

УДК 621.865.8

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ЗАХОПЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ МАНІПУЛЮВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИМИ СТРУМЕНЕВИМИ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИМИ ПРИСТРОЯМИ

В.Б. САВКІВ, О.М. ФЕНДЬО

Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя

У статті виведено диференціальні рівняння руху об'єкта маніпулювання, котрі враховують сили, що діють на об'єкт в процесі його захоплення безконтактним струменевим захоплювачем. Запропоновано еквівалентну розрахункову схему струменевого захоплювального пристрою для аналізу динаміки руху об'єкта маніпулювання в зоні пружної дії пневматичної подушки. Встановлено, що до моменту усталеного положення об'єкта відносно торця захоплювального пристрою, відбуваються його гармонічні затухаючі коливання. Доведено, що процес захоплення об'єкта маніпулювання здійснюється без його удару до поверхні захоплювального пристрою, за рахунок амортизації удару пружністю повітряної подушки.

Одним з основних конструктивних вузлів промислових роботів і маніпуляторів, що визначає можливості їх застосування в тому або іншому виробничому процесі, являється захоплювальний пристрій. Вимоги, що пред'являються до захоплювальних пристроїв, різні і залежать від великого числа чинників, що обумовлені областю використання робота або маніпулятора і характеру вирішуваних завдань [1]. При маніпулюванні об'єктами з низькими характеристиками міцності та жорсткості, або виготовлених із крихких матеріалів, або покритих тонким шаром лакофарбового матеріалу чи дорогоцінного сплаву – доцільно використовувати безконтактні струменеві захоплювальні пристрої. З метою виключення можливості пошкодження об'єкта маніпулювання, необхідно враховувати вплив струменевого захоплювача на об'єкт як в статичному режимі так і в динамічному, тобто в процесі захоплення об'єкта з відстані.

Об'єкти та методи дослідження

Питанням дослідження витратних та динамічних характеристик струменевих захоплювальних пристроїв присвячена стаття [2]. У ній подані теоретичні дослідження витратних характеристик струменевих захоплювачів, що дозволяють визначити тиск у камері захоплювача для статичного режиму залежно від магістрального тиску та параметрів соплових і дросельних елементів. Також приведена методика дослідження динамічних характеристик, котра дозволяє визначити час захоплення об'єктів маніпулювання з певної відстані. Об'єктом дослідження взято аналіз динаміки руху об'єкта маніпулювання в зоні пружної дії пневматичної подушки та її амортизуючих властивостей.

Постановка завдання

Завдання даної роботи полягає в аналізі сил, що діють на об'єкт в процесі його захоплення безконтактним струменевим захоплювачем. Необхідно запропонувати розрахункову схему струменевого захоплювального пристрою для аналізу динаміки руху об'єкта маніпулювання в зоні пружної дії пневматичної подушки, визначити характер руху об'єкта до моменту його усталеного положення. Визначити амортизуючі властивості пружної повітряної подушки та критерії захоплення об'єкта маніпулювання без його удару до поверхні захоплювального пристрою.

Результати та їх обговорення

Типові конструкції безконтактних струменевих захоплювальних пристроїв для плоских об'єктів представлені на рис. 1 а, б [3, 4]. Вони забезпечують високу якість продукції за рахунок відсутності на плоскій поверхні об'єктів маніпулювання слідів контакту, забруднень і пошкоджень, чого неможливо уникнути при використанні традиційних пристроїв захоплення деталей. Крім цього вони мають високі динамічні характеристики та демпфують удар об'єкта під час його захоплення.

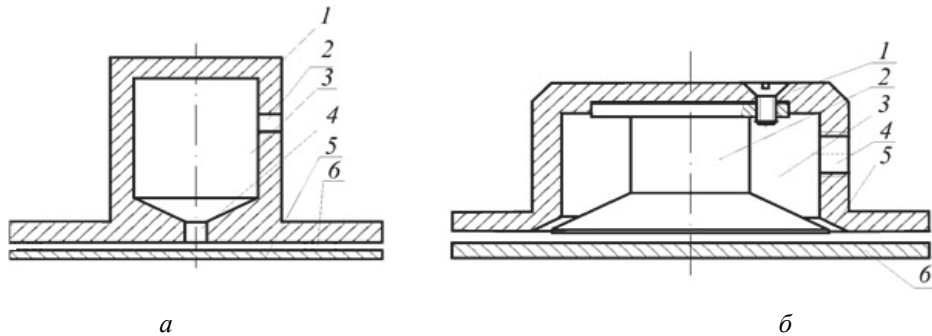


Рис. 1. Конструктивні схеми струменевих захоплювальних пристроїв:
а – з циліндричним соплом; б – з кільцевим соплом (ежекційний)

Струменевий захоплювач з циліндричним соплом (рис. 1, а) представляє собою корпус 1, у якому через отвір 2 в робочу камеру 3 підводиться стиснене повітря. Виконане на осі корпуса циліндричне сопло 4 з'єднує робочу камеру з атмосферою. Принцип роботи даного струменевого захоплювача полягає у виникненні зон розрідження у проміжку між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта маніпулювання 5. Стиснуте повітря від джерела тиску потрапляє в робочу камеру і створює в ній область підвищеного тиску. В результаті на виході з сопла в напрямку об'єкта витікає вільний струмінь повітря, який діє на нього силами в'язкого тертя прилипаючого до поверхні потоку повітря, а також реактивною відштовхуючою силою. Зменшення відстані між торцями захоплювача та об'єкта викликає значне зростання швидкості та питомої кінетичної енергії $\rho V^2/2$ плоского радіального потоку, що призводить до падіння статичного тиску у радіальному проміжку до величини меншої за атмосферний. Максимальна глибина та ширина зони розрідження, а отже і максимальна піднімальна сила виникають при відстані між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта $h=0,2\dots0,4$ мм. При $h \approx 0,08$ мм присмоктуюча дія струменя зникає, а наступне зменшення величини h приводить до утворення в радіальному зазорі пружної пневматичної подушки.

Ежекційний струменевий захоплювач (рис. 1, б) містить корпус 1 з отвором 4 для підводу стиснутого повітря, конічну вставку 2, що жорстко кріпиться до корпуса утворюючи робочу камеру 3. Бічна поверхня конічної вставки разом з фаскою порожнини корпуса утворюють замкнуту кільцеву конічну щілину 5, що з'єднує робочу камеру з атмосферою.

При подачі в робочу камеру 3 захоплювача стисненого повітря від магістралі воно витікає через щілину 5 в атмосферу у вигляді суцільного кільцевого потоку. Витікаючи із щілини кільцевий повітряний струмінь, розширюється в плоскому радіальному проміжку між взаємодіючими плоскими поверхнями захоплювача та об'єкта маніпулювання. Таке розширення повітряного потоку, за рахунок явища ежекції, призводить до утворення розрідження на поверхні об'єкта маніпулювання в зоні навпроти конічної вставки, і як результат до виникнення аеродинамічного ефекту притягування об'єкта.

Максимальне значення величини розрідження та вантажопідймальності захоплювача забезпечується при відношенні висот кільцевого сопла та радіального проміжку в межах $h_0/h = 2,8...3,2$. При цьому значення висоти кільцевого сопла вибирають в межах $h_0 = 0,08...0,12$ мм.

На рис. 2 представлено залежність сили притягування об'єкта від відстані між об'єктом та захоплювальним пристроєм. Захоплення об'єктів даними струменевими захоплювачами відбувається з певної відстані h_{max} , максимально допустиме значення якої визначається умовою $F_{cs}(h_{max}) \geq G$ (точка 1 на рис. 2). Захоплений об'єкт, під дією зростаючого аеродинамічного ефекту, рухається у напрямку торця захоплювача із зростаючою швидкістю. Далі рух об'єкта сповільнюється, спочатку за рахунок зменшення величини сили притягування, а пізніше за рахунок відштовхувальної дії повітряної подушки. Пружна повітряна подушка амортизує динамічну дію об'єкта, а потім починає його відштовхувати. Наступне збільшення відстані між взаємодіючими поверхнями захоплювача та об'єкта (рис. 2) призводить до зростання сили притягування, і об'єкт, в певний момент часу, знову почне рухатись у напрямку захоплювача. Отже захоплений об'єкт здійснює гармонічні затухаючі коливання. Через певний час коливання зникнуть, а рівноважне положення об'єкта відповідатиме умові $F_{cs}(h_{min}) = G$ (точка 2 на рис. 2).

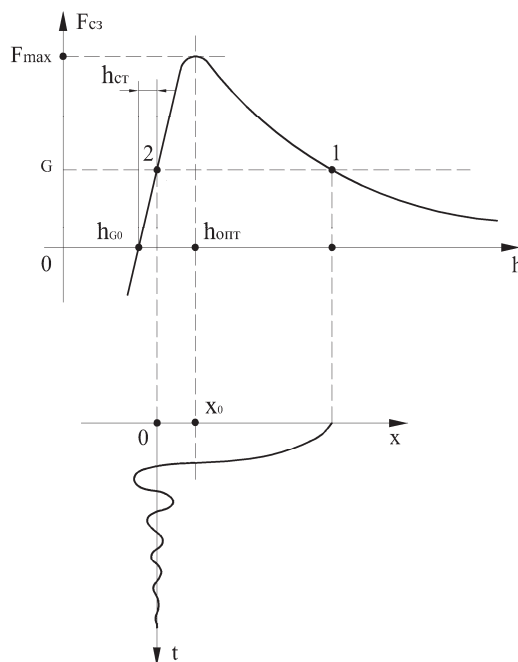


Рис. 2. Залежність сили притягування об'єкта від відстані між об'єктом та захоплювальним пристроєм

Таким чином дані захоплювачі забезпечують безконтактне базування об'єктів. При цьому об'єкт знаходиться на деякій відстані від базової поверхні захоплювача, а силове поле в зазорі діє рівномірно на всю поверхню, не викликаючи концентрації напружень і не порушуючи мікрорельєфу базових поверхонь. При цьому похибки базових поверхонь не впливають на точність базування. Центрування об'єкта та його фіксація від бічних зміщень здійснюється за допомогою спеціальних упорів.

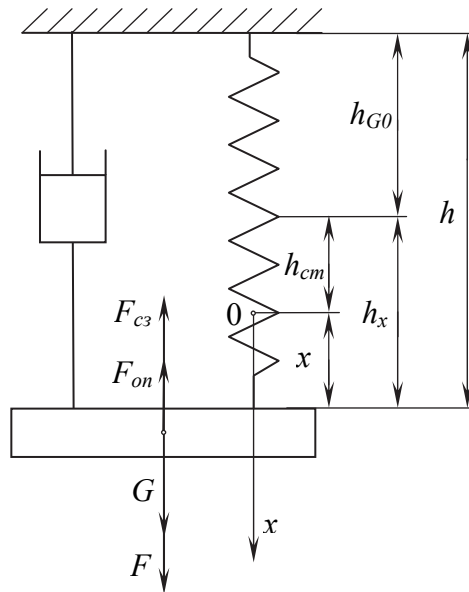


Рис. 3. Еквівалентна розрахункова схема струменевого захоплювального пристрою

Для аналізу динаміки руху об'єкта маніпулювання в зоні пружної дії пневматичної подушки, доцільно скористатись еквівалентною розрахунковою схемою струменевого захоплювального пристрою, що представлена на рис. 3. На даному рисунку вісь x направлена вниз по вертикальній прямій, і таким чином, щоб вона проходила через центр струменевого захоплювача. Початок координат виберемо в положенні рівноваги об'єкта маніпулювання, тобто в точці, в якій вага об'єкта врівноважується силою його притягування захоплювальним пристроєм.

Позначимо через x відхилення об'єкта в даний момент часу t від положення його рівноважного стану при $t \rightarrow \infty$, а через h_{cm} – статичне відхилення об'єкта маніпулювання, викликане його вагою G , від стану статичної рівноваги при $G = 0$. Тоді сумарне відхилення $h_x = h_{cm} + x$.

Для визначення рівняння руху об'єкта маніпулювання скористаємось другим законом Ньютона, враховуючи всі сили, що діють на об'єкт:

$$\vec{F} = \vec{F}_{\vec{n}\zeta} + \vec{G} + \vec{F}_{\vec{r}\vec{r}} . \tag{1}$$

де $F = ma$ – рівнодіюча всіх сил прикладених до об'єкта маніпулювання; $a = \frac{d^2x}{dt^2}$ – прискорення руху; $m = G/g$ – маса об'єкта; g – прискорення вільного падіння .

Припустимо, що характер зміни силової дії струменевого захоплювача на об'єкт маніпулювання при значеннях радіального проміжку $0 < h < h_{onm}$ близький до лінійного і пропорційний жорсткості повітряної подушки

$$c = \frac{F_{\max}}{h_{\vec{r}\vec{o}} - h_{G0}} , \tag{2}$$

де F_{\max} – максимальне значення сили притягування об'єкта захоплювачем, що відповідає оптимальному значенню радіального проміжку h_{onm} ; h_{G0} – значення радіального проміжку при якому $F_{c\zeta}(h_{G0}) = 0$.

Тоді сила від дії струменевого захоплювача на об'єкт маніпулювання:

$$F_{c\zeta} = -ch_x = -c(h_{cm} + x), \tag{3}$$

Силу опору, при малих швидкостях руху об'єкта маніпулювання, можна прийняти пропорційною цій швидкості:

$$F_{\text{fr}} = -bv, \quad (4)$$

де b – коефіцієнт опору, значення якого доцільно визначати експериментальним шляхом. У приведеній формулі, знак мінус показує, що сила F_{fr} направлена протилежно вектору швидкості $v = \frac{dx}{dt}$.

Тоді диференціальне рівняння руху в проекції на вісь x має вигляд:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -c(h_{cm} + x) + mg - b \frac{dx}{dt}. \quad (5)$$

Оскільки в положенні рівноваги сила притягування об'єкта маніпулювання $F_{c3} = ch_{cm}$ врівноважується його вагою $G = mg$, то

$$h_{cm} = \frac{mg}{c}. \quad (6)$$

Після підстановки даної залежності в (2), отримаємо рівняння у вигляді: $m \frac{d^2x}{dt^2} = -cx - b \frac{dx}{dt}$,

або якщо ввести позначення $c/m = \omega_0^2$, $b/m = 2\beta$, то

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0. \quad (7)$$

Це рівняння являється лінійним однорідним рівнянням другого порядку з сталими коефіцієнтами. Його характеристичне рівняння $\lambda^2 + 2\beta\lambda + \omega_0^2 = 0$, що отримане після заміни $x = e^{\lambda t}$, має корені

$$\lambda_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}. \quad (8)$$

Попередні експериментальні дослідження динаміки процесу безконтактного захоплення об'єктів струменевими захоплювачами показують, що до моменту усталеного положення захопленого об'єкта передують його періодичні затухаючі коливання. А це відповідає випадку, коли опір середовища невеликий, тобто коли $\beta^2 - \omega_0^2 < 0$.

Якщо ввести позначення

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2, \quad (9)$$

де ω – власна частота затухаючих коливань, то комплексні корені (8) мають вид

$$\lambda_{1,2} = -\beta \pm i\omega.$$

Отже, загальний розв'язок рівняння (2) матиме вигляд:

$$x = e^{-\beta t} (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t),$$

або

$$x = A e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (10)$$

де C_1, C_2, A, φ – константи, які визначаються з початкових умов.

За початкові умови прийемо швидкість $v = v_0$ руху об'єкта маніпулювання до торця струменевого захоплювача у момент часу $t=0$, тобто коли $h = h_{onm}$, що відповідає координаті $x = x_0$. Знаючи початкові умови можна визначити A і φ . Для цього знаходимо:

$$v = \frac{dx}{dt} = A \omega e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) - A \beta e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi),$$

і підставляємо $t=0$ у вирази для x і v . Отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} x_0 = A \sin \varphi \\ v_0 = A \omega \cos \varphi - A \beta \sin \varphi \end{cases}$$

Якщо поділити обидві частини другого рівняння на відповідні частини першого – отримаємо

$$\frac{v_0}{x_0} = \omega \operatorname{tg} \varphi - \beta.$$

Враховуючи (2) і (9)

$$\omega = \frac{1}{2m} \sqrt{\frac{4F_{\max}m}{h_{onm} - h_{G0}} - b^2}.$$

Тоді

$$\varphi = \arctg \frac{x_0 \sqrt{\frac{4F_{\max}m}{h_{onm} - h_{G0}} - b^2}}{2m v_0 + x_0 b}, \quad A = \frac{x_0}{\sin \varphi}. \quad (11)$$

Початкова координата (див. рис. 2)

$$x_0 = h_{onm} - h_{G0} - h_{cm},$$

або, враховуючи (2) і (6)

$$x_0 = (h_{onm} - h_{G0}) \left(1 - \frac{mg}{F_{\max}} \right). \quad (12)$$

Враховуючи, що

$$h = x + h_{G0} + h_{cm} = x + h_{G0} + \frac{(h_{onm} - h_{G0})mg}{F_{\max}}, \quad (13)$$

знайдемо рівняння коливання об'єкта маніпулювання

$$h(t) = h_{G0} + \frac{(h_{onm} - h_{G0})mg}{F_{\max}} + \frac{x_0}{\sin \varphi} e^{-(b/2m)t} \sin \left(\left(\frac{1}{2m} \sqrt{\frac{4F_{\max}m}{h_{onm} - h_{G0}} - b^2} \right) t + \varphi \right). \quad (14)$$

Розв'язок (14) доводить, що мають місце затухаючі коливання. Дійсно, амплітуда коливання $Ae^{-(b/2m)t}$ залежить від часу і є монотонно спадаючою функцією, тобто $Ae^{-(b/2m)t} \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Період затухаючих коливань визначається по формулі $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{4\pi m}{\sqrt{\frac{4F_{\max}m}{h_{onm} - h_{G0}} - b^2}}$.

Для визначення швидкості об'єкта v_0 для моменту часу, що відповідає значенню радіального проміжку $h = h_{onm}$, необхідно проаналізувати параметри руху захопленого об'єкта у зоні $h > h_{onm}$ (рис. 2). Диференціальне рівняння руху об'єкта під дією зростаючої сили притягання $F_{\tilde{n}\zeta}(h)$ у зоні $h > h_{onm}$:

$$m \frac{d^2 h}{dt^2} = -F_{\tilde{n}\zeta}(h) + mg. \quad (15)$$

В статті [2], на основі експериментальних досліджень встановлено, що величина сили притягання деталей струменевими захоплювачами змінюється по параболічному закону в залежності від текучої відстані h і має вид

$$F_{\tilde{n}\zeta}(h) = F_{\max} \left(\frac{H + h_{onm} - h}{H} \right)^2,$$

де H – умовне розрахункове значення відстані між торцями захоплювача та об'єкта при якій $F_{c3}=0$ ($H=3\dots 4$ мм).

Позначивши $A = \frac{F_{\max}}{mH^2}$, $B = -\frac{2F_{\max}(H + h_{onm})}{mH^2}$, $C = \frac{F_{\max}(H + h_{onm})^2}{mH^2} - g$, приведемо рівняння (15) до виду:

$$\frac{d^2 h}{dt^2} + Ah^2 + Bh + C = 0. \quad (16)$$

Враховуючи початкові умови $\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t=0} = 0$, $h|_{t=0} = h_1$, з рівняння (16) можна визначити швидкість об'єкта у процесі його переміщення до торця захоплювача, яка змінюватиметься за такою залежністю:

$$v(h) = -\sqrt{\frac{2A(h^3 - h_1^3)}{3} + B(h^2 - h_1^2) + 2C(h - h_1)}. \quad (17)$$

Відповідно швидкість об'єкта при $h = h_{omn}$

$$v_0 = -\sqrt{\frac{2A(h_{omn}^3 - h_1^3)}{3} + B(h_{omn}^2 - h_1^2) + 2C(h_{omn} - h_1)}. \quad (18)$$

Для струменевого захоплювача (рис. 1, б) з конструктивними параметрами $d_0 = 60 \text{ мм}$, $d_1 = 120 \text{ мм}$, $h_0 = 0.1 \text{ мм}$ при надлишковому тиску живленні $P_{0н} = 200 \text{ кПа}$, $F_{\max} = 101 \text{ Н}$, $h_{omn} = 0.25 \text{ мм}$ і $h_{G0} = 0.12 \text{ мм}$ [3]. При $h_1 = 1 \text{ мм}$, приймаючи $H = 3 \text{ мм}$ і $m = 2 \text{ кг}$, знайдемо $v_0 = -0.227 \text{ м/с}$. Результати розрахунків за формулою (14) представлені на рис. 4. При розрахунках коефіцієнт опору був прийнятий $b = 200$.

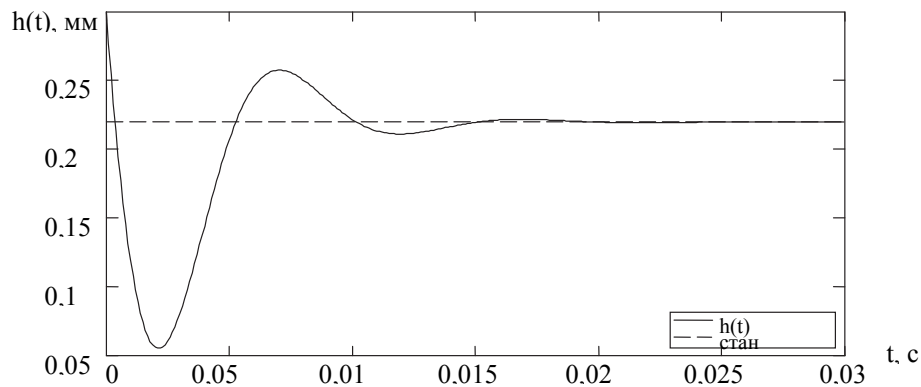


Рис. 4. Графік коливань об'єкта маніпулювання

Висновки

Отже, до моменту усталеного положення об'єкта відносно торця безконтактного захоплювального пристрою, відбуваються його гармонічні згасаючі коливання. Процес захоплення об'єкта маніпулювання здійснюється без його удару до поверхні захоплювального пристрою, за рахунок амортизації удару пружністю повітряної подушки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение. / Спыну Г.А. – К.: Вища школа, – 1991. – 311 с.
2. Проць Я. Дослідження витратних і динамічних характеристик струменевих захоплювачів автоматичних пристроїв завантаження / Проць Я.І, Савків В.Б, Данилюк О.А. // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2000. – том 5, – с. 42–49.
3. Проць Я.И. Газодинамический анализ струйных захватов плоских заготовок. / Я.И.Проць, В.Б.Савкив // Оптимизация производственных процессов. Вып. 1. – Севастополь: Издательство СевГТУ. – 1999. – С. 63 – 68.

Надійшла