

УДК 629.341

## МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ГІДРОПРИВОДУ АВТОНАВАНТАЖУВАЧА

Д.О. Міщук<sup>1</sup>, Є.О. Міщук<sup>2</sup>, М.М. Балака<sup>3</sup><sup>1</sup>доцент кафедри будівельних машин, e-mail: [mischuk.do@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.do@knuba.edu.ua)<sup>2</sup>доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів, e-mail: [mischuk.ieo@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.ieo@knuba.edu.ua)<sup>3</sup>доцент кафедри будівельних машин, e-mail: [balaka.mm@knuba.edu.ua](mailto:balaka.mm@knuba.edu.ua)<sup>1,2,3</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

**Анотація.** У роботі розглядаються можливості розподілу накопиченої енергії при роботі автотранспорту для періодів його руху, зокрема в процесах гальмування та переміщення на уклони. Накопичення та рекуперація енергії в системі приводу автотранспорту здійснюється за рахунок гідросистеми зі встановленим гідроакумулятором та електроприводом з генерацією енергії в акумулятори. Для оцінки величини накопичуваної енергії системою навантажувача пропонується дослідити його енерговитрати на циклограмах енерговитрат.

*Ключові слова:* рекуперація, автотранспортувач, енергія, енергозбереження.

## ENERGY DISTRIBUTION MODELING IN THE HYDRAULIC DRIVE SYSTEM OF A FORKLIFT

D.O. Mishchuk<sup>1</sup>, Ye.O. Mishchuk<sup>2</sup>, M.M. Balaka<sup>3</sup><sup>1</sup>associate professor of the Department of Construction Machinery, e-mail: [mischuk.do@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.do@knuba.edu.ua)<sup>2</sup>associate professor of the Department machines and equipment of technological processes, e-mail: [mischuk.ieo@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.ieo@knuba.edu.ua)<sup>3</sup>associate professor of the Department of Construction Machinery, e-mail: [balaka.mm@knuba.edu.ua](mailto:balaka.mm@knuba.edu.ua)<sup>1,2,3</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The paper examines the possibilities of distributing the accumulated energy during the operation of the forklift truck for periods of its movement, in particular during braking processes and movements on slopes. Accumulation and recovery of energy in the drive system of the forklift was carry out at the expense of a hydraulic system with an installed hydraulic accumulator and an electric drive with energy generation in accumulators. In order to estimate the amount of energy stored by the loader system, it was suggest studying its energy consumption on energy consumption cycloramas'.

*Keywords:* recovery, forklift, energy, energy saving.



**Вступ.** Дослідження перспектив використання енергозберігаючих систем з накопиченням енергії в навантажувачах проведено в роботах [1, 2], де показано, що значні витрати пального при експлуатації навантажувача залежать від умов його роботи.

Моделювання розподілення енергії в системі гідроприводу автонавантажувача є важливою темою досліджень в галузі механіки та автомобільної техніки. Гідропривід використовується в багатьох видах техніки, включаючи автонавантажувачі, які використовуються для переміщення вантажу на складах, в портах, на підприємствах інших місцях. Моделювання розподілення енергії в системі гідроприводу автонавантажувача допомагає вивчити різні аспекти роботи системи, такі як ефективність передачі руху, споживання енергії, розподіл сил на різних елементах системи та оптимізація роботи системи.

Одним із ключових елементів гідроприводу автонавантажувача є гідростатична трансмісія. Гідростатична трансмісія складається з насоса, мотора та системи керування, які взаємодіють між собою та з іншими елементами системи. Насос та мотор працюють разом, перетворюючи енергію руху на енергію роботи та навпаки.

Під час роботи гідроприводу енергія від двигуна передається до насоса, який створює енергію стисненої рідини. В подальшому енергія стисненої рідини передається до мотора, який використовує її для виконання роботи, такої як рух автонавантажувача або підйом вантажу. Розподіл енергії між насосом та мотором є результатом різних процесів, таких як регулювання оберտальної швидкості насоса та мотора, розподіл робочих витрат та оптимізація роботи системи.

Для моделювання розподілення енергії в системі гідроприводу автонавантажувача необхідно врахувати різні параметри системи, таких як робочий тиск рідини в системі, частота обертаня валу насоса та мотора, витрати рідини через гідроциліндри та інші елементи системи. Для цього можуть бути використані різні математичні моделі, чисельні методи та програми моделювання.

Одним з основних аспектів моделювання розподілення енергії є оптимізація роботи системи з метою досягнення максимальної ефективності та економії енергії. Наприклад, можуть бути проведені дослідження щодо визначення оптимальної величини оберտальної швидкості насоса та мотора залежно від навантаження та режиму роботи автонавантажувача, що забезпечить оптимальний розподіл енергії та зниження споживання палива.

Додатково, моделювання розподілення енергії в системі гідроприводу автонавантажувача може включати дослідження взаємодії між гідроприво-

дом та іншими системами автотранспорту, такими як механічні трансмісії, системи керування двигуном та системи гальмування. Врахування цих аспектів може допомогти вдосконалити роботу всієї системи автотранспорту в цілому, забезпечуючи більш ефективну та економічну роботу автотранспорту.

**Мета роботи** полягає в дослідженні механізму накопичення енергії системою гідроприводу фронтального навантажувача при його переміщенні.

На рис. 1 представлено типову схему розподілення потоків енергії приводу автотранспорту з гідростатичною передачею та встановленим гідроаккумулятором.

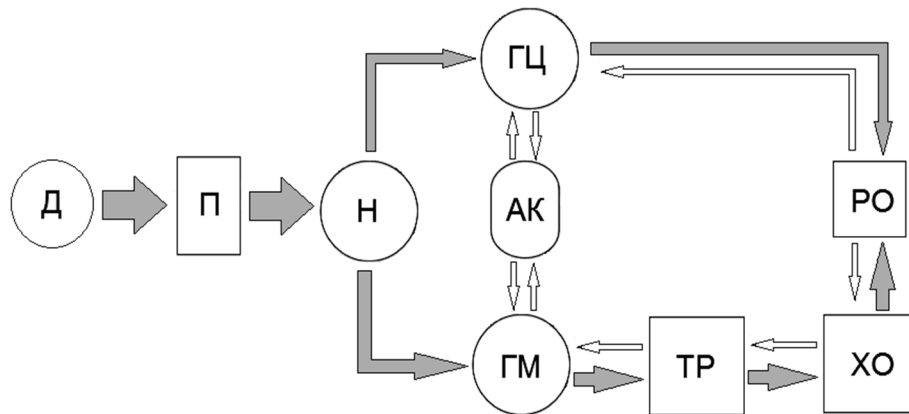


Рис. 1. – Схема розподілення потоків енергії в гідромеханічному приводі автотранспорту: Д – двигун; П – привід насоса; Н – насос; ГМ – гідромотори; ГЦ – гідроциліндри; АК – гідроаккумулятор; ТР – трансмісія; ХО – ходове обладнання; РО – робочий орган

Гідроаккумулятор в процесі виконання транспортних режимів руху накопичуватиме надлишкову енергію, яку під час робочих рухів віддаватиме в систему назад, тим самим зменшуватиме навантаження на основний двигун та знижуватиме витрати палива. Величина накопичуваної енергії буде функцією маси вантажу, типу навантажувача, технології роботи машини [3].

В роботі розглядається ефективність застосування гідроаккумулятора в гідроприводі автотранспорту на ділянці траси, яка схематично зображено на рис. 2 і складається з двох частин: криволінійної горизонтальної ділянки та прямої похилої під кутом  $\alpha$ . Технологія роботи навантажувача для даної схеми скрадатиметься з наступних технологічних переходів:

1. під'їзд з місця розвороту до місця завантаження по прямій криволінійній ділянці;
2. завантаження вантажу масою  $m_g$ ;
3. повернення заднім ходом в місце розвороту по прямій криволінійній;
4. під'їзд до місця розвантаження по прямій похилій ділянці під ухил;
5. розвантаження вантажу;

6. маневрування;
7. повернення заднім ходом в місце розвороту.

При розрахунку переміщення автотранспорту, необхідно обов'язково дотримуватися умови тягового балансу на кожній з розглянутих робочій ділянці.

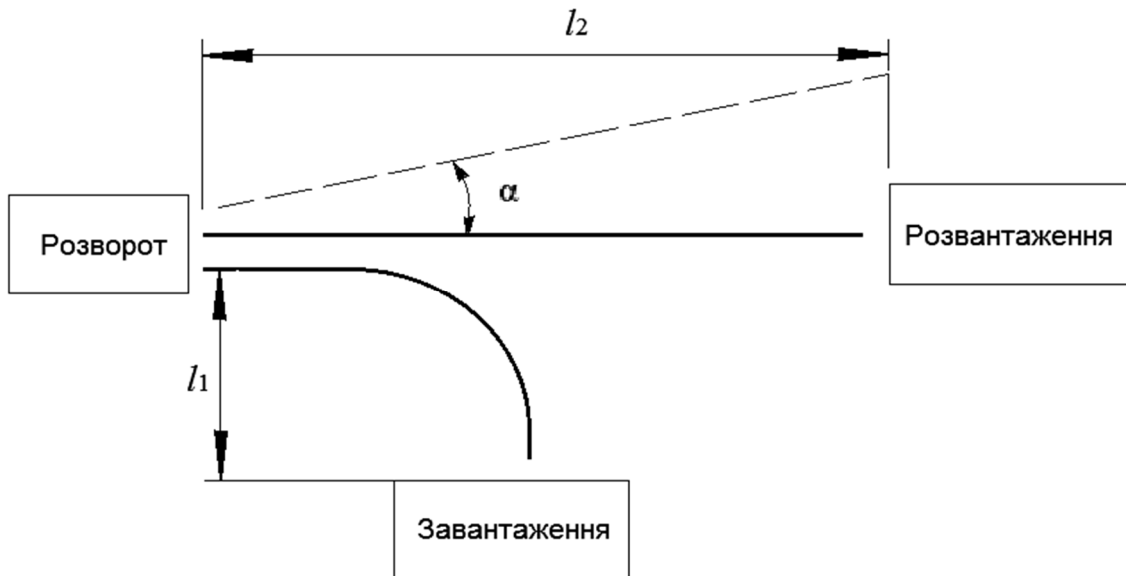


Рис. 2. – Схема розміщення пунктів завантаження та розвантаження для автотранспорту

Рівняння тягового балансу для автотранспорту при транспортуванні вантажу виглядає наступним чином [4, 5]:

$$W_{зч} \geq W_T = W_f \pm W_i + W_{кр} \pm W_{ин}, \quad (1)$$

де  $W_{зч} = \varphi_c (0,8m_n + m_e)g$  – сила зчеплення пневмоколісного автотранспорту з дорогою при переміщенні вантажу, Н;  $W_T = \frac{N_{дв}}{v} \eta_{заг}$  – сила тяги автотранспорту, Н;  $W_f = (m_n + m_e)gf$  – сила опору кочення машини при транспортуванні, Н;  $W_i = (m_n + m_e)gi$  – сила опору руху під уклін, Н (знак «+» приймається при русі вгору, а «-» при русі донизу);  $W_{кр} = f'(m_n + m_e)g \frac{l}{R}$  – сила опору руху на криволінійній ділянці, Н;  $W_{ин} = (m_n + m_e)a_{p(\epsilon)}$  – інерційна сила опору руху при переміщенні автотранспорту, Н (знак «+» приймається при розгоні, а «-» при гальмуванні);  $m_n$  – маса автотранспорту, кг;  $m_e$  – маса вантажу, кг;  $\varphi_c$  – коефіцієнт зчеплення колеса з дорогою;  $N_{дв}$  – номінальна потужність двигуна, Вт;  $v$  – установлена швидкість руху машини, м/с;  $\eta_{заг} = \eta_{мех} \eta_{\epsilon}$  – загальний ККД приводу;  $\eta_{мех} = 0,85 \dots 0,9$  – механічний ККД

приводу;  $\eta_c = 0,7 \dots 0,85$  – гідравлічний ККД приводу;  $f$  – коефіцієнт опору кочення;  $i = \tan \alpha$  – ухил дороги;  $\alpha$  – кут підйому дорожнього покриття;  $f'$  – коефіцієнт зчеплення;  $l$  – приведене плече прикладання сили тертя на площадці опору колеса з ґрунтом при повороті машини ( $l = 0,03 \dots 0,4$  м);  $R$  – радіус повороту, м;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Для попередньої оцінки енергетичного балансу навантажувача та можливості накопичення енергії його системою пересування, визначено витрати потужності на кожній з робочих ділянок руху.

На криволінійній ділянці під'їзду навантажувача без вантажу з місця розвороту до місця завантаження та в зворотному напрямку з вантажем, корисна потужність, яка витрачається, буде визначатися за наступною формулою [5]:

$$N_k = \frac{v_n \sum_{j=1}^N m_j}{\eta_{заг}} \left( g \left( f + f' \frac{l}{R} \right) \pm a_i \right), \quad (2)$$

де  $a_i$  – прискорення пуску або гальмування (при пуску приймається знак «+», а при гальмуванні – «-»);  $v_n$  – середня швидкість переміщення навантажувача на кожній з ділянок руху;  $\sum_{j=1}^N m_j$  – зведена рухома маса (при русі без вантажу прийнято масу навантажувача, а при русі з вантажем – сума мас навантажувача та вантажу).

Прискорення пуску для навантажувача при русі по горизонтальній поверхні буде:

$$a_{пуск} = \frac{N_{об} \eta_{заг}}{N \sum_{j=1}^N m_j} - gf, \quad (3)$$

Для прямолінійної ділянки з ухилом корисна потужність, що витрачається на переміщення, буде:

$$N_n = \frac{v_n \sum_{j=1}^N m_j}{\eta_{заг}} \left( g(f \pm i) \pm a_i \right), \quad (4)$$

де  $i$  – ухил ділянки, який для ділянки при русі з вантажем прийнято зі знаком «+», а при русі без вантажу – «-».

Прискорення пуску для навантажувача при русі по горизонтальній поверхні буде:

$$a_{пуск} = \frac{N_{об} \eta_{заг}}{N \sum_{j=1}^N m_j} - g(f \pm i), \quad (5)$$

Для визначення прискорення гальмування, спочатку необхідно визначити довжину залишкового шляху, який повинен проїхати навантажувач після розгону. Так як при переміщенні можливі два типи випадки формування закону переміщення: нормальний закон переміщення, який міститиме ділянку пуску, гальмування і сталого руху та укорочений закон, що має лише ділянки пуску та гальмування. Для нормального закону переміщення, прискорення гальмування можна прийняти рівним прискоренню пуску на даній ділянці, а для укороченого – приблизно буде:

$$a_{\text{гальм.}} = \frac{v_n^2}{2l_2}, \quad (6)$$

де  $l_2$  – довжина ділянки гальмування.

**Висновки.** Проведені дослідження енерговитрат автотранспорту показали, що можливості накопичення енергії енергосистемою навантажувача дозволяють виконати від 30 до 70% рекуперації енергії. Для формування зворотної віддачі енергії системою навантажувача в процесі його гальмування необхідно розробити оригінальний розподільник з електронним керуванням для реалізації оптимальної швидкодії системи рекуперації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Karpenko M. The prospect of using a hydraulic energy-saving drive / M. Karpenko, L. Pelevin, M. Bogdiavichus // Technical and technological problems of service, - 2017. – Nr.3(41), – С. 7-12.
2. Abdulhameed Al. Evaluation of Different Forklift Battery Systems Using Statistical Analysis and Discrete Event Simulation / Al. Abdulhameed, D.Husam, J. Weiss, S.W. Yoon // Industrial and Systems Engineering. Conference at Pittsburgh, - 2017. PA, USA. – С. 117-119.
3. Conte M. Hybrid battery-supercapacitor storage for an electric forklift: A lifecycle cost assessment / M. Conte, A. Genovese, F. Ortenzi, F. Vellucci // Journal of Applied Electrochemistry, - 2014. - №44. – С. 1-10. DOI: 10.1007/s10800-014-0669-z.
4. Bondar V. S., Dubinets O. I., Kolisnik M. P. (2009). Lifting and transporting machines: Calculations of lifting and transporting machines / V. S. Bondar, O. I. Dubinets, M. P. Kolisnik. – Kyiv. High School. – 734 с.
5. Міщук, Д.О. Оцінка можливостей накопичення енергії приводом автотранспорту / Д.О. Міщук, Є.О. Міщук, М.М. Балака // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 2021. – Вип. 95. – С. 171–177. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.171.