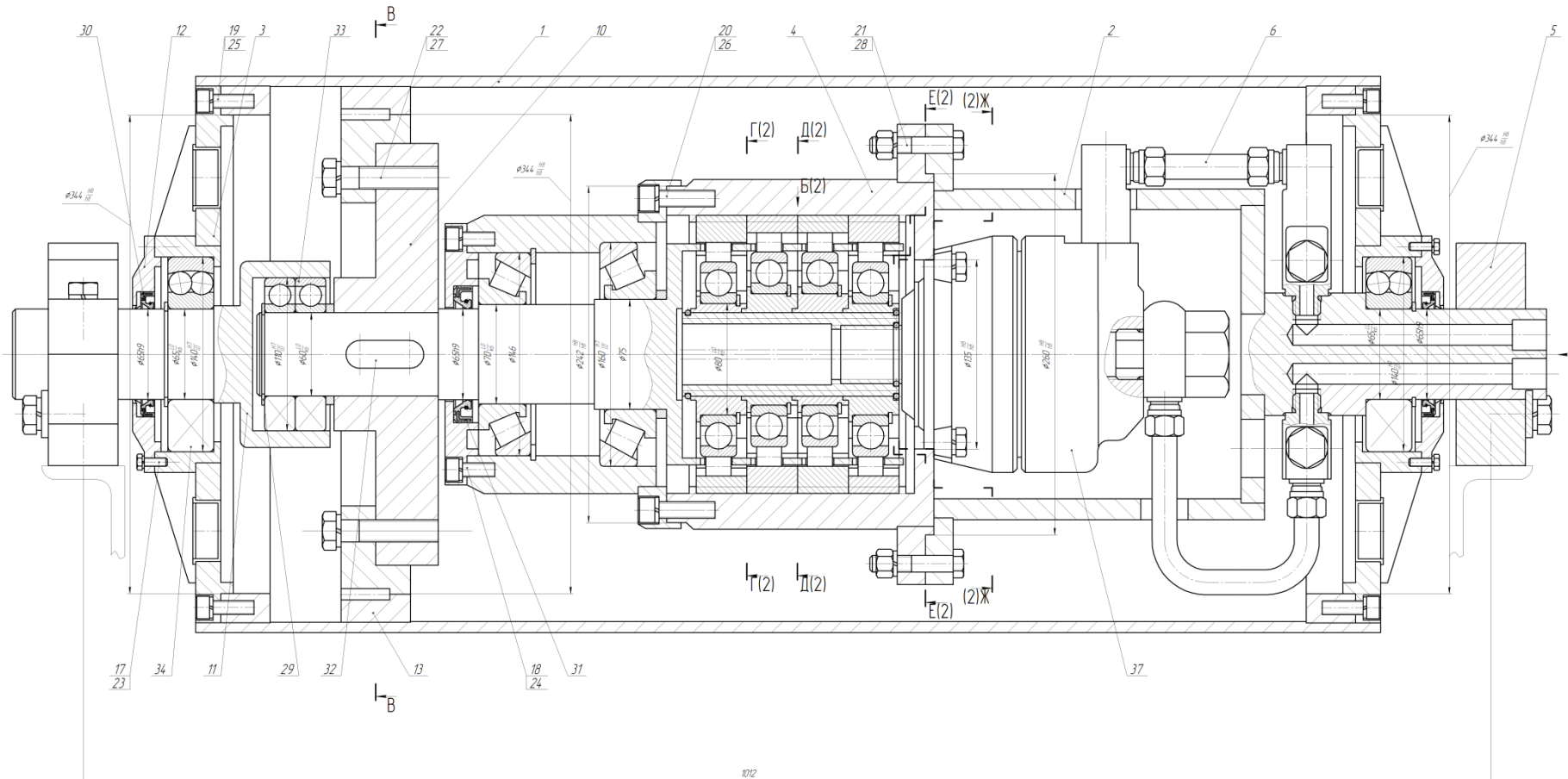
Амплітудні функції прогинів чотирьохпрогової стрілової конструкції



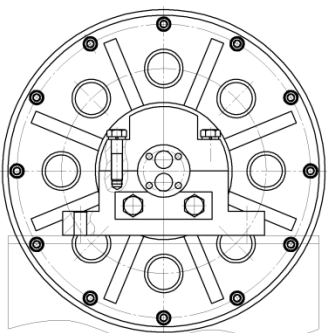
Амплітудні функції прогинів п'ятипрогової стрілової конструкції

# Вмонтований привід конвеєрастріли мобільної машини

08-271МР.007.00.000-08



A



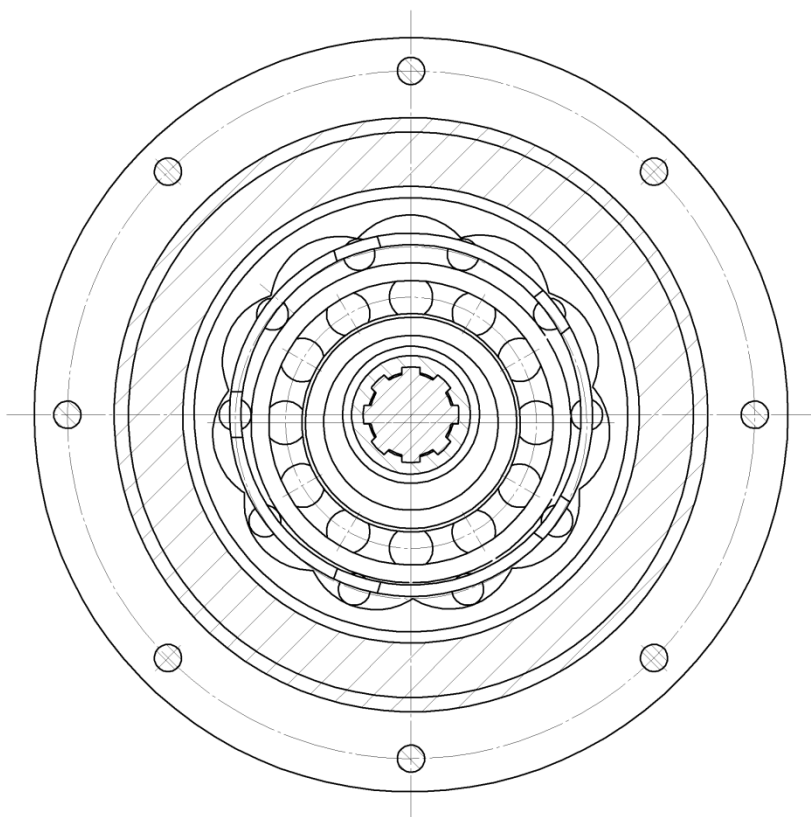
- 1 Частота обертання двигона, об/хв 54,6
- 2 Крутний момент на виході, Нм 1954,3
- 3 Тип двигона гідролінійний
- 4 Підвищення квіта 22
- 5 Паралельне число передального механізму 42

08-271МР.007.00.000 СК		Лист	Кількість	Місця
Вмонтований привід конвеєрастріли мобільної машини				
Складальне креслення				
32 17М-18 ВІНЧ				

# Вмонтований привід конвеєрастріли мобільної машини (продовження)

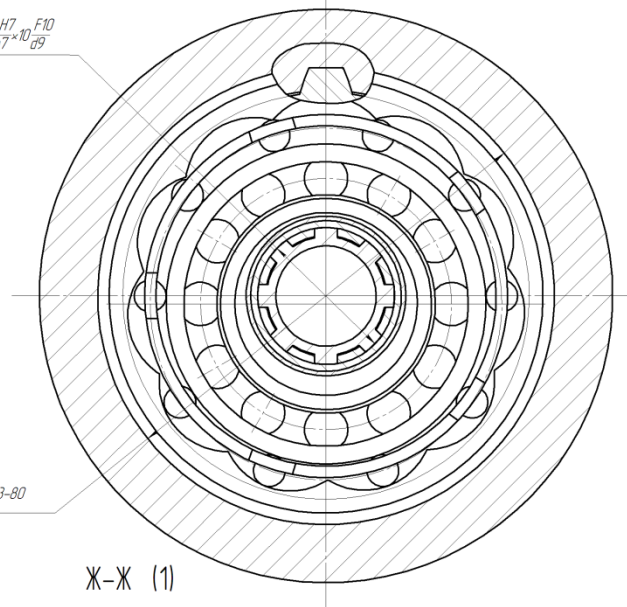
08-27.МКР.007.00.000 СК

Е-Е (1)



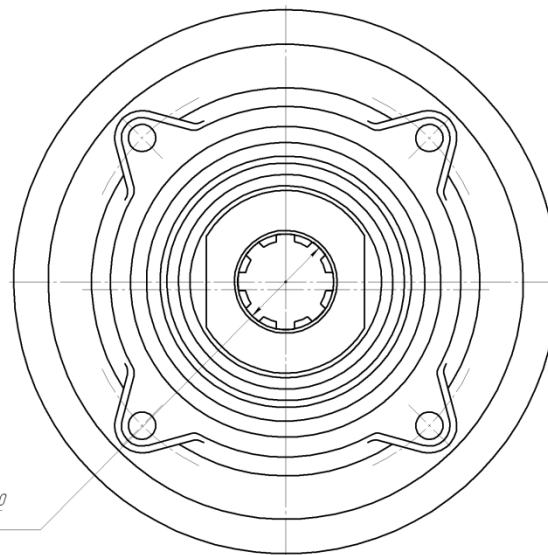
Г-Г Д-Д (1)

$D-8 \times 52 \times 60 \frac{H7}{h7} - \frac{F10}{g9}$



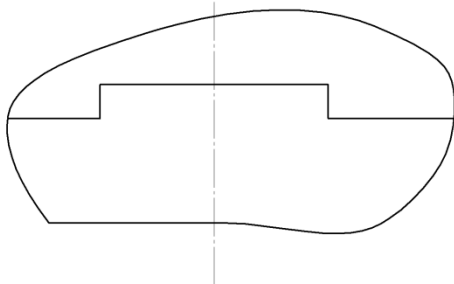
$200 \frac{H7}{g6} - 5$  ГОСТ 6033-80

Ж-Ж (1)



$D-8 \times 36 \times 42 \frac{H7}{h7} - \frac{F10}{g9}$

Б (5:1) (1)



## ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу відомих технічних рішень машинних комплексів для видобування корисних копалин відкритим способом встановлено, що конструкція стріли виготовляється як суцільною зварною, так і з декількох шарнірно з'єднаних між собою секцій. Для утримання стріли в заданому положенні застосовуються вантові відтяжки, що закріплюються на пілоні, кількість яких залежить від довжини стріли. Важливою складовою відвалоутворювача є улаштований на стріловій конструкції стрічковий конвеєр, від надійної роботи якого на заданих режимах транспортування суттєво залежить надійність роботи всієї механічної системи.

2. Розроблено розрахункову схему стрілової конструкції, що утримується на вантовій опорі, у вигляді багатопрогонової балки Тимошенко. Математична модель побудована на основі рівняння руху з урахування деформації зсуву та інерції обертання поперечних перерізів. Граничні умови записано в узагальненій формі. Математична модель дозволяє виконувати дослідження для будь-якої кількості ділянок багатопрогонової балки.

3. Розроблено узагальнений алгоритм розрахунку власних частот і форм вільних коливань багатопрогонової стрілової конструкції. Дослідженнями встановлено, що власні частоти багатопрогонової стріли залежать від згинної податливості її ланок, маси вантажу, що транспортується конвеєром, жорсткості канатів, якими утримується стріла і можуть змінюватися в залежності від характеристик і умов експлуатації механічної системи стріли відвалоутворювача в широких діапазонах.

4. Для заданих параметрів вмонтованого гідравлічного приводу запропоновано передавальний механізм з хвильовою передачею з проміжними тілами кочення. Виконано профілювання зубчатого зачеплення. Виконано розрахунки та профілювання елементів зачеплення хвильової передачі з проміжними тілами кочення. Проведено проектні розрахунки та розрахунки на міцність елементів конструкції приводу конвеєра.

5. За отриманими розрахунковими параметрами розроблено конструкцію вмонтованого гідравлічного приводу для головного конвеєра мобільної машини, що відрізняється високою питомою потужністю, компактністю, малими габаритами підвищеною надійністю за рахунок зменшення кількості складових вузлів.

6. Визначено економічні показники розробки, які підтверджують доцільність впровадження у виробництво розробки.

7. Розроблено комплекс заходів щодо забезпечення охорони праці під час експлуатації розробленого обладнання.

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!