

О. В. Березюк, д-р техн. наук, доц.; В. Є. Яворський

УДОСКОНАЛЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ГІДРОПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У СМІТТЄВОЗІЗ УРАХУВАННЯМ ЗНОСУ ПАР ТЕРТЯ

Стаття присвячена побудові та дослідженню удосконаленої нелінійної математичної моделі роботи гідроприводу механізму завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз, яка враховує знос пар тертя. Запропонована математична модель дозволила чисельно дослідити динаміку цього приводу під час пуску та визначити, що врахування зносу пар тертя суттєво впливає на основні параметри гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз. Побудовано графічні залежності для порівняння зміни основних параметрів гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз без урахування зносу пар тертя та з урахуванням зносу. Також визначено регресійну залежність тривалості перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз від зносу гідроциліндра. Під час визначення регресійної залежності тривалості перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз від зносу гідроциліндра використано метод регресійного аналізу результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором більш раціонального виду функції із 16-ти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції. Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівняння регресії здійснювалось методом найменших квадратів за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz", яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір. Отримано адекватну регресійну залежність, що описує тривалість перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз від зносу гідроциліндра. Побудовано графічну залежність, що описує тривалість перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз від зносу гідроциліндра та дозволяє наочно проілюструвати цю залежність, показати достатню збіжність теоретичних та фактичних результатів на рівні 0,99. Встановлено, що тривалість перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз при збільшенні зносу гідроциліндра зростає за степеневою залежністю.

Ключові слова: знос, математична модель, гідропривід, механізм завантаження, тверді побутові відходи, сміттєвоз.

Вступ

Серед актуальних завдань комунального машинобудування України, зокрема для мобільного обладнання маніпуляторного типу, до яких відносяться сміттєвози, питання підвищення зносостійкості, надійності та довговічності деталей машин займають чільне місце [1, 2]. Збирання та транспортування твердих побутових відходів (ТПВ) до місць подальшого поводження з ними в Україні здійснюється переважно кузовними сміттєвозами, робочі органи завантаження яких виконано у вигляді маніпуляторів, а привод яких гідравлічний [3 - 7]. В Україні використовуються майже 3700 сміттєвозів, які здатні ущільнювати ТПВ, зменшуючи витрати на транспортування та необхідні площі полігонів для захоронення. При цьому в момент виконання технологічної операції завантаження ТПВ у сміттєвоз вузли тертя у вигляді шарнірних з'єднань його маніпулятора зазнають інтенсивного зношування. Це пов'язано зі значною масою контейнера з ТПВ (до 500 кг), що піднімається, роботою в реверсному режимі (зворотно-обертального руху), значною кількістю робочих циклів за один рейс, а також роботою в умовах широкого діапазону

перепаду відносної вологості, температур, а також запиленості навколишнього середовища. Погіршення якості матеріалів або недостатнє мащення призводить до збільшення сил тертя у шарнірних з'єднаннях та зростання вібрацій у системі, що, в свою чергу, може вплинути на динамічну стійкість маніпулятора та його здатність витримувати високі навантаження в умовах реверсивного тертя.

Постановка проблеми

Знос вузлів тертя може впливати на ефективність та безпеку роботи маніпулятора сміттєвоза, що може мати негативні наслідки як для операторів, так і навколишнього середовища. Тому побудова та дослідження удосконаленої нелінійної математичної моделі роботи гідроприводу механізму завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз, яка враховує знос пар тертя є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У матеріалах наукової статті [8] досліджено працездатність шарнірів реверсивного тертя в системах керування транспортних машин в різноманітних умовах експлуатації. Зазначено, що шарнірні вузли та з'єднання відносяться до найвідповідальніших і високонавантажених силових з'єднань машин промислового транспорту, а також є найбільш металомісткими і найбільш навантаженими елементами машин, що з'єднують між собою основні конструктивні елементи та функціональні вузли. В результаті аналізу зносу деталей реверсивних шарнірів транспортних машин в умовах корозійно-абразивного середовища, помічено їхній підвищений знос та ненадійність в роботі. Дослідження наявних навантажень деталей шарнірів зчіпних пристроїв дозволило встановити, що в парі тертя має місце пластичний контакт, який призводить до підвищеного зносу поверхонь тертя. Запропоновано вдосконалення конструкції шарнірів, що забезпечують автокомпенсацію зносу поверхонь тертя спряжених деталей та покращують їхню роботу шляхом постійної подачі мастила в зону тертя.

У роботі [9] описано метод оптимізації роботизованої комірки шляхом зміни розміщення робота-маніпулятора в комірці в програмах із фіксованою траєкторією кінцевої точки. Мета дослідження полягала в тому, щоб зменшити загальний знос з'єднань робота та запобігти нерівномірному зношенню з'єднань, коли одне або декілька з'єднань перебувають під більшим навантаженням, ніж інші. Зношення з'єднання апроксимувалось шляхом розрахунку інтегралу механічної роботи кожного з'єднання по всій траєкторії, який залежить від кутової швидкості та крутного моменту. Метод ґрунтується на використанні динамічного моделювання для оцінки крутних моментів і швидкостей у з'єднаннях робота для окремих його положень. Встановлено, що за умови правильного розміщення основи робота загальний знос з'єднань роботизованої руки робота-маніпулятора можна зменшити на 22...53 % залежно від траєкторії.

У роботі [10] визначено адекватну за критерієм Фішера закономірність максимальних ударних динамічних напружень в найбільш навантаженому перерізі стріли маніпулятора сміттєвоза від зносу шарніра маніпулятора та рівня його навантаженості. Встановлено, що за критерієм Стюдента серед досліджених факторів впливу найбільше на максимальні ударні динамічні напруження в найбільш навантаженому перерізі стріли маніпулятора впливає знос шарніра маніпулятора, а найменше – рівень його навантаженості. Показано поверхню відгуку цільової функції – максимальних ударних динамічних напружень в найбільш навантаженому перерізі стріли маніпулятора та їхні двомірні перерізи в площинах параметрів впливу, які дозволяють наочно проілюструвати вказану залежність цієї цільової функції від окремих

параметрів впливу. Встановлено, що знос шарніра на 1000 мкм призводить до зростання максимальних ударних динамічних напружень в найбільш навантаженому перерізі стріли маніпулятора сміттевоза в 2,6...4 рази в залежності від рівня його навантаженості. Показано доцільність проведення подальших досліджень впливу антифрикційних матеріалів на знос вузлів тертя механізму завантаження твердих побутових відходів у сміттевоз.

В статті [11] проаналізовано види зношування шарнірних з'єднань лісових маніпуляторів, що дозволило визначити можливі шляхи підвищення їхньої зносостійкості, які допоможуть інженерам-конструкторам збільшити робочий ресурс шарнірних з'єднань залежно від вимог, що висувуються до них у процесі роботи. Зазначено, що машини маніпуляторного типу часто працюють в умовах перепаду температур навколишнього середовища, що негативно позначається на властивостях мастила та матеріалів шарнірів. За низької температури матеріали пар, що труться, стають більш крихкими, знижується межа плинності та підвищується жорсткість робочих поверхонь. Це ускладнює процеси руху та анігіляції дислокацій, виникнення екзоелектронної емісії та, у свою чергу, інтенсифікує процес зношування. За низької температури навколишнього середовища твердне мастило або підвищується його в'язкість, істотно знижуючи його мастильні властивості. У літній час, за високих температурних показників, мастильний матеріал нагрівається і відбувається довільне його витікання із зони тертя, що негативно позначається на процесі мащення та охолодження робочих поверхонь. Для запобігання цьому запропоновано захищати спеціальними ущільнювальними пристроями шарнірні з'єднання маніпуляторів від забруднюючого та корозійного впливу навколишнього середовища, а також від витoku мастильного матеріалу. Встановлено доцільність введення у конструкцію шарнірів контактних та лабіринтних ущільнюючих пристроїв.

У науковій роботі [12] запропонована математична модель для визначення геометричних параметрів елементів конструкції маніпулятора залежно від максимального вильоту, вантажопідйомності та інших кінематичних параметрів машини. Враховуючи періодичність роботи шарнірних з'єднань маніпуляторів, зазначено, що гідродинамічного процесу тертя в них немає, оскільки процес протікає в умовах напівсухого і граничного тертя. На відміну від усталеного гідродинамічного процесу тертя, робота підшипників ковзання при напівсухому і граничному терті збільшує знос поверхонь тертя. Це, у свою чергу, спричиняє порушення кінематичної точності, виникають додаткові динамічні навантаження, удари, вібрації, які призводять до фреттинг-корозії та руйнування. Запропоновано досягати зменшення сили тертя за допомогою застосування свинцевих, фосфатних, індієвих покриттів спряжених деталей шарнірів маніпуляторів. Встановлено, що контактне зношування можна зменшити шляхом введення мастил на масляній і жировій основі або за допомогою консистентних мастил, які за температури 25 °C приймають густу мазеподібну консистенцію. Визначено доцільність використання фосфатних та анодних металевих покриттів для кращого утримання мастила на поверхні.

У матеріалах статті [13] описано метод синтезу траєкторії руху маніпуляційного робота за ступенями рухливості. Встановлено, що згин штока викликає опорні реакції у зоні контакту, як у балці на двох опорах. Після визначення контактного тиску можна встановити можливості зносу поверхонь гідроциліндра, штока і ґрундбукси. Виявлено, що контактне напруження, досягаючи третини межі міцності, при повній безпеці штока від згину може викликати значне прискорення зносу поверхонь тертя. Це дозволяє провести уточнення причини виявлених картин зносу та особливості їхньої ідентифікації.

У роботі [14] встановлено, що під час створення нових перспективних конструкцій шарнірних з'єднань необхідно застосовувати комплексний підхід до науково-технічних рішень для врахування значного числа параметрів, які впливають на їхню працездатність. В

результаті цього можливо створення нових конструктивних рішень, що забезпечують підвищену працездатність шарнірних з'єднань маніпуляторів лісозаготівельних машин. Вони дозволяють в істотній мірі підвищити механічні і триботехнічні характеристики, а також оптимізувати тепловий режим роботи вузла.

Авторами статті [15] вказано, що використання пластиків як антифрикційного матеріалу скасовує потребу в періодичному постачанні змащування у зазор шарнірного з'єднання. Як результат, потреба в масляних каналах зникає. Крім того, метали, з яких виготовляється вал, і охоплююча провущина спрягається з більш м'яким антифрикційним матеріалом, отже, зношування поверхневих шарів частин, що спрягається, через еластичні та пластичні деформації відбуватимуться переважно в антифрикційній втулці, меншою мірою передаючись на палець і охоплюючу провущину. Антифрикційні матеріали можуть значно збільшити робочий ресурс шарнірних з'єднань.

В науковій роботі [16], завдяки використанню регресійного аналізу, вдалось визначити закономірність, що описує та дозволяє прогнозувати динаміку зношеності сміттевозів у цілому у Хмельницькій області, а також планувати інфраструктуру (склад та оновлення сміттевозів, виробничу базу для технічного обслуговування і ремонту) комунальних підприємств, що необхідно для вирішення проблеми поводження з твердими побутовими відходами.

В матеріалах статті [17] наведено результати аналізу конструкцій захватів маніпуляторів кузовних сміттевозів. Показано результати дослідження надійності сміттевозів. Розроблено розрахункову схему сміттевоза як коливальної системи. Встановлено характер коливань рами сміттевоза у робочому режимі. Виявлено закономірності формування зусиль у системі «захват – бак – захват». Встановлено, що максимальні навантаження виникають на тязі та штокові гідроциліндра, які зі збільшенням маси контейнера зростають. Зміна маси сміттевозу не впливає на величину та амплітуду навантажень, а змінюється лише їхня частотна характеристика. В результаті проведення спостережень за сміттевозами виявлено, що найбільше число відмов виникає через знос та корозію робочих поверхонь деталей робочого обладнання. 32 % від усіх поломок деталей гідроприводу становлять відмови гідроциліндрів, викликані зносом робочих поверхонь спряжень, деформаціями штока та циліндра в процесі експлуатації, що викликано нерівномірним завантаженням кузова, а також абразивним зносом робочих поверхонь у важких умовах роботи сміттевоза. Основною причиною є знос робочих поверхонь основних деталей в конструкції гідроприводу, а саме золотників і корпуса гідророзподільників, штоків гідроциліндрів тощо, а також гідроабразивне пошкодження внаслідок несвоєчасної заміни робочої гідравлічної рідини та використання неякісних або зношених ущільнювальних деталей таких як сальники гідроциліндрів, що спричиняє потрапляння в зону ковзання частинок пилу і продуктів зносу, які призводять до прискорення процесу зносу робочих поверхонь деталей. З метою отримання хромованих покриттів з високими якістю осаду та продуктивністю пропонується хромування в холодному саморегульованому електроліті, як один із найперспективніших способів відновлення зношених деталей.

Однак конкретної математичної моделі, що описує роботу гідроприводу механізму завантаження твердих побутових відходів у сміттевоз і враховує знос пар тертя, в результаті аналізу відомих публікацій, авторами не виявлено.

Мета і завдання статті

Метою цієї статті є побудова та дослідження удосконаленої нелінійної математичної моделі роботи гідроприводу механізму завантаження твердих побутових відходів у

сміттєвоз, яка враховує знос пар тертя.

Методи і матеріали

На рис. 1 наведена розрахункова схема роботи гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз [18].

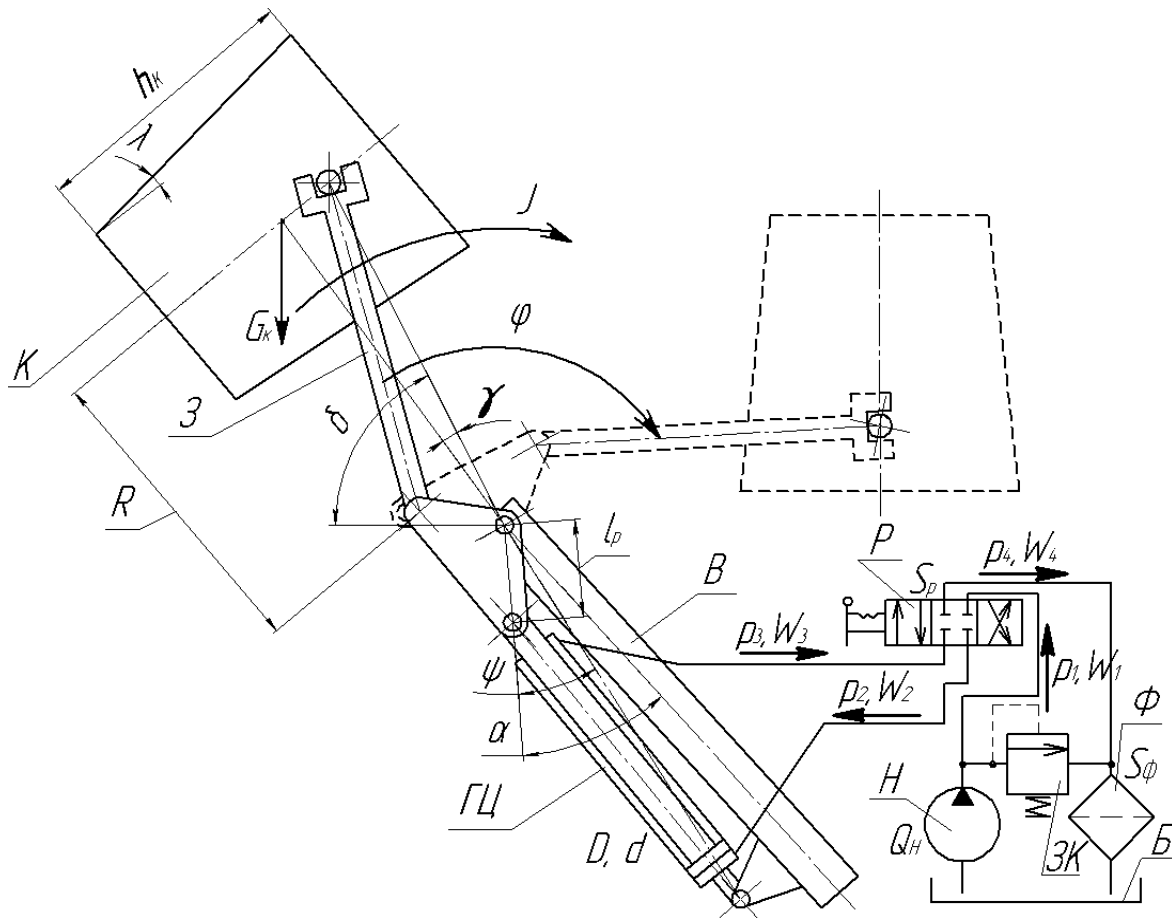


Рис. 1. Розрахункова схема роботи гідроприводу перевертання контейнера

На схемі позначені структурні елементи та величини: К – контейнер, З – захват, В – важіль, ГЦ – гідроциліндр, Р – гідророзподільник, Н – гідронасос, ЗК – запобіжний клапан, Ф – фільтр, Б – бак із робочою рідиною, а також основні геометричні, кінематичні та силові параметри: p_1, p_2, p_3, p_4 – тиски відповідно на виході Н, на вході ГЦ, на виході ГЦ та на вході Ф; W_1, W_2, W_3, W_4 – об'єми трубопроводів між Н та Р, Р та входом ГЦ, виходом ГЦ та Р, Р та Ф; Q_H – фактична подача Н; S_P – площа прохідного отвору Р; S_ϕ – площа поверхні фільтруючого елемента; D, d – діаметри поршня та штока; J – момент інерції рухомих елементів; G_K – вага К; R – радіус обертання рухомих елементів; l_P – відстань між центрами обертання З та штока; h_K – висота К; α – кут між осями В та плеча ГЦ; γ – кут, що враховує відхилення положення центра мас; δ – кут між плечем З та горизонталлю; λ – кут нахилу стінки К; ψ – кут між віссю плеча ГЦ та віссю, що проходить між центрами обертання З та ГЦ; ϕ – кут повороту З.

Технологічна операція перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз може бути описана відповідною системою нелінійних диференціальних рівнянь (1 – 6) з відповідними граничними умовами (7) [18]:

$$\begin{cases}
 Q_H = \mu S_p \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} + \sigma(p_1 - p_2) + KW_1 \frac{dp_1}{dt}; & (1) \\
 \mu S_p \mu S_p \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \dot{\phi} l_p \frac{\pi D^2}{2} \sin(\psi + \phi) + \sigma(p_2 - p_3) + KW_2 \frac{dp_2}{dt}; & (2) \\
 2\dot{\phi} l_p (D^2 - d^2) \sin(\psi + \phi) = \mu S_p \sqrt{\frac{2(p_3 - p_4)}{\rho}} + \sigma(p_3 - p_4) + KW_3 \frac{dp_3}{dt}; & (3) \\
 \mu S_p \sqrt{\frac{2(p_3 - p_4)}{\rho}} = k_\phi \frac{p_4}{\mu_\Delta} S_\phi + \sigma p_4 + KW_4 \frac{dp_4}{dt}; & (4) \\
 \frac{\pi[p_2 D^2 - p_3 (D^2 - d^2)]}{4} l_p \sin(\alpha + \phi) = J \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \beta l_p^2 \sin(\alpha + \phi) \sin(\psi + \phi) \frac{d\phi}{dt} + \\
 + \left[GR - 1(\delta + \phi - \lambda) \frac{V_K \rho_B x (1 + 2tg\lambda) Rg}{h_K} \right] \cos(\phi + \delta - \gamma); & (5) \\
 \left(\frac{d\phi}{dt} R \right)^2 / 2 + g \sin(\delta + \phi - \lambda) x = \frac{d^2 x}{dt^2} x + f_B g \cos(\delta + \phi - \lambda) x, \text{ при } \delta + \phi - \lambda > 0; & (6) \\
 0 \leq \{p_1, p_2, p_3, p_4\} \leq p_{зк}; 0 \leq \phi \leq \gamma; 0 \leq x \leq x_{max}, & (7)
 \end{cases}$$

де 1() – одинична функція.

В статті [19] визначено закономірність зносу вузлів тертя механізму завантаження сміттєвоза від властивостей антифрикційних матеріалів

$$u = 458,2f + 0,1696HB + 4366v - 546,2p + 33782fv \text{ [мкм]}, \quad (8)$$

де f – коефіцієнт тертя пари сталь – антифрикційний матеріал; HB – твердість антифрикційного матеріалу за Бринелем, МПа; v – швидкість ковзання, м/с; p – тиск в зоні тертя, МПа.

Коефіцієнт втрат РР на перетікання з області високого тиску в область низького тиску із урахуванням зносу пар тертя може бути визначений за формулою [20]

$$\sigma = \frac{\pi D \delta^3}{12 \nu \rho l} = \frac{\pi D (\delta_0 + u)^3}{12 \nu \rho l} \text{ [м}^5\text{/(Н·с)]}, \quad (9)$$

де δ_0 – номінальний розмір зазору, м; ν – кінематична в'язкість РР, м²/с, l – довжина кільцевого зазору, м.

Для дослідження удосконаленої нелінійної математичної моделі роботи перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз із урахуванням зносу пар тертя у вигляді системи звичайних нелінійних диференціальних рівнянь з відповідними граничними умовами, використано чисельний метод Рунге-Кутта-Фельберга 4-го порядку зі змінним кроком інтегрування.

Для визначення регресійної залежності тривалості перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз від зносу гідроциліндра використано такі методи: регресійний

аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей, комп'ютерне моделювання.

Результати досліджень

Після підстановки формул (8), (9) в рівняння (1) – (4) удосконалена нелінійна математична модель роботи гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз із урахуванням зносу пар тертя має вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} & Q_H = \mu S_P \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} + (p_1 - p_2) \times \\ & \times \frac{\pi D \left\{ \delta_0 + 10^{-6} \left[458,2f + 0,1696HB + 4366(1 + 7,738f) \frac{dx}{dt} - 5,462 \cdot 10^{-4} p_1 \right] \right\}^3}{12\nu\varrho l} + KW_1 \frac{dp_1}{dt}; \quad (10) \\ & \mu S_P \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} = \phi l_P \frac{\pi D^2}{2} \sin(\psi + \varphi) + (p_2 - p_3) \times \\ & \times \frac{\pi D \left\{ \delta_0 + 10^{-6} \left[458,2f + 0,1696HB + 4366(1 + 7,738f) \frac{dx}{dt} - 5,462 \cdot 10^{-4} p_2 \right] \right\}^3}{12\nu\varrho l} + KW_2 \frac{dp_2}{dt}; \quad (11) \\ & 2\phi l_P (D^2 - d^2) \sin(\psi + \varphi) = \mu S_P \sqrt{\frac{2(p_3 - p_4)}{\rho}} + (p_3 - p_4) \times \\ & \times \frac{\pi D \left\{ \delta_0 + 10^{-6} \left[458,2f + 0,1696HB + 4366(1 + 7,738f) \frac{dx}{dt} - 5,462 \cdot 10^{-4} p_3 \right] \right\}^3}{12\nu\varrho l} + KW_3 \frac{dp_3}{dt}; \quad (12) \\ & \mu S_P \sqrt{\frac{2(p_3 - p_4)}{\rho}} = k_\phi \frac{p_4}{\mu_d} S_\phi + p_4 \times \\ & \times \frac{\pi D \left\{ \delta_0 + 10^{-6} \left[458,2f + 0,1696HB + 4366(1 + 7,738f) \frac{dx}{dt} - 5,462 \cdot 10^{-4} p_4 \right] \right\}^3}{12\nu\varrho l} + KW_4 \frac{dp_4}{dt}; \quad (13) \\ & \frac{\pi[p_2 D^2 - p_3(D^2 - d^2)]}{4} l_P \sin(\alpha + \varphi) = J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \beta l_P^2 \sin(\alpha + \varphi) \sin(\psi + \varphi) \frac{d\varphi}{dt} + \\ & + \left[GR - 1(\delta + \varphi - \lambda) \frac{V_K \rho_B x(1 + 2tg\lambda) Rg}{h_K} \right] \cos(\varphi + \delta - \gamma); \quad (14) \\ & \left(\frac{d\varphi}{dt} R \right)^2 / 2 + g \sin(\delta + \varphi - \lambda) x = \frac{d^2 x}{dt^2} x + f_B g \cos(\delta + \varphi - \lambda) x, \text{ при } \delta + \varphi - \lambda > 0; \quad (15) \\ & 0 \leq \{p_1, p_2, p_3, p_4\} \leq p_{3K}; 0 \leq \varphi \leq \gamma; 0 \leq x \leq x_{max}. \quad (16) \end{aligned} \right.$$

Порівняння зміни основних параметрів гідроприводу перевертання контейнера під час

завантаження ТПВ у сміттевоз без урахування зносу та з урахуванням зносу пар тертя показано на рис. 2. Графічні залежності, показані на рис. 2, отримані для параметрів приводу, що відповідають реальній серійній моделі сміттевоза КО-436 виробництва ТОВ “Турбівський машинобудівний завод” (БАТ “АТЕКО”): $W_1 = 1,48$ л; $W_2 = 1,23$ л; $W_3 = 1,23$ л; $W_4 = 1$ л; $S_p = 5,02 \cdot 10^{-5}$ м²; $S_\phi = 3,49 \cdot 10^{-2}$ м²; $k_\phi = 6,13 \cdot 10^{-9}$ м; $\mu_0 = 8,9 \cdot 10^{-2}$ Н·с/м²; $\delta_0 = 0,136$ мм; $l_p = 150$ мм; $l = 35$ мм; $D = 80$ мм; $d = 50$ мм; $\alpha = 40^\circ$; $\gamma = 20^\circ$; $\delta = 65^\circ$; $\psi = 30^\circ$; $J = 112,6$ кг·м²; $GR = 1254$ Н·м; $t_0 = 0$ с; $p_{10} = 0$ МПа; $p_{20} = 0$ МПа; $p_{30} = 0$ МПа; $p_{40} = 0$ МПа; $\omega_0 = 0$ рад/с; $\varphi_0 = 0$ рад.

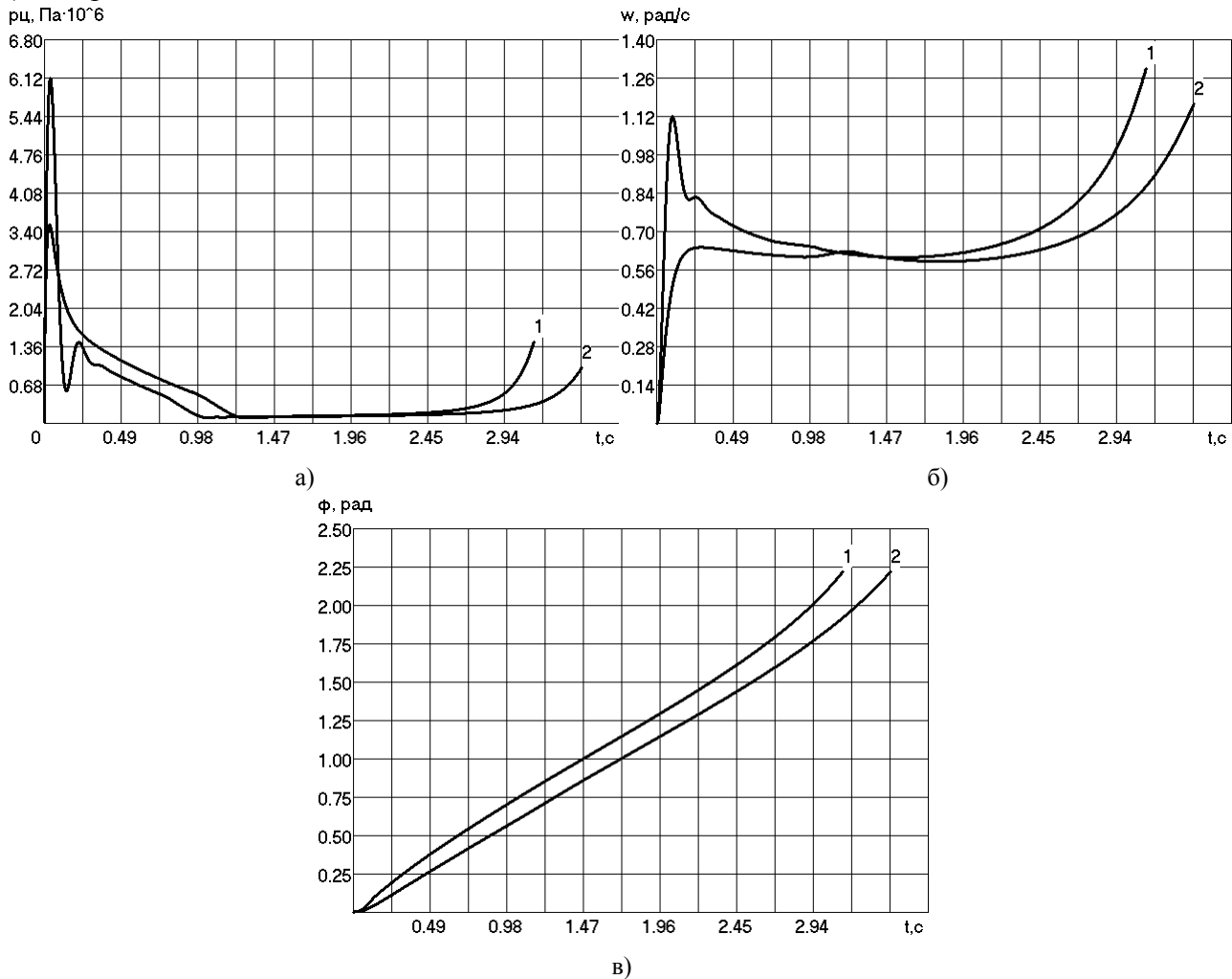


Рис. 2. Порівняння зміни основних параметрів гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттевоз 1 – без урахування зносу пар тертя та 2 – з урахуванням зносу пар тертя: а) зміна тиску в гідроциліндрі; б) кутова швидкість перевертання контейнера в процесі роботи; в) зміна кута перевертання контейнера

Як видно із рис. 2, врахування зносу пар тертя в удосконаленій математичній моделі суттєво впливає на основні параметри гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттевоз.

У таблиці 1 наведені значення тривалості перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттевоз за різного зносу гідроциліндра.

На основі даних таблиці 1 планувалось отримати парну регресійну залежність тривалості перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттевоз від зносу гідроциліндра.

Регресія проводилась на основі лінеаризувальних перетворень, які дозволяють звести

нелінійну залежність до лінійної. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії здійснювалась методом найменших квадратів [21] за допомогою розробленої комп'ютерної програми "RegAnaliz" [22], яка захищена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір, і детально описана в роботі [23, 24].

Таблиця 1

Значення тривалості перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз за різного зносу гідроциліндра

Знос гідроциліндра, мкм	0	5	10	15	20	25	30
Тривалість перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз, с	3,132	3,154	3,179	3,206	3,235	3,268	3,304
Знос гідроциліндра, мкм	35	40	45	50	55	60	65
Тривалість перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз, с	3,344	3,388	3,437	3,493	3,556	3,629	3,715
Знос гідроциліндра, мкм	70	75	80	85	90		
Тривалість перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз, с	3,818	3,946	4,115	4,360	4,809		

Програма "RegAnaliz" дозволяє проводити регресійний аналіз результатів однофакторних експериментів та інших парних залежностей із вибором найбільш адекватного виду функції із 16-ти найпоширеніших варіантів за критерієм максимального коефіцієнту кореляції зі збереженням результатів в форматі MS Excel та Bitmap.

Результати регресійного аналізу наведені в таблиці 2, де сірим кольором позначено комірку з максимальним значенням коефіцієнта кореляції R .

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу залежності тривалості перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз від зносу гідроциліндра

№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R	№	Вид регресії	Коефіцієнт кореляції R
1	$y = a + bx$	0,91164	9	$y = ax^b$	0,26110
2	$y = 1 / (a + bx)$	0,95502	10	$y = a + b \cdot \lg x$	0,24203
3	$y = a + b / x$	0,24105	11	$y = a + b \cdot \ln x$	0,24344
4	$y = x / (a + bx)$	0,98057	12	$y = a / (b + x)$	0,95502
5	$y = ab^x$	0,93532	13	$y = ax / (b + x)$	0,27908
6	$y = ae^{bx}$	0,93532	14	$y = ae^{b/x}$	0,26008
7	$y = a \cdot 10^{bx}$	0,93532	15	$y = a \cdot 10^{b/x}$	0,26008
8	$y = 1 / (a + be^{-x})$	0,28084	16	$y = a + bx^n$	0,99001

Отже, за результатами регресійного аналізу на основі даних таблиці 1, як найбільш, адекватну остаточно прийнято таку регресійну залежність

$$t = 3,223 + 6,047u^{3,264} \quad [c], \quad (17)$$

де t – тривалість перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз, с; u – знос гідроциліндра, мкм.

Показане на рис. 3 порівняння фактичних та теоретичних даних показало, що тривалість перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз від зносу гідроциліндра, розрахована за допомогою рівняння регресії (17), несуттєво відрізняються від даних, отриманих в результаті чисельного дослідження удосконаленої математичної моделі (10) - (16).

Аналіз графічної залежності на рис. 3 показав, що тривалість перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз при збільшенні зносу гідроциліндра зростає за степеневою залежністю.

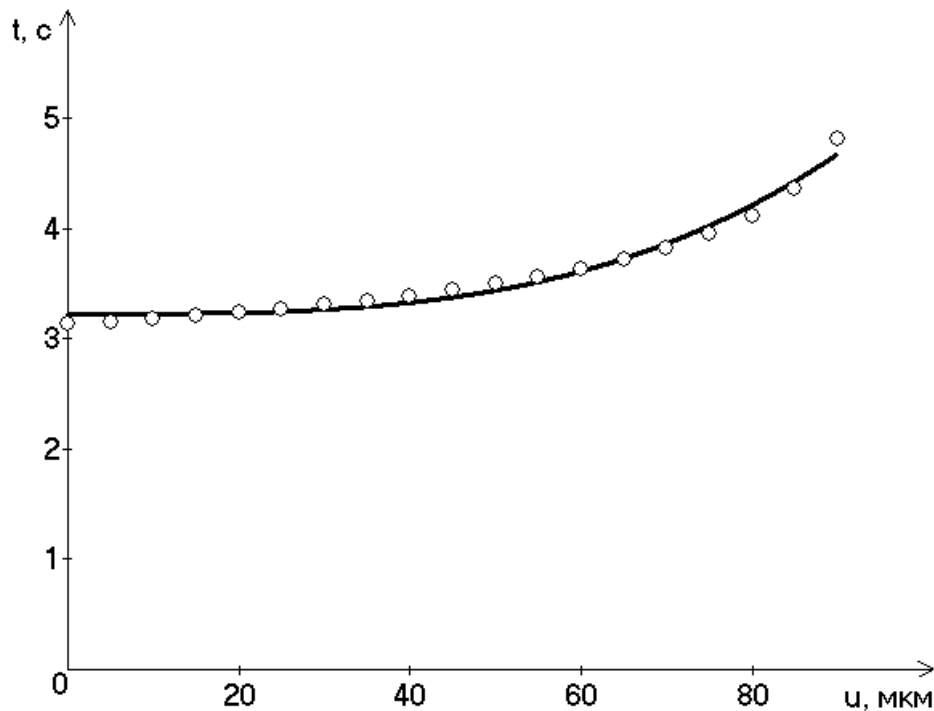


Рис. 3. Залежність тривалості перевертання контейнера під час завантаження ТПВ у сміттєвоз від зносу гідроциліндра: фактична $\circ$, теоретична —

Висновки

Запропоновано удосконалену нелінійну математичну модель роботи гідроприводу механізму завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз, яка враховує знос пар тертя і дозволила чисельно дослідити динаміку цього приводу під час пуску та визначити, що врахування зносу пар тертя суттєво впливає на основні параметри гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз.

Побудовано графічні залежності для порівняння зміни основних параметрів гідроприводу перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз без урахування зносу пар тертя та з урахуванням зносу.

Встановлено, що тривалість перевертання контейнера під час завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз при збільшенні зносу гідроциліндра зростає за степеневою залежністю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Диха О., Свідерський В., Голенко К. Підвищення антифрикційних характеристик поршневих ущільнень компресора кондиціонера автомобіля. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. № 333 (2). Р. 314–321. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-333-2-50>.
2. Хоменко І. М., Кіндрачук М. В., Кобринець А. К. Граничнодопустимий знос машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2010. № 52. С. 28–37.
3. Піонткевич О. В. Вплив параметрів системи керування гідроприводом мобільної робочої машини на динамічні характеристики. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 2. С. 68–76.
4. Березюк О. В. Аналітичне дослідження математичної моделі гідроприводу вивантаження твердих побутових відходів із сміттєвоза. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2011. № 34 (4). С. 80–83.
5. Іскович-Лотоцький Р. Д., Міськов В. П., Слабкий А. В. Динамічна та математична моделі вібропрес-молота з електрогідравлічним керуванням. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2014. № 48. С. 3–10.
6. Березюк О. В. Огляд конструкцій машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. С. 3–8.

7. Піонткевич О. В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 2. С. 83–90.
8. Ковалевський С. В., Залужна Г. В., Владіміров Е. О. Дослідження шарнірів реверсивного тертя машин промислового транспорту з метою підвищення їх довговічності. *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 2. С. 36–45.
9. Method for robot manipulator joint wear reduction by finding the optimal robot placement in a robotic cell / Kot T. et al. *Applied Sciences*. 2021. № 11 (12). Art. 5398.
10. The influence of hinges wear on the dynamic load of the articulated boom of a garbage truck's manipulator / Bereziuk O. V. et al. *Problems of Tribology*. 2023. № 28 (3/109). P. 18–24.
11. Serebryanskii A. Except the negative reverse effect and automatically compensate for wear in the hinge manipulators. *DOAJ – Lund University: Concept: Scientific and Methodological e-magazine*. 2014. № 4 (Collected works, Best Article).
12. Chernik D. V., Chernik K. N. Mathematical model of a combined manipulator of a forest machine. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. № 5 (919). Art. 052037.
13. Baybatshaev M., Beysembaev A. Synthesis of manipulation robot program trajectories with constraints in the form of obstacles. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. 2014. № 1. P. 21–23.
14. PC-process of analyzing and synthesizing friction units using databases and expert systems / Evelson L. I. et al. *Journal of Friction and Wear*. 2000. № 21 (4). P. 380–385.
15. Serebryansky A. I., Kanishev D. A., Kaptsov V. N. Constructive exception of friction reversibility based on the analysis of the operating characteristics of joint manipulators. *Europäische Fachhochschule*. 2013. № 5. P. 21–24.
16. Bereziuk O. V., Savulyak V. I., Kharzhevskiy V. O. Dynamics of wear and tear of garbage trucks in Khmelnytskyi region. *Problems of Tribology*. 2022. № 27 (3/105). P. 70–75, <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-70-75>.
17. Kargin R. V., Yakovlev I. A., Shemshura E. A. Modeling of workflow in the grip-container-grip system of body garbage trucks. *Procedia Engineering*. 2017. № 206. P. 1535-1539. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.727>.
18. Березюк О. В. Науково-технічні основи проектування приводів робочих органів машин для збирання та первинної переробки твердих побутових відходів : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.02 / Хмельницький, 2021. 482 с.
19. Dependence of wear of friction pairs of the mechanism for loading solid household waste into a garbage truck on the characteristics of antifriction materials / Bereziuk O. V. et al. *Problems of Tribology*. 2024. № 29 (3/113). P. 24–30. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-113-3-15-23>.
20. Перекрестов А. В. Задачі по об'ємному гідроприводу. К.: Вища школа. Головне видання, 1983. 144 с.
21. Михалевич В. М., Шевчук О. І., Буга Н. Л. Математичні системи комп'ютерної алгебри як засіб підвищення ефективності і якості освітнього процесу з вищої математики. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми* : зб. наук. прац. Випуск 14. Київ-Вінниця : ДОВ «Вінниця», 2007. С. 357–360.
22. Березюк О. В. Комп'ютерна програма "Регресійний аналіз" ("RegAnaliz"). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 49486. Київ : Державна служба інтелектуальної власності України. Дата реєстрації: 03.06.2013.
23. Bereziuk O. V. Determination of the regression of the solid waste compaction factor on the height of the polygon on the base of the computer program "RegAnaliz". *Automation of technologies and productions*. 2015. № 2 (8). P. 43–45.
24. Березюк О. В. Встановлення регресій параметрів захоронення відходів та потреби в ущільнювальних машинах на основі комп'ютерної програми "RegAnaliz". *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. № 1. С. 40–45.

Стаття надійшла до редакції 26.02.2025.

Стаття пройшла рецензування 07.03.2025.

Березюк Олег Володимирович – д-р техн. наук, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки, e-mail: berezyukoleg@i.ua.

Яворський Вадим Євгенійович – аспірант кафедри технології та автоматизації машинобудування. Вінницький національний технічний університет.