

УДК 621.01

Аврука І. С., аспірант (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МЕХАТРОННОГО ПРИСТРОЮ В ТРУБОПРОВОДІ

У статті проаналізовано процес переміщення мехатронного пристрою в трубопроводі та досліджено математичну модель, що описує даний процес. Представлені циклічні часові діаграми дії та діаграми руху мехатронного пристрою при реверсивному русі.

Ключові слова: мехатронний пристрій, пневмокамери, реверсивний рух.

На даний час конструктивна складність та значна вартість відомих саморухомих мехатронних пристроїв (МП), що переміщуються в трубопроводі ставлять задачу створення ефективних, простих та дешевих МП з системами автоматичного керування, зокрема з можливістю адаптації до фізичних розмірів трубопроводу. Відомими є робототехнічні пристрої з технічного обслуговування і дефектоскопії труб різних діаметрів виконаних за автомобільним принципом “двигун – колеса”.

Принцип дії МП автомобільного типу полягає у використанні двигуна і рухомої платформи з різною кількістю коліс від двох до шести. Принцип дії МП типу “павук” оснований на використанні чотирьох пар коліс, які з’єднані між собою за допомогою шарнірних ланок [1].

Недоліками даних робототехнічних пристроїв є: переміщення на невеликі відстані, неможливість повернення назад, застосування в трубах великих діаметрів > 300 мм, відсутність реверсивного руху та складність переміщення в трубах з кутами, обмежена дистанційність та недостатні тягові зусилля.

Відомий також реверсивний підземнорухомий пристрій, що використовується для утворення порожнин у ґрунті й укладання лінійно-протяжних об’єктів, а також як підземнорухомий транспортний засіб багатоцільового широкого призначення [2].

Недоліком підземнорухомого пристрою є недостатня гнучкість, що не дозволяє рухатись по криволінійній траєкторії, а також низька адаптивність до застосування в трубопроводах з різними діаметрами.

Актуальною є задача створення саморухомих МП, які забезпе-

чують доставку засобів збору інформації в зону можливих дефектів конструкцій та можуть бути придатними для застосування в забруднених середовищах.

Постановка завдання. Аналітично описати модель, здійснити аналіз часових діаграм дії елементів МП призначеного для переміщення в трубопроводах.

МП для переміщення в трубопроводах (рис. 1) складається з носових 15, 16 і хвостових 2, 4 фіксуючих пневмокамер, поверх яких змонтовано пружну оболонку 3 для додаткового захисту, і середньої частини, яка знаходиться в гофрованому корпусі 13. Для переміщення пристрою по горизонталі використовується кулько-гвинтова передача 11, гнучка муфта 9 обертається реверсивним двигуном постійного струму 7 і вкручується в гайку 11. Для передачі крутного моменту валу двигуна використовується муфта 8.

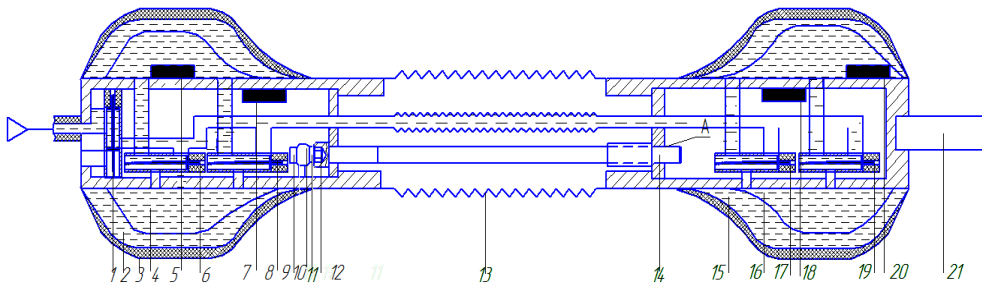


Рис. 1. Мехатронний пристрій для переміщення в трубопроводах

Рух вперед. Збільшення в об'ємі оболонки задньої пневмокамери [3].

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = p S_k - F, \quad Z(0) = R_c, \quad Z'(0) = 0, \quad (1)$$

$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = p S_k - F$ – рухома маса оболонки задньої пневматичної камери; S_k – площа бічної поверхні оболонки задньої пневматичної камери; p – робочий тиск; Z – радіус оболонки задньої пневматичної камери; t – час; F – сила опору. m , S_k , F є конструктивними параметрами рівняння (1) і тільки p можна змінювати під час руху МП.

Просування вперед на довжину кроку S носової частини відносно фіксованої хвостової.

$$m^* \frac{d^2 S}{dt^2} = P_b - q, \quad S(t_1) = 0, \quad S'(t_1) = 0, \quad (2)$$

P_b – корисна сила дії на трубопровід МП; q – сила опору трубопроводу ($P_b' \gg q'$); m^* – рухома маса носової частини; S – переміщення носової частини вперед відносно фіксованої хвостової; m^* є конструктивним параметром рівняння (2), P_b можна змінювати під час руху МП, а q змінюється самостійно під час руху, t_1 – час збільшення в об'ємі ділянки задньої пневматичної камери до впирання у стінку.

Зменшення в об'ємі оболонки задньої фіксуєної гідропневмокамери [3].

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = p_a S_k - F, Z(t_1 + t_2) = R, Z'(t_1 + t_2) = 0, \quad (3)$$

p_a – нормальний атмосферний тиск. Всі параметри рівняння (3) є конструктивними, t_2 – час фіксації хвостової частини.

Збільшення в об'ємі оболонки передньої фіксуєної пневмокамери.

$$\bar{m} \frac{d^2 Z}{dt^2} = p \bar{S}_k - F, Z(t_1 + t_2) = R_c, Z'(t_1 + t_2) = 0, \quad (4)$$

\bar{S}_k – площа бічної поверхні оболонки передньої пневматичної камери; \bar{m} – рухома маса оболонки передньої пневматичної камери; \bar{m} , \bar{S}_k , F є конструктивними параметрами рівняння (4) і тільки p можна змінювати під час руху МП.

Підтягування хвостової частини до фіксованої носової.

$$\tilde{m} \frac{d^2 S}{dt^2} = P^* - F_1', S(t_1 + t_2 + t_3) = 0, S'(t_1 + t_2 + t_3) = 0, \quad (5)$$

\tilde{m} – рухома маса хвостової частини; F_1' – сила тертя об стінку трубопровода порожнини хвостової частини МП; P^* – сила підтягування хвостової частини до фіксованої носової частини. \tilde{m} є конструктивним параметром рівняння (5), P^* можна змінювати під час руху МП, а F_1' змінюється самостійно під час руху, t_3 – час зменшення в об'ємі оболонки задньої пневматичної камери до попередніх розмірів.

Зменшення в об'ємі оболонки передньої фіксуєної пневмокамери.

$$\bar{m} \frac{d^2 Z}{dt^2} = p_a \bar{S}_k - F, Z(t_1 + t_2 + t_3 + t_5) = R_c, Z'(t_1 + t_2 + t_3 + t_5) = 0, \quad (6)$$

t_5 – час, за який відбувається підтягування хвостової частини до фіксованої носової.

Реверсивний рух МП. Збільшення в об'ємі оболонки передньої

фіксуєної пневмокамери [3].

$$\bar{m} \frac{d^2 Z}{dt^2} = p_a \bar{S}_k - F, Z(0) = R_c, Z'(0) = 0, \quad (7)$$

\bar{m} , S_k , F є конструктивними параметрами рівняння (7) і тільки p можна змінювати під час руху МП.

Просування назад на довжину кроку S хвостової частини відносно фіксованої носової.

$$\tilde{m} \frac{d^2 S}{dt^2} = P_b' - q', S(t_4) = 0, S'(t_4) = 0 \quad (8)$$

P_b' – корисна сила дії на стінку хвостової частини МП; t_4 – час зменшення в об'ємі оболонки передньої пневматичної камери до попередніх розмірів, q' – сила просування назад хвостової частини; \tilde{m} – є конструктивним параметром рівняння (8), P_b' можна змінювати під час руху МП, а q' змінюється самостійно під час руху. Оскільки, лобового опору для хвостової частини при русі назад немає, то $P_b' \gg q'$.

Зменшення в об'ємі оболонки передньої фіксуєної гідропневмокамери [3].

$$\bar{m} \frac{d^2 Z}{dt^2} = p_a \bar{S}_k - F, Z(t_4 + t_s') = R_c, Z'(t_4 + t_s') = 0.$$

Всі параметри рівняння (9) є конструктивними.

Збільшення в об'ємі оболонки задньої фіксуєної пневмокамери.

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = p S_k - F, Z(t_4 + t_s') = R_c, Z'(t_4 + t_s') = 0, \quad (10)$$

m , S_k , F є конструктивними параметрами рівняння (10) і тільки p можна змінювати під час руху МП.

Підтягування носової частини до фіксованої хвостової.

$$m^* \frac{d^2 S}{dt^2} = P_1 - F'^{1a}, S(t_1 + t_s' + t_6) = 0, S'(t_1 + t_s' + t_6) = 0, \quad (11)$$

F'^{1a} – сила тертя об стінку трубопроводу носової частини МП; P_1 – сила підтягування носової частини до фіксованої хвостової частини; m^* є конструктивним параметром рівняння (11), P_1 можна змінювати під час руху МП, а F'^{1a} змінюється самостійно під час руху, t_s' – час, за який переміщується назад хвостова частина на відстань S , t_6 – час зменшення еластичної оболонки до попередніх розмірів.

Зменшення в об'ємі оболонки задньої фіксуєючої пневмокамери.

$$m \frac{d^2 Z}{dt^2} = p_a S_k - F, Z(t_4 + t_5' + t_6 + t_2') = R, Z'(t_4 + t_5' + t_6 + t_2') = 0, \quad (12)$$

t_2' – час, за який відбувається переміщення носової частини вперед на відстань S . Всі параметри рівняння (12) є конструктивними.

Час дії конструктивних елементів МП, що забезпечують його рух.

Час збільшення в об'ємі оболонки задньої фіксуєючої пневмокамери.

$$t_1 = \sqrt{\frac{m}{c}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2cpS_k(R - R_c) - c^2(R^2 - R_{c2}^2)}}{pS_k - cR}, \quad (13)$$

m – рухома маса оболонки задньої пневматичної камери; c – жорсткість оболонки; p – робочий тиск; S_k – площа бічної поверхні оболонки задньої пневматичної камери; R – радіус роздутої оболонки задньої пневматичної камери; R_c – радіус здутої оболонки задньої пневматичної камери. m, c, p, S_k, R, R_c є конструктивними параметрами рівняння (13) і тільки P можна змінювати під час руху МП. Тому для регулювання величини t_1 можна використовувати лише робочий тиск.

Час просування вперед на довжину кроку S носової частини відносно фіксованої хвостової [3].

$$t_2 = \sqrt{2 \frac{S m^*}{P_b - q}} \quad (14)$$

S – «крок» МП; P_b – корисна сила дії на трубопровід носової частини; q – сила опору трубопроводу; m^* – рухома маса носової частини; m^*, S є конструктивними параметрами рівняння (14), P_b можна змінювати під час руху МП, а q змінюється незалежно в кожній точці.

Час зменшення в об'ємі оболонки задньої фіксуєючої пневмокамери.

$$t_3 = \sqrt{\frac{m}{c}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R_c - \frac{P_a S_k}{c}}{R - \frac{P_a S_k}{c}} \right)^2}}{\frac{R_c - \frac{P_a S_k}{c}}{R - \frac{P_a S_k}{c}}} \quad (15)$$

P_a – нормальний атмосферний тиск. Всі параметри рівняння (15) є конструктивними. Тому час зменшення задньої пневматичної камери буде постійний.

Час збільшення в об'ємі оболонки передньої фіксуєчої гідропневмокамери.

$$t_4 = \sqrt{\frac{m}{c}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R}{R_c - \frac{p \bar{S}_k}{c}} \right)^2}}{\frac{R}{R_c - \frac{p \bar{S}_k}{c}}} \quad (16)$$

\bar{m} – рухома маса оболонки передньої пневматичної камери; \bar{S}_k – площа бічної поверхні оболонки передньої пневматичної камери. \bar{m} , \bar{S}_k , c , R , R_c є конструктивними параметрами рівняння (16) і тільки p можна змінювати під час руху МП. Тому для регулювання величини t_4 можна використовувати лише робочий тиск.

Час підтягування хвостової частини до фіксованої носової.

$$t_5 = \sqrt{\frac{8Sm}{\pi d^2 p - 4kmg}} \quad (17)$$

\tilde{m} – рухома маса хвостової частини; d – діаметр; k – коефіцієнт тертя стінок; g – прискорення вільного падіння. \tilde{m} , \bar{S}_k , d є конструктивними параметрами рівняння (17) і тільки p можна змінювати під час руху МП. Тому для регулювання величини t_5 можна використовувати лише робочий тиск.

Час зменшення в об'ємі оболонки передньої фіксуєної пневмокамери.

$$t_6 = \sqrt{\frac{m}{c}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{R_c}{R - \frac{p\bar{S}_k}{c}} \right)^2}}{\frac{R_c}{R - \frac{p\bar{S}_k}{c}}} \quad (18)$$

\bar{m} , c , \bar{S}_k , R , R_c є конструктивними параметрами рівняння (18) і тільки p можна змінювати під час руху МП. Тому для регулювання величини t_6 можна використовувати лише робочий тиск.

При реверсивному русі змін зазнає лише час руху передньої та задньої частини. Час просування назад на довжину кроку S хвостової частини відносно фіксованої носової [3].

$$t_5' = \sqrt{\frac{2Sm}{P_b' - q'}} \quad (19)$$

P_b' – корисна сила дії на стінку хвостової частини мехатронного пристрою; q' – сила опору для просування назад хвостової частини. \tilde{m} , S є конструктивними параметрами рівняння (19), P_b' можна змінювати під час руху МП, а q' змінюється незалежно.

Підтягування носової частини до фіксованої хвостової.

$$t_2' = \sqrt{\frac{8Sm^*}{\pi d^2 p - 4km^*g}} \quad (20)$$

m^* , S , D , d є конструктивними параметрами рівняння (20) і тільки p можна змінювати під час руху МП. Тому для регулювання величини t_2' можна використовувати лише робочий тиск.

Часові діаграми дії елементів МП.

Із наведеного вище випливає, що дія МП має циклічний характер. Рух вперед пристрою відбувається за 4 фази. Протягом першої фази циклу формується задня опора, відносно якої пересувається вперед носова частина (друга фаза). Протягом третьої фази форму-

ється передня опора, яка і забезпечує можливість підтягування хвостової частини і переміщення тим самим корпусу МП на один «крок». Зазначені цикли повторюються і пристрій рухається вперед. Рух назад також проходить за 4 фази. Але протягом першої фази формується вже передня опора, відносно якої протягом другої фази пересувається назад хвостова частина. Протягом третьої фази формується задня опора, яка забезпечує можливість підтягування носової частини і переміщення тим самим МП на один «крок».

Процеси, які відбуваються в межах кожної фази робочого циклу, представлені часовими діаграмами на рис. 2 та на рис. 3.

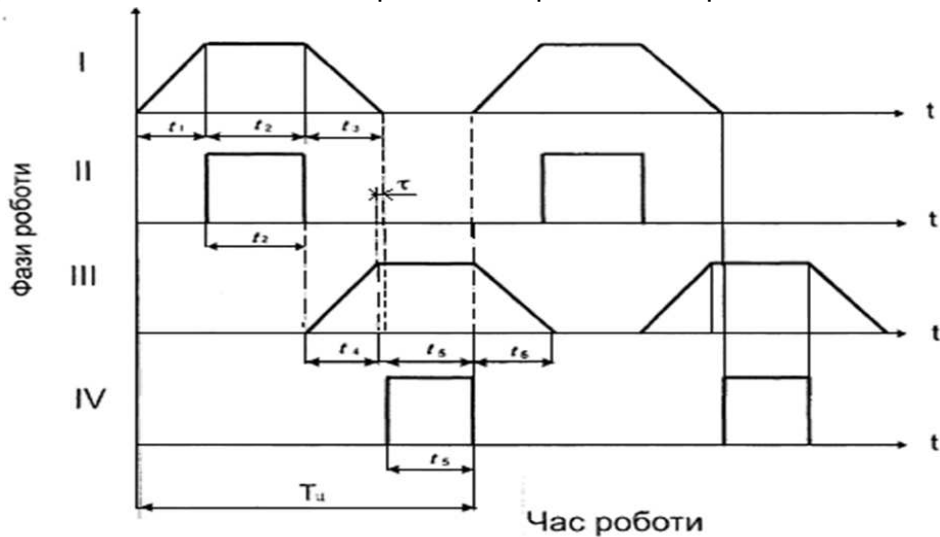


Рис. 2. Циклічна часова діаграма дії МП при русі вперед

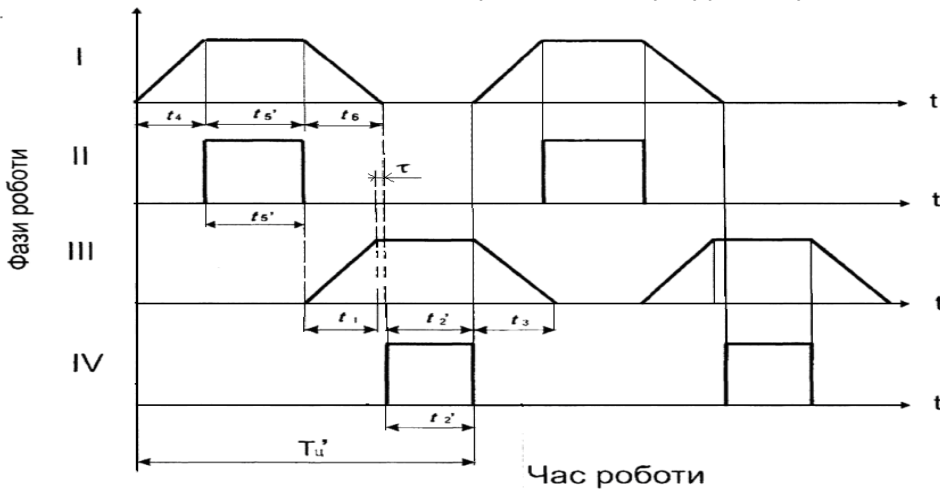


Рис. 3. Циклічна часова діаграма дії МП при русі назад

t_1 – час збільшення в об'ємі ділянки задньої пневматичної камери до впирання у стінку; t_2 і t_2' – часи фіксації хвостової частини, просування носової частини вперед і назад відповідно; t_3 – час зменшення в об'ємі оболонки задньої пневматичної камери до попередніх розмірів. Переміщення вперед носової частини на відстань S відбувається за час t_2 , а назад за час t_2' . Збільшення об'єму оболонки передньої пневматичної камери за час t_4 ($t_4 < t_3$). Час $\tau = t_3 - t_4$. Час фіксації носової частини дорівнює t_5 , а час зменшення її еластичної оболонки до попередніх розмірів дорівнює t_6 ($t_6 < t_1$). Підтягування хвостової частини до фіксованої носової частини відбувається за час t_5 , а переміщення назад хвостової частини на відстань S за час t_5' . Час робочого циклу при русі вперед становить T_u , а при русі назад – T_u' .

Отже, періодична заміна робочих циклів МП в часі забезпечує його поступальний рух, діаграми якого представлені на рис. 4 та рис. 5.

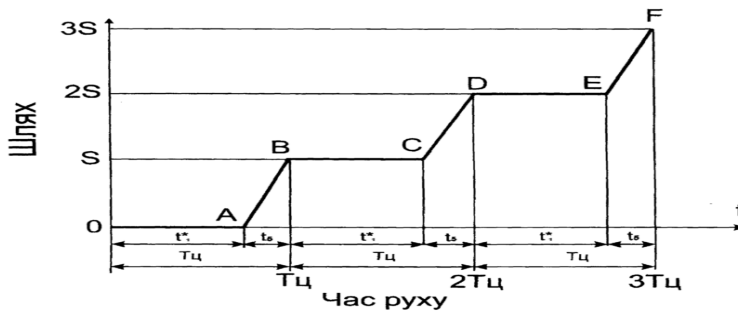


Рис. 4. Діаграма руху МП вперед

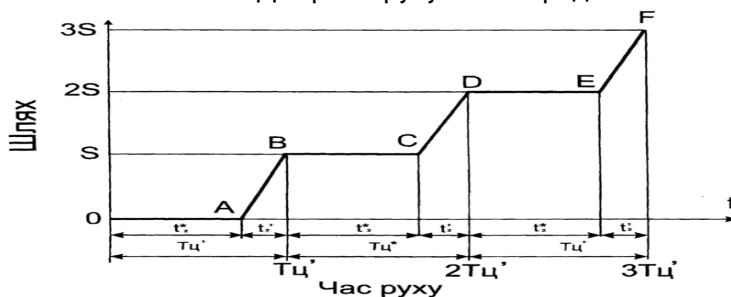


Рис. 5. Діаграма руху МП назад

На діаграмах корпус МП знаходиться в нерухомому стані, переміщення за час t_2 відбувається тільки носової частини, а за час t_5' при реверсивному русі лише хвостова. АВ, CD, EF – відбувається переміщення корпусу за час t_5 і t_2' – відповідно.

Таким чином, швидкість V даного дискретного руху МП визначається за наступною формулою [3].

$$V = \frac{S}{T_y} = f * S \quad (21)$$

f^* – частота кроків МП.

Тоді шлях пройдений пристроєм вперед визначається як

$$S = V t_{1p} \quad (22)$$

t_{1p} – час руху МП вперед ($t_{1p} = T_y * n$, n – кількість робочих циклів).

Для руху назад швидкість V даного дискретного руху МП визначається за формулою

$$V = \frac{S}{T_y} \quad (23)$$

Тоді шлях пройдений пристроєм назад визначається як:

$$S' = V t_{2p}, \quad (24)$$

t_{2p} – час руху МП назад ($t_{2p}' = T_y' * n$, n – кількість робочих циклів).

Висновки. Проведено дослідження математичної моделі, аналіз процесу переміщення мехатронного пристрою в трубопроводі. Представлені циклічна часова діаграми дії та діаграми руху МП при русі вперед та назад.

З проведеного аналізу випливає, що дія МП має циклічний характер. Рух вперед пристрою відбувається за 4 фази. При русі вперед пристрою протягом першої фази циклу формується задня опора та пересувається вперед носова частина, а при русі назад формується передня опора, відносно якої пересувається назад хвостова частина пристрою. Протягом останньої фази формується передня опора, яка дає можливість підтягування хвостової частини і тим самим переміщується корпус мехатронного пристрою на один «крок». Зазначені цикли повторюються і мехатронний пристрій рухається вперед та назад.

На основі проведеного дослідження отримано математичну модель переміщення мехатронного пристрою, яка дає можливість подальшої розробки системи автоматичного керування його швидкістю та зміною напрямку руху.

1. F. Kirchner and J. Hertzberg. A prototype Study of an Autonomous Robot Platform for Sewerage System. Maintenance Autonomous Robots, 1997; 4(4), p. 319-331. 2. Патент України на корисну модель № 42104, E02F 5/18. Реве-

рсивний підземнорухомий пристрій / Древецький В. В., Кованько В. В., Кованько О. В. – Опубл. 25.06.09, Бюл. 12. 3. Барабанов Г. П. Выбор и расчет параметров фиксирующих пневмокамер для захватных устройств манипуляторов / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов, В. И. Саранча // Известия Волгоградского государственного технического университета. – Волгоград, 2013. – Вып. 7/2013. – С. 75–75.

Рецензент: д.т.н., професор Древецький В. В. (НУВГП)

Avruka I. S., Post-graduate Student (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

RESEARCH OF MATHEMATICAL MODEL OF MECHATRONIC DEVICE (MD) MOVING PROCESS

In the article the research the mathematical model and its analytical presentation and analysis of the movement of mechatronic device. Presented cyclic timing diagrams MD steps when moving forward and backward movement and charts MD back and forth.

Keywords: mechatronic device, pneumatic chamber, reversible movement.

Аврука И. С., аспирант (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МЕХАТРОННОГО УСТРОЙСТВА

В статье проанализирован процесс перемещения мехатронного устройства в трубопроводе и исследована математическая модель, описывающая данный процесс. Представлены циклические временные диаграммы действия и диаграммы движения мехатронного устройства при реверсивном движении.

Ключевые слова: мехатронное устройство, пневмокамеры, реверсивное движение.
