

УДК 621.225:69.002.51

## ГІБРИДНІ СИЛОВІ УСТАНОВКИ МАШИН ДЛЯ ЗЕМЛЯНИХ РОБІТ

А.П. Холодов, доц., к.т.н.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Розглянуто стратегію розвитку гібридних приводів машин для земляних робіт (МЗР) на прикладі провідних світових виробників техніки. Наведено аналіз конструктивного виконання силового приводу в цілому і його окремих елементів та взаємодії вузлів силової установки на різних експлуатаційних режимах.

**Ключові слова:** гібридний привід, машина, цикл, економія, енергія, процес.

## ГИБРИДНЫЕ СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ МАШИН ДЛЯ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ

А.П. Холодов, доц., к.т.н.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

**Аннотация.** Рассмотрена стратегия развития гибридных приводов машин для земляных работ на примере ведущих мировых производителей техники. Приведен анализ конструктивного исполнения силового привода в целом и его отдельных элементов и взаимодействия узлов силовой установки на различных эксплуатационных режимах.

**Ключевые слова:** гибридный привод, машина, цикл, экономия, энергия, процесс.

## HYBRID DRIVE OF EARTH MOVING MACHINES

A. Kholodov, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.),  
Kharkiv National Automobile and Highway University

**Abstract.** The strategy of developing hybrid drives for earthmoving machines on the example of the world's leading equipment manufacturer has been considered. The analysis of the structural performance of the power drive as a whole and its individual elements, interaction of power unit components at different operation modes.

**Key words:** hybrid drive, machine, cycle, saving, energy, process.

### Вступ

Протягом останніх років питання екологічної безпеки, в ракурсі зростаючого споживання вуглеводневих джерел енергії, стоїть особливо гостро [1–3]. Про це свідчать дані досліджень за кількістю викидів CO<sub>2</sub> під час будівництва доріг та інфраструктури різних міністерств транспорту та інфраструктури світу (рис. 1) [6].

У зв'язку з цим застосування машин і техніки з високими показниками паливної економичності й екологічної безпеки, а також модернізація машин, які знаходяться в експ-

луатації, є одними з найбільш ефективних засобів покращення паливно-енергетичної та екологічної ситуації.



Рис. 1. Щорічні викиди CO<sub>2</sub> під час будівництва доріг та інфраструктури

Такими машинами є машини з гібридними силовими установками. Гібриди отримали широкий розвиток в автомобільній промисловості, чого не можна сказати про машини для земляних робіт.

### Аналіз публікацій

За даними досліджень бензинові й дизельні двигуни споживають значну частину нафтопродуктів. Середній ККД двигунів – всього 23 % (бензинових – до 21, дизельних – близько 25 %). Отже, велика частина нафтопродуктів спалюється марно і завдає шкоди навколишньому середовищу – йде на нагрівання і забруднення атмосфери. Але і це далеко не повна характеристика ефективності машин. Головний її показник – не ККД двигуна, а коефіцієнт завантаження. На жаль, землерийні машини використовують потужні двигуни надзвичайно неефективно. Їх двигуни розраховані на великі навантаження, але у процесі роботи машини вони не завжди досягають максимуму. Цю проблему намагаються по-своєму вирішити виробники автомобілів у Німеччині, США, Японії, Китаї, Швеції та в інших країнах шляхом переходу на газове паливо, перейти на електромобілі, поставити на кожну машину спеціальний поглинач шкідливих продуктів згоряння і допалювати їх у глушнику; шляхом оптимізації робочого процесу за рахунок підвищення кваліфікації оператора, а також перерозподілу потужності двигуна, акумулявання недовикористаної потужності й подальшим її використанням на навантажених режимах роботи.

Наприклад, компанія «VOLVO» працює в галузі підвищення енергоефективності у таких напрямках (рис. 2).

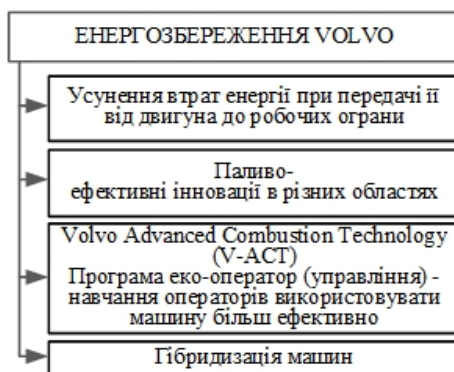


Рис. 2. Стратегія підвищення енергоефективності землерийних машин компанії «VOLVO»

Як відомо, в автомобільній промисловості великого поширення набули електричні гібриди. Завдяки сучасному рівню електротехніки та електроніки стало можливим створювати комп'ютеризовані перетворювачі енергії досить малої маси і вартості, яка багато в чому компенсується перевагами автоматизованого приводу з точки зору поліпшення паливної економічності та зниження токсичності відпрацьованих газів ДВС, що входить до складу гібридної силової установки. Однак вказані системи передбачають наявність джерел енергії для зарядки акумуляторів.

Ця умова не завжди є досяжною для землерийних машин, оскільки найчастіше вони працюють у польових умовах. А також, з огляду на їх великі потужності, розміри акумуляторних батарей і час їх зарядки значно збільшилися. Тому виробники шукають інших шляхів підвищення паливної економічності машин для земляних робіт. Розглянемо це на прикладі гібридних систем на базі паливних комірок як на вантажівках фірми Hino. Основним агрегатом гібридної установки є 4-циліндровий дизельний двигун (з турбонадувом і системою подачі палива Common Rail) потужністю 110 кВт і з обертовим моментом  $420 \text{ Н} \cdot \text{м}$  за частоти обертання колінчастого вала відповідно  $2500$  і  $1400 \text{ хв}^{-1}$ , скомбінований з електродвигуном – генератором змінного струму потужністю 36 кВт і з обертовим моментом  $333 \text{ Нм}$  [3].

Оскільки ці машини найчастіше гідрофіковані, є раціональним застосування гібридних установок на основі гідропневоакумуляторів, що дозволяють накопичувати гідравлічну енергію на холостих ходах машин і повертати її на навантажених режимах роботи (рис. 3).

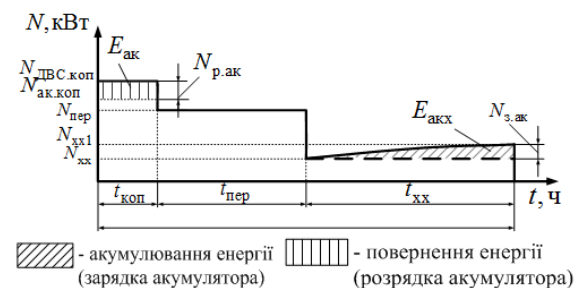


Рис. 3. Циклограма робочого процесу бульдозера з використанням гідроакумуляторної системи

На рис. 3 використано такі позначення:  $E_{ак}$  – енергія, що витрачається акумулятором на етапі копання;  $N_{р,ак}$  – потужність, що витрачається акумулятором на етапі копання;  $E_{акх}$  – енергія, акумульована на холостому ході;  $N_{з,ак}$  – потужність, акумульована на холостому ході;  $N_{ДВЗ,коп}$  – потужність ДВЗ під час копання без використання гідроакумуляуючої системи;  $N_{ак,коп}$  – потужність ДВЗ під час виконання операцій копання з використанням гідроакумуляуючої системи;  $N_{пер}$  – потужність ДВЗ на переміщення ґрунту;  $N_{хх1}$  – потужність, що витрачається на холостому ході при використанні гідроакумуляуючої системи;  $N_{хх}$  – потужність, що витрачається на холостому ході без використання гідроакумуляуючої системи;  $t_{коп}$  – час виконання операції копання ґрунту;  $t_{пер}$  – час переміщення ґрунту;  $t_{хх}$  – час холостого ходу;  $t_{ц}$  – час робочого циклу

При використанні гідроакумуляуючої системи в робочому циклі бульдозера відбудеться перерозподіл потоків енергії і зміниться поетапна витрата потужності двигуна [4].

#### Мета і постановка завдання

Таким чином, метою цієї роботи є встановлення необхідної настановної потужності двигунів МЗР з урахуванням використання гідроакумуляуючих систем і систематизація енерговитрат в їх робочому циклі.

За визначенням гібридна машина – це машина, що використовує для приводу механізмів більше одного джерела енергії. Оскільки гідроакумуляуюча система (ГАС) є приводом робочого обладнання, то машини, оснащені такими системами, можна назвати машинами з гідрофікованими гібридними силовими установками (МГГСУ).

Теоретично встановлену потужність двигуна гідрофікованої машини можна знизити на величину потужності, накопичуваної гідроакумуляуючою системою, яка може бути накопичена на холостих режимах роботи машини, під час її гальмування, опускання робочого обладнання та ін., а також за рахунок вдосконалення самої гідроакумуляуючої системи.

$$N_{ЕДВЗ} = N_{ДВС} - N_{ГС}, \quad (1)$$

де  $N_{ЕДВЗ}$  – потужність двигуна МГГСУ;  $N_{ДВС}$  – потужність двигуна, що закладена при проектуванні;  $N_{ГС}$  – потужність гідроакумуляуючої системи.

Таким чином, детальне дослідження енергопотоків у робочому циклі машин, дослідження способів акумулювання недовикористаної енергії дозволить рівномірніше навантажувати первинний двигун і знизити його встановлену потужність, що приведе до підвищення паливної економічності й екологічної безпеки.

Удосконалення ГАС є можливим за рахунок встановлення керованих муфт між первинним двигуном і гідронасосом, що дозволяють відключати його на холостих режимах роботи (рис. 4, 5).

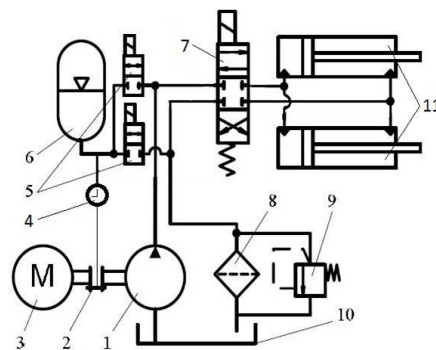


Рис. 4. Схема МГГСУ з керованою муфтою: 1 – гідронасос; 2 – керована муфта зчеплення; 3 – ДВС; 4 – датчик тиску; 5 – гідророзподільники управління процесом зарядки – розрядки ГПА; 6 – гідропневмоакумулятор; 7 – гідророзподільник; 8 – фільтр; 9 – запобіжний клапан; 10 – бак; 11 – гідроциліндри управління робочим обладнанням



Рис. 5. 3D-модель муфти МГГСУ

Застосування керованої муфти в гідроакумлюючій системі дозволить знизити витрати енергії первинного двигуна, а отже, і витрату палива, на холостих і на навантажених режимах з використанням гідроакумлюючої системи. Були проведені експериментальні

дослідження з підвищення паливної ефективності машин при відключенні гідронасоса на прикладі трактора Т-40, результати яких було зведено в табл. 1 техніко-економічних показників.

Таблиця 1 Техніко-економічні показники досліджуваних бульдозерів

Показники	Позначення	Значення показника				
		Бульдозер без ГАС	Бульдозер з ГАС	Підвищення ефективності бульдозера з ГАС, %	Бульдозер з ГАС та керованою муфтою	Підвищення ефективності бульдозера з ГАС та керованою муфтою, %
Потужність двигуна, кВт	$N$	66	66	–	66	–
Продуктивність, м <sup>3</sup> /год	$\Pi$	50,52	53,06	4,78	62,8	4,78
Маса бульдозера, т	$G$	7,185	7,220	–	7,23	–
Питома енергоємність копання, кВт/м <sup>3</sup> /год	$N/\Pi$	1,3	1,2	7,69	1,05	7,69
Пит. матеріаломісткість, т/м <sup>3</sup> /год	$G/\Pi$	0,14	0,13	7,14	0,11	7,14
Загальна витрата палива, л/змін	$Q$	47,3	45,6	3,59	42,8	9,59
Питома витрата палива, л/м <sup>3</sup>	$q$	0,14	0,12	14,28	0,12	14,28
Узагальнений показник, кВт·т/(м <sup>3</sup> /год) <sup>2</sup>	$\Pi_{\text{м}} = \frac{NG}{\Pi^2}$	0,185	0,169	8,64	0,12	8,64
Питома витрата палива на одиницю потужності, л/змін/кВт	$Q/N$	0,71	0,69	2,81	0,64	9,85
Пит. витрата палива на одиницю маси, л/змін/т	$Q/G$	6,5	6,3	3,07	5,9	9,23
Загальна витрата палива на одиницю продуктивності, $\frac{\text{л/змін}}{\text{м}^3/\text{год}}$	$Q/\Pi$	0,93	0,86	7,52	0,68	13,97
Швидкість підйому відвала, м/с	$v$	0,32	0,41	21,95	0,41	21,95
Тривалість циклу, с	$t$	63	57	9,52	57	9,52
Собівартість розробки ґрунту, грн/м <sup>3</sup>	$C_{\text{ед}}$	17,86	17	4,81	16,74	6,22

Пропонується система, що дозволяє регулювати температуру газової камери гідропневоаккумулятора, тим самим збільшуючи тиск залишкової робочої рідини (рис. 6).

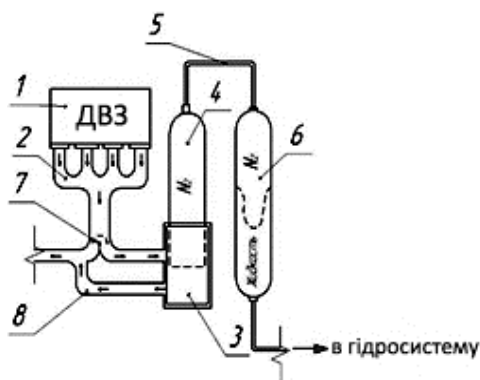


Рис. 6. Регулятор температури гідроакумлюючої системи: 1 – ДВС; 2 – вихлопний колектор; 3 – теплообмінник; 4 – балон з азотом; 5 – трубопровід; 6 – ГПА; 7 – ро-

зподільна заслінка; 8 – реверсивний патрубок

Наведена схема працює таким чином: в момент, коли в ГПА тиск є недостатнім для виконання робочої операції, розподільна заслінка 7 перекриває потік вихлопних газів у вихлопну систему і спрямовує їх у теплообмінник 3; в теплообмінник вбудований балон із газом азоту (N<sub>2</sub>) 4, за зростання температури в балоні 4 газ розширюється і подається через трубопровід 5 в газову порожнину ГПА 6; таким чином, тиск у робочій порожнині ГПА зростає; за досягнення номінального тиску в робочій порожнині ГПА регулююча заслінка перекриває потік вихлопних газів, що йдуть до теплообмінника, і спрямовує їх у вихлопну трубу.

Експериментальні дослідження вказаної системи показали збільшення кількості підйомів робочого обладнання на накопиченій енергії (рис. 7).

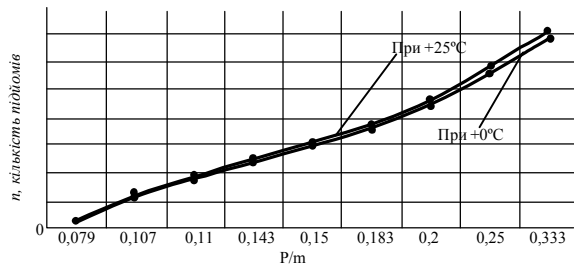


Рис. 7. Графік залежності кількості підйомів робочого обладнання від тиску зарядки і температури навколишнього середовища 0 °C і +25 °C

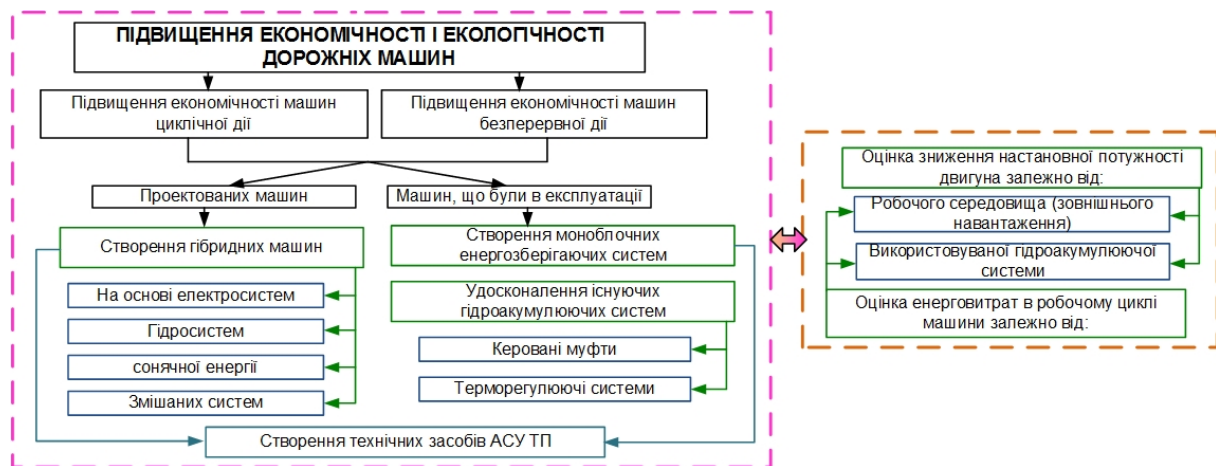


Рис. 8. Стратегія підвищення паливної економічності машин для земляних робіт

## Висновки

Проведений аналіз визначає стратегію вдосконалення машин для земляних робіт в галузі паливної економічності й екологічності. Гібридні силові установки для таких машин зможуть підвищити паливну економічність до 30 % для знову проєктованих машин і до 20 % для таких машин, що були вже в експлуатації.

## Література

1. Хмара Л.А. Машини для земляних робіт: підручник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, М.П. Скоблюк та ін.; за загальною редакцією проф. Л.А. Хмари та проф. С.В. Кравця. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 548 с.

Таким чином, перспективи розвитку енергоефективних машин для земляних робіт можна подати в такий спосіб (рис. 8).

Тобто необхідно дослідити енергонасиченість робочих процесів машин і поетапні витрати потужності з урахуванням умов, в яких вони працюватимуть, що дозволить знизити установчу потужність двигунів, використовувати альтернативні джерела енергії і створення силових гібридних установок.

2. Гусаков С.В. Гибридные силовые установки на основе ДВС: учебное пособие / С.В. Гусаков. – М.: РУДН, 2008. – 184 с.
3. Гибридные автомобили Nipo // Строительные и дорожные машины. – 2014. – № 9. – С. 59–60.
4. Хмара Л. А. Распределение силовых потоков в рабочем цикле землеройно-транспортных машин, оснащенных гидроаккумулирующей системой /Л.А. Хмара, А. П. Холодов // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 57. – С. 166–173.

Рецензент: І.Г. Кириченко, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 12 травня 2016 р.