

КЕРУВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ СКЛАДОВОЮ РУХУ ЛЮЛЬКИ ПІДЙІМАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ ДЛЯ РЯТУВАЛЬНИХ РОБІТ

Вступ. Робота рятувальників в люльках підйімальних механізмів на значних висотах (50-90м) супроводжується значним ризиком для життя, як для них, так і потерпілих. Ця обставина підсилюється ще й тим, що стріла підйімальних механізмів не є абсолютно жорсткою. Тому через дію зовнішніх впливів при підйманні та переміщенні люльки в горизонтальній площині виникають пружні деформації. Амплітуда коливання стріли може доходити до 4 метрів. На люльку діє, як система керування її переміщенням, так і реактивна сила від подачі вогнегасної речовини по сухотрубах. Крім того, усі підйімальні механізми і автодрабини застосовуються на відкритому повітрі, тому на люльку діє також вітер, пориви якого можуть сягати швидкості 12,5м/с (6 балів за шкалою Бафорта). Це значно ускладнює роботу рятувальників, а деколи навіть зводить нанівець усі їхні зусилля. Підйімальні механізми, що використовуються протипожежними службами, повинні відповідати вимогам безпеки та захисним заходам ДСТУ [1], зокрема пружні коливання люльки, як у вертикальній так і горизонтальній площині, повинні бути якнайменшими.

Аналіз стану проблеми дослідження. Майже усі вітчизняні підйімальні механізми і автодрабини не мають автоматичної системою стабілізації люльки. До таких підйомників відноситься пожежно аварійно-рятувальний автомобіль на повноприводному шасі КРАЗ-63221-050 (6х6) – пожежний пінопідйомник АТП-40. Стабілізація люльки здійснюється за допомогою механічних пристроїв та оператора, а якість керування нею залежить лише від професійності оператора. Перспективним способом, щодо демпфування коливань люльки є використання системи автоматичного керування (САК) переміщенням люльки, що робить роботу рятувальників більш безпечною та ефективною. Така система повинна відпрацювати завдання з високою точністю і повинна забезпечувати демпфування пружних коливань люльки в обох площинах. Питання демпфування пружних коливань у вертикальній площині детально розглянуто в роботах [2, 3] і практично вирішено завдяки застосуванню, відповідним чином синтезованої, САК. У той же час демпфуванню пружних коливань люльки в горизонтальній площині приділяється недостатньо уваги.

Постановка задач дослідження. В даній статті для демпфування пружних коливань в горизонтальній площині пропонується синтезувати двомасову позиційну систему підпорядкованого регулювання (СПР) підймання люльки, яка б дозволила забезпечити необхідні динамічні та статичні характеристики переміщення люльки в горизонтальній площині за умови дії на неї керуючих та збурюючих впливів і тим самим підвищити ефективність роботи рятувальників в реальних умовах їх роботи.

Виклад матеріалу дослідження. Математична модель підйімального механізму в горизонтальній площині будується на основі кінематичної схеми (рис.1), де відображено рух люльки в обох площинах. Для приростів координат та зовнішніх впливів вирази, що відповідають математичній моделі переміщення люльки в горизонтальній площині, мають вигляд:

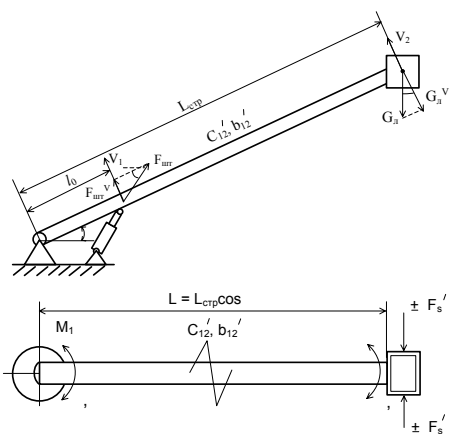


Рис. 1. Кінематична схема механізму підймання люльки у вертикальній та горизонтальній площинах

$$\left. \begin{aligned} M_1(p) - a_1(p)\omega_1(p) - [M_{12}'(p) - b_{12}'(\omega_2'(p) - \omega_1'(p))]/i_p &= J_1 p \omega_1(p), \\ M_{12}'(p) &= \frac{C_{12}'}{p} \int (\omega_1'(p) - \omega_2'(p)) dt, \\ M_{12}'(p) + b_{12}'(\omega_1'(p) - \omega_2'(p)) \pm F_s'(p)L &= J_2 p \omega_2'(p), \\ \varphi_1'(p) &= \frac{1}{p} \omega_2'(p), \end{aligned} \right\} (1)$$

де J_1, J_2' – сумарні моменти інерції першої та другої мас відповідно; M_1 – момент, що діє зі сторони двигуна; $F_s'(p)$ – горизонтальна складова збурень, які обумовлені силою вітру і реактивними зусиллям від струменя води; C_{12}' – коефіцієнт пружності деформації згину; b_{12}' – коефіцієнт внутрішнього в'язкого тертя у пружній стрілі; $\omega_1(p)$ – кутова швидкість двигуна; $M_{12}'(p)$ – момент пружної деформації стріли в горизонтальній площині; $\omega_1'(p), \omega_2'(p)$ – кутові швидкості на кін-

цях стріли, $\varphi'_l(p)$ – переміщення; p – оператор Лапласа.

Розглянемо комбінований варіант синтезу СПР переміщенням люльки в горизонтальній площині методом узагальненого характеристичного полінома (УХП) [4]. Для цього синтезуємо спочатку інтегральним методом двомасову СПР швидкості другої маси з контурами регулювання швидкістю першої та другої маси. Контур регулювання пружного моменту тут не передбачається. Потім розглянемо синтез регулятора контура переміщення, що включає в себе двомасову СПР, синтезовану раніше.

На основі (1) будується структурна схема двомасового об'єкта регулювання. На підставі цієї структурної схеми формується структурна схема триконтурної СПР, в якій мають місце зворотні зв'язки за швидкостями обох мас та переміщенням люльки. Зворотного зв'язку за пружним моментом не вводиться. Вираз передавальної функції $W_{ш2}(p) = \omega'_2(p) / U_{рп}(p)$ для внутрішньої двоконтурної двомасової СПР має вигляд :

$$W_{ш2}(p) = \frac{W_{рш2}(p)W_{рш1}(p)W_{ел.г}(p)(b_{12}p + C_{12})i_p}{\left[J_{1p}(J_{2p}^2 + b_{12}p + C_{12})i_p^2 + (b_{12}p + C_{12})J_{2p} \right] + \left[W_{рш1}(p)W_{ел.г}(p)K_{ш1}(J_{2p}^2 + b_{12}p + C_{12})i_p^2 \right] + \rightarrow} \rightarrow + W_{рш2}W_{рш1}(p)W_{ел.г}(p)(b_{12}p + C_{12})K_{ш2}i_p, \quad (2)$$

де $W_{ш1}(p)$, $W_{ш2}(p)$, $W_{ел.г}(p)$ – передавальні функції регуляторів швидкостей обох мас та електрогідравлічного приводу зі сталою часу $T_{ел.г}$ і коефіцієнтом підсилення $K_{ел.г}$ відповідно; $K_{ш1}$, $K_{ш2}$ – коефіцієнти зворотного зв'язку за $\omega'_1(p)$ і $\omega'_2(p)$.

Представимо узагальнений характеристичний поліном такої СПР поліномом другого порядку. Для цього помножимо і розділимо першу, другу і третю складову (в квадратних дужках) характеристичного поліному передавальної функції (2) на p . Після цього УХП отримається шляхом почленного ділення складових характеристичного полінома на вираз чисельника. Тоді з умови рівності УХП та характеристичного полінома якоїсь стандартної форми за умови, що порядок синтезованої системи становить $n = 2$, запишемо таку систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\omega_{ош}^2 \left[J_1(J_{2p}^2 + b_{12}p + C_{12})i_p^2 + J_2(b_{12}p + C_{12}) \right]}{K_{ш2}W_{рш2}(p)W_{рш1}(p)W_{ел.г}(p)(b_{12}p + C_{12})i_p p} &= 1, \\ \frac{\omega_{ош}^2 K_{ш1}(J_{2p}^2 + b_{12}p + C_{12})i_p^2}{K_{ш2}W_{рш2}(p)(b_{12}p + C_{12})i_p p} &= \alpha_1^{III} \omega_{ош}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де α_1^{III} – параметр стандартної форми другого порядку вибраної для контура швидкості другої маси. $\omega_{ош}$ – середньгеометричний корінь вибраної стандартної форми.

Розв'язавши систему рівнянь (3) отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} W_{рш1}(p) &= \frac{\omega_{ош} \alpha_1^{III} (T_{ел.г} p + 1) \left(J_1 i_p^2 + \frac{J_2 (b_{12} p + C_{12})}{(J_{2p}^2 + b_{12} p + C_{12})} \right)}{K_{ш1} K_{ел.г} i_p^2} \\ W_{рш2}(p) &= \frac{\omega_{ош} K_{ш1} i_p}{\alpha_1^{III} K_{ш2}} \left(\frac{J_2 p}{b_{12} p + C_{12}} + \frac{1}{p} \right). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Синтезуємо тепер зовнішній контур переміщення. Для цього, на основі аналізу структурної схеми з оптимізованою внутрішньою СПР, куди входять синтезовані вище регулятори швидкостей, запишемо передавальну функцію для контура переміщення $W_n(p) = \varphi'_l(p) / U_3(p)$:

$$W_n(p) = \frac{W_{рп}(p) \omega_{ош}^2}{K_{ш2} p^3 + K_{ш2} \alpha_1^{III} p^2 \omega_{ош}^2 + K_{ш2} \omega_{ош}^2 p + W_{рп}(p) K_{п} \omega_{ош}^2}. \quad (5)$$

Прирівнявши вирази при однакових степенях УХП і характеристичного полінома стандартної форми за умови $n = 3$, отримаємо систему рівнянь, на підставі якої можна розрахувати вирази передавальної функції регулятора переміщенні $W_{рп}(p)$ та значення середньгеометричного кореня $\omega_{оп}$ для системи третього порядку. Розв'яжемо ці рівняння за умови, що параметрами стандартної форми третього порядку є величини α_1^{II} , α_2^{II} .

$$\left. \begin{aligned} W_{рп}(p) &= \frac{\omega_{оп}^3 K_{ш2}}{\omega_{ош}^2 K_{п}}, \\ \omega_{ош} &= \omega_{оп} \frac{\alpha_1^п}{\alpha_1^ш}, \\ \omega_{ош} &= \omega_{оп} \sqrt{\alpha_2^п}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Очевидно, що дві останні умови виразу (6) строго виконуватимуться, якщо $\sqrt{\alpha_2^п} = \alpha_1^п / \alpha_1^ш$, тобто для контура переміщення накладаються вимоги щодо вибору стандартної форми для нього. Для випадку, коли вона все ж таки вибирається довільно, то варто вибирати таку, для якої $\sqrt{\alpha_2^п}$ і $\alpha_1^п / \alpha_1^ш$ не дуже відрізнятимуться. Так, якщо вибрати стандартні форми Баттерворта, то $\alpha_1^ш = \sqrt{2}$; $\alpha_1^п = \alpha_2^п = 2$. Очевидно, що тут умова забезпечення цієї форми в усіх контурах справджується. Якщо ж взяти стандартну біноміальну форму, коли $\alpha_1^ш = 2$; $\alpha_1^п = \alpha_2^п = 3$, то отримаємо суперечливі умови: $\omega_{ош} = \frac{3}{2} \omega_{оп}$ і $\omega_{ош} = \sqrt{3} \omega_{оп}$, які не дуже відрізняються і тому можливий компроміс при налаштуванні всіх контурів на стандартну біноміальну форму.

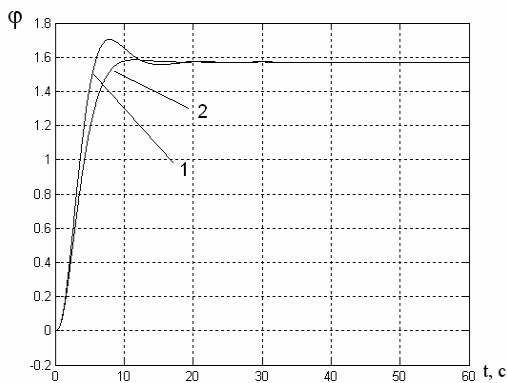


Рис. 2. Перехідний процес руху люльки в горизонтальній площині (крива 1 – $\omega_{ош} = \frac{3}{2} \omega_{оп}$, крива 2 – $\omega_{ош} = \sqrt{3} \omega_{оп}$).

а не ідеальний диференціатор зі сталою часу 0,01с. Як видно з рис. 2, форма перехідного процесу руху люльки в горизонтальній площині φ_t при налаштуванні її відповідно до синтезу регуляторів згідно стандартної біноміальної форми, коли $\omega_{ош} = \sqrt{3} \omega_{оп}$, має перерегулювання 0,9%. Якщо ж $\omega_{ош} = \frac{3}{2} \omega_{оп}$, то перерегулювання становить 8,3%. Коли $t = 60$ с, змодельована дія збурення.

Висновки.

В статті синтезовано двомасову триконтурну СПР (без введення зворотного зв'язку за пружним моментом) горизонтальною складовою руху люльки підйомального механізму. Синтезована СПР є нечутливою (практично астатичною) до дії збурення. Поряд з тим, можна досягнути незначного перерегулювання під час відпрацювання завдання, навіть в межах 1%. Такі результати отримуються, якщо $\omega_{ош} = \sqrt{3} \omega_{оп}$. Усе це дозволяє ефективно виконувати роботу рятувальниками і робить її більш безпечною.

ЛИТЕРАТУРА

1. ДСТУ EN 14043:2008. Автодрабини пожежні. Загальні технічні вимоги та методи випробовування (EN 14043:2005, IDT).
2. Марущак Я.Ю., Кушнір А.П. Демпфування пружних коливань люльки з використанням математичної моделі підйомального механізму для рятувальних робіт // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 30. – С.283-284.
3. Марущак Я.Ю., Кушнір А.П. Синтез систем автоматичного керування підйомального механізму для рятувальних робіт // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» науково-технічного журналу «Електроінформ» – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С.178-180.
4. Марущак Я.Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовною та паралельною корекцією. Навч. посібник. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2005. – 208с.