

УДК 621.87:681.5

МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАНІПУЛЯТОРА РЕМОНТНО-ЕВАКУАЦІЙНОЇ МАШИНИ

Черевко Ю.М.¹, Зінько Р.В.².

1 - Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна

2 - Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна

***Анотація:** При експлуатації військових ремонтно-евакуаційних машин трапляються випадки перевантаження елементів конструкції вантажо-підйомного обладнання. Це може спричинити поломку агрегатів. Для дослідження і аналізу роботи підйомно-транспортного обладнання розроблено програмне забезпечення, яке враховує особливості його експлуатації. Представлені результати теоретичного дослідження роботи стрілового крана жорсткого типу з гідравлічним приводом стріли у випадку відриву залиплого вантажу від опорної поверхні. Розроблена математична модель процесу евакуації застряглої техніки ремонтно-евакуаційними засобами з використанням стріли гідрокрана. Встановлено, що для найбільш складного у плані динамічних перевантажень випадку часткового занурення та щільного залипання вантажу у глинистому ґрунті, динамічні зусилля при підйомі вантажу із жорсткої опори зростають на 20%. Отримані результати важливі при розрахунку запасу міцності елементів конструкцій кранів.*

***Ключові слова:** ремонтно-евакуаційна машина, стріла гідрокрана, евакуація застряглої техніки, моделювання, динамічні перевантаження*

Підйомно-транспортне обладнання броньованих ремонтно-евакуаційних машин (БРЕМ) використовується в особливо жорстких умовах [1]. Математичне моделювання різноманітних режимів роботи БРЕМ є трудомістким завданням, що вимагає великих часових витрат і має свою специфіку досліджень. Тому актуальним є створення порівняно простіших математичних моделей для дослідження тільки, наприклад, підйомно-транспортного обладнання БРЕМ з характерними для нього умовами експлуатації.

З аналізу публікацій по дослідженню стрілових вантажопідйомних кранів (СВК) видно, що їх конструкції розглядаються як складні динамічні системи [2-4]. Але їх математичні моделі не завжди враховують особливості експлуатації ремонтно-евакуаційної військової техніки. Тому актуальним створення порівняно простої математичної моделі для дослідження та аналізу роботи підйомно-транспортного обладнання БРЕМ, яке враховує особливості експлуатації.

Створення математичної моделі для дослідження і аналізу роботи підйомно-транспортного обладнання БРЕМ, зокрема СВК, дозволяє виділити етапи побудови моделі: побудова моделі механічної підсистеми; побудова моделі підсистеми гідроприводу; задання управляючих і збудуючих дій; задання параметрів моделювання (граничних умов, кроку інтегрування, параметрів виведення результатів і так далі); задання чисельних значень параметрів і початкових умов; проведення обчислювального експерименту.

1. Методика моделювання механічної підсистеми крана основана на використанні методу однорідних координат і побудові рівнянь руху у формі рівнянь Лагранжа другого роду [3-5].

Механічну підсистему СВК представляємо у вигляді ланок якими є стріла, тросова підвіска з обіймою гака і вантажем.

Враховуючи значні жорсткості остову крану, металоконструкції стрілового обладнання, приймемо широко поширені у техніці допущення, представивши розрахункову схему у вигляді динамічної системи, що складається з абсолютно жорстких елементів з зосередженими податливостями. Для спрощення математичної моделі доцільно зовнішні сили, що діють на стрілоподібне обладнання крана, зображати на розрахунковій схемі еквівалентними складовими, прикладеними в певних точках і являють проекції результуючих сил на осі інерціальної системи координат.

Стріла крана є абсолютно жорсткою конструкцією, що характеризується моментом

інерції; координатами центру мас ланки; масою m .

За узагальнені координати приймаються: кут $\Delta\alpha_C$ відхилення осі стріли від її встановленого гідроциліндром положення – від установчого кута α_C та вертикальне переміщення Δz_B вантажу, яке обумовлене лише пружними деформаціями розтягу вільних ділянок троса ($\Delta z_B \leq 0$) або їх прослабленням ($\Delta z_B \geq 0$).

Сумарна кінетична енергія механічної системи “стріла крана – вільні ділянки троса основної лебідки – вантаж”:

$$T_{\Sigma} = T_C + T_B = \frac{1}{2} \cdot J_C \cdot \omega_{C.P.}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_B \cdot v_{B.P.}^2 = \frac{1}{2} \cdot J_C \cdot \left[\frac{d}{dt}(\Delta\alpha_C) \right]^2 + \frac{1}{2} \cdot m_B \cdot \left[v_T + \frac{d}{dt}(\Delta z_B) \right]^2; \quad (1)$$

де J_C – момент інерції стріли крана відносно осі, що проходить через центр її шарнірного кріплення до БРЕМ і яка перпендикулярна до площини рисунку; приймаючи погонну масу стріли сталою величиною, її момент інерції дорівнює:

$$J_C = \frac{1}{3} \cdot m_C \cdot L_C^2.$$

Компоненти лівих частин рівняння Лагранжа другого роду мають вигляд:

$$\frac{\partial T_{\Sigma}}{\partial(\Delta\alpha_C)} = 0; \quad \frac{\partial T_{\Sigma}}{\partial(\Delta z_B)} = 0; \quad \frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T_{\Sigma}}{\partial \left[\frac{d}{dt}(\Delta\alpha_C) \right]} \right\} = \frac{d}{dt} \left[J_C \cdot \frac{d}{dt}(\Delta\alpha_C) \right] = J_C \cdot \frac{d^2}{dt^2}(\Delta\alpha_C);$$

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T_{\Sigma}}{\partial \left[\frac{d}{dt}(\Delta z_B) \right]} \right\} = \frac{d}{dt} \left\{ m_B \cdot \left[v_T + \frac{d}{dt}(\Delta z_B) \right] \right\} = m_B \cdot \frac{d^2}{dt^2}(\Delta z_B). \quad (2)$$

На можливій зміні $\delta(\Delta\alpha_C)$ узагальненої координати $\Delta\alpha_C$ виконують роботу $\delta A_{\delta(\Delta\alpha_C)}$ сили: $P_{T.P.}$ – сила натягу вільних ділянок троса; $P_{Ц.P.}$ – сила з боку штока силового гідроциліндра; G_C – вага стріли крана. На можливій зміні $\delta(\Delta z_B)$ узагальненої координати Δz_B виконують роботу $\delta A_{\delta(\Delta z_B)}$ сили: $P_{T.P.}$ – сила натягу вільних ділянок троса; G_B – вага вантажу. Узагальнені сили $Q_{\Delta\alpha_C}, Q_{\Delta z_B}$, які відповідають узагальненим координатам $\Delta\alpha_C, \Delta z_B$ дорівнюють:

$$Q_{\Delta\alpha_C} = \frac{\delta A_{\delta(\Delta\alpha_C)}}{\delta(\Delta\alpha_C)} = P_{T.P.} \cdot (\sin \gamma_{T.C.P.} - \sin \gamma_{C.T.P.}) \cdot L_C + P_{Ц.P.} \cdot \sin \gamma_{C.Ц.P.} \cdot l_C - G_C \cdot \cos \alpha_{C.P.} \cdot \frac{L_C}{2}; \quad (3)$$

$$Q_{\Delta z_B} = \frac{\delta A_{\delta(\Delta z_B)}}{\delta(\Delta z_B)} = P_{T.P.} - G_B; \quad (4)$$

де $P_{T.P.} = \begin{cases} 0 & \text{коли } \Delta z_B \geq 0; \\ c_{T.P.} \cdot \Delta z_B \leq 0; \end{cases}$; $c_{T.P.} = \frac{c_{T.Поз.}}{L_{A5.A3.A6.P.}}$ – поточне значення коефіцієнта сумарної жорсткості вільних пружних ділянок троса поточної довжини; $L_{A5.A3.A6.P.}$ – поточне значення сумарної довжини вільних ділянок троса; $P_{Ц.P.} = F_{Ц.Пруж.} - F_{Ц.Он.Вяз.} - F_{Ц.Он.Сух.}$; $F_{Ц.Пруж.}$ – сила пружних деформацій рідини гідроциліндра; $F_{Ц.Он.Вяз.} = h_{Ц.} \cdot \frac{d}{dt}(\Delta l_{Ц.})$ – сила в'язкого тертя між поршнем та внутрішньою стінкою гідроциліндра; $h_{Ц.}$ – коефіцієнт в'язкого тертя; $F_{Ц.Он.Сух.} = (F_{Ц.Он.Сух.}^0 + k_{Ц.Ш.} \cdot p_{Ц.Ш.}) \cdot \text{sign} \left[\frac{d}{dt}(\Delta l_{Ц.}) \right]$ – сила сухого тертя пружного ущільнення штоку поршня гідроциліндра; $F_{Ц.Он.Сух.}^0$ – сила сухого тертя при відсутності тиску в штоковій порожнині гідроциліндра; $k_{Ц.Ш.}$ – коефіцієнт пропорційності між тиском штокової порожнини та силою сухого опору в ущільненні; $p_{Ц.Ш.}$ – тиск в ній.

Об'єднуючи ліві частини (1) ÷ (2) рівняння Лагранжа другого роду з відповідними правими частинами (3), (4), отримаємо математичну модель руху стріли крана БРЕМ.

2. Методика моделювання підсистеми гідроприводу основана на розбитті схеми гідроприводу на функціональні елементи. До цих елементів відносяться: гідронасос, гідроциліндр, гідролінії низького та високого тисків.

Математична модель підсистеми гідроприводу записується при наступних допущеннях [4, 5]:

- нерівномірність подачі робочої рідини внаслідок кінематики рідини та конструкції самого насоса не враховується;
- вплив стискання рідини у робочих порожнинах насоса не враховується.
- гідропривод складається з простих ділянок невеликої загальної довжини;
- зміни швидкості робочої рідини в трубопроводах малі;
- хвильові процеси у робочих рідинах трубопроводів не враховуються оскільки довжини трубопроводів малі;
- втрати тиску робочої рідини за довжинами трубопроводів залежать від середнього значення витрат рідини на їх кінцях;
- інерційні сили робочої рідини у трубопроводах не враховано.
- пружне ущільнення між штоком поршня та корпусом гідроциліндра не допускає втрат робочої рідини, але створює сухе тертя між ними, яке залежить від тиску у їх робочій порожнині гідроциліндру;
- між поршнем та внутрішніми стінками гідроциліндра діють сили вязкого опору, що залежать від їх відносної швидкості;
- корпус гідроциліндра є інерційним тілом, що має радіальну пружність.

3. Врахування основних чинників, що впливають на динамічну систему крана, є важливим завданням дослідження СВК. Для моделювання впливу зовнішніх сил при дослідженні динамічних систем часто використовуються прості детерміновані функції: гармонійний сигнал; імпульс; лінійна функція; ступінчаста дія; трапецієвидна функція.

Зовнішні дії можуть задаватися у вигляді масивів значень t і $f(t)$ з інтерполяцією значень в проміжних точках; або значеннями в проекціях на осі систем координат.

Управління моделлю (розв'язком системи рівнянь) гідроприводу здійснюється генеруванням керуючих дій: параметрів регулювання гідронасоса, тисків гідроциліндрів. Формування керуючих дій задається наново на кожному кроці часу залежно від характеру розглянутих зовнішніх збурень у вигляді наведених вище функцій часу чи функцій, апроксимованих кінцевим набором точок.

4. Задання параметрів моделювання (граничних умов, кроку інтегрування, параметрів виведення результатів і т.д.) здійснюється в середовищі програмування.

5. Характер розвитку процесів залежить ще і від початкових умов. Підйом вантажу складається з послідовних процесів. Вихідними умовами наступних процесів початку операції підйому вантажу є кінцеві умови попередніх процесів. Наприклад, початковими умовами підйому БРЕМ загрузлого вантажу другого процесу є кінцеві умови першого, початковими умовами третього – кінцеві умови другого, початковими умовами четвертого – кінцеві умови третього процесу.

6. Проведення обчислювального експерименту. Для прикладу промодельовано початок операції підйому з підхопленням стрілою гідрокрана вантажа із жорсткої опори (рис. 1).

$$\text{Динамічне перевантаження ланок гідрокрана: } k_{\text{дин.перев}} = \frac{F_{\text{пруж.н}}}{G_6} = \frac{2920.93}{2452.5} = 1.19.$$

При підйомі вантажу можна зробити висновок, що динамічні зусилля при підйому вантажу із жорсткої опори приводить до перевантаження ланок гідрокрана на 20%.

Для дослідження і аналізу роботи підйомно-транспортного обладнання БРЕМ розроблено математичну модель, яка враховує особливості його експлуатації. Математична модель містить механічну і гідравлічну підсистеми, підсистему задання параметрів моделювання і підсистему задання чисельних значень параметрів обладнання і початкових умов. Модель дозволяє досліджувати різні експлуатаційні режими роботи обладнання. Як приклад

розглянуто режим підйому вантажу із жорсткої опори.

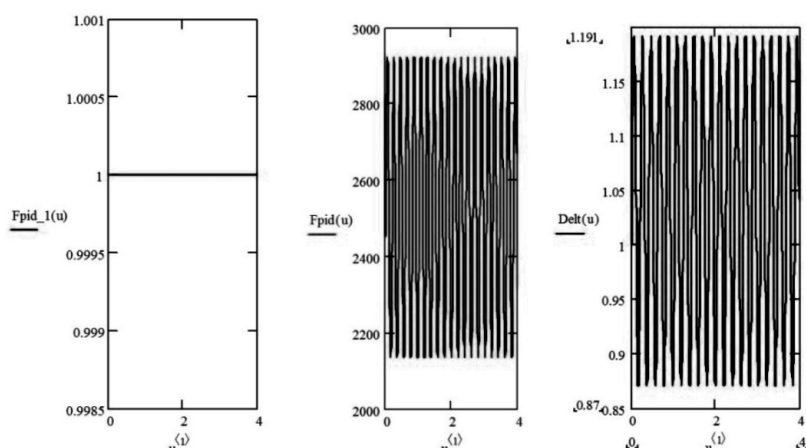


Рис.1. Моменти в часі $t = u^{(1)}$ роботи $Fpid_1(u) = 1$ і прослаблення $Fpid_1(u) = 0$ підвісу; пружні сили $Fpid(u)H$, які діють у ньому, та зміна коефіцієнта $k_{дин.перев} = Delt(u)$ динамічного перевантаження ланок гідрокрана з моменту підхоплення вантажу із жорсткої опори

Список літератури:

1. *Калінін О. М. Ситуаційні моделі застосування броньованих ремонтно-евакуаційних машин / О. М. Калінін, П. О. Русіло, Ю. В. Варванець, В. В. Костюк // Вісник НТУ "ХПІ", 2014. - № 29. - С. 58-63.*
2. *Щербаков В.С. Система автоматизированного моделирования стрелового грузоподъемного крана: Монография. / В.С. Щербаков, С.А. Зырянова, М.С. Корытов. – Омск: СибАДИ, 2009. – 106 с.*
3. *Петренко Ю. Н. Исследование работы мостового крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели / Ю. Н. Петренко, С. Э. Алави, С. В. Александровский // Известия ВУЗ и энергетических объединений СНГ - Энергетика: МНТЖ. - 2011. - №3. - С.20-25.*
4. *Ерофеев Н. И. Математическая модель режима работы крановых установок // Автомат. и телемех., 1967, № 3, С.160–166.*
5. *Черевко Ю.М. Моделювання роботи ремонтно-евакуаційної машини при евакуації застряглої техніки / Ю.М. Черевко // Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса). – 2015. – Вип. №2(4). С. 82–92.*