

УДК 621.225:69.002.51

ГИБРИДНЫЙ ПРИВОД МАШИН ДЛЯ ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ – ПУТЬ К СНИЖЕНИЮ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ

ХМАРА Л. А.¹, *д.т.н., проф.*ХОЛОДОВ А. П.^{2*}, *к.т.н., доц.*

¹ Кафедра строительных и дорожных машин, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-29, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302

^{2*} Кафедра строительных и дорожных машин, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Петровского, 25, Харьков, 61002, Украина, +38050-206-36-44, E-mail: anton_kholodov@mail.ru, ORCID 0000-0002-4120-4654

Аннотация. Вопрос экологической безопасности, в ракурсе возрастающего потребления углеводородных источников энергии, стоит особо остро. В связи с этим, применение машин и техники с высокими показателями топливной экономичности и экологической безопасности, а также модернизация находящихся в эксплуатации машин, является одним из наиболее эффективных средств улучшения сложившейся топливно-энергетической и экологической ситуации. Рассмотрена стратегия развития гибридных приводов машин для земляных работ на примере ведущих мировых производителей техники. Приводится анализ конструктивного исполнения силового привода в целом и его отдельных элементов, взаимодействия узлов силовой установки на различных эксплуатационных режимах, принципы управления, обеспечивающие снижение теплового расхода топлива и выбросов вредных веществ с отработанными газами. Целью настоящей работы является установление необходимой установочной мощности двигателей машин для земляных работ с учетом использования гидроаккумулирующих систем и систематизация энергозатрат в их рабочем цикле путем разработки методики и средств исследования энергетической системы машины. Определена стратегия создания гибридных приводов машин для земляных работ.

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

ГИБРИДНИЙ ПРИВІД МАШИН ДЛЯ ЗЕМЛЯНИХ РОБІТ - ШЛЯХ ДО ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОЄМНОСТІ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ

ХМАРА Л. А.¹, *д.т.н., проф.*ХОЛОДОВ А. П.^{2*}, *к.т.н., доц.*

¹ Кафедра будівельних та дорожніх машин, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-29, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302.

^{2*} Кафедра будівельних та дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, ул. Петровського, 25, Харьков, 61002, Украина, +38050-206-36-44, E-mail: anton_kholodov@mail.ru, ORCID 0000-0002-4120-4654

Анотація. Питання екологічної безпеки, в ракурсі зростаючого споживання вуглеводневих джерел енергії, стоїть особливо гостро. У зв'язку з цим, застосування машин і техніки з високими показниками паливної економічності та екологічної безпеки, а також модернізація машин що знаходяться в експлуатації, є одним з найбільш ефективних засобів поліпшення паливно-енергетичної та екологічної ситуації. Розглянуто стратегію розвитку гібридних приводів машин для земляних робіт на прикладі провідних світових виробників техніки. Наводиться аналіз конструктивного виконання силового приводу в цілому і його окремих елементів, взаємодії вузлів силової установки на різних експлуатаційних режимах, принципи управління, що забезпечують зниження теплової витрати палива і викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Метою цієї роботи є встановлення необхідної настановної потужності двигунів машин для земляних робіт з урахуванням використання гідроаккумулюючих систем і систематизація енерговитрат у їхньому робочому циклі шляхом розробки методики і засобів дослідження енергетичної системи машини. Визначено стратегію створення гібридних приводів машин для земляних робіт.

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

HYBRID DRIVE OF EARTH MOVING MACHINES – THE WAY TO REDUCE THE ENERGY CONSUMPTION OF WORKING PROCESSES

KHMAR L. A.¹, *Doctor of Technical Sciences, Professor.*KHOLODOV A. P.^{2*}, *Ph. D., assistant professor.*

¹ Department building and road machines, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 46-98-29, e-mail: leonidkhmara@yahoo.com, ORCID ID: 0000-0003-3050-9302.

^{2*} Department building and road machines, Kharkiv National Automobile and Highway University, str. Petrovsky, 25, Kharkov, 61002, Ukraine +38050-206-36-44, E-mail: anton_kholodov@mail.ru, ORCID 0000-0002-4120-4654.

Summary. The issue of environmental safety, from the perspective of increasing consumption of hydrocarbon energy sources, is of particular relevance. In this regard the use of machines and equipment with high indicators of fuel efficiency and environmental safety as well as modernization of machines in service is one of the most effective means of improving the current fuel and energy and environmental situation. 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, principles of control providing for reduction of heat consumption and emissions of harmful substances with exhaust gases has been carried out. The aim of the work is determining the necessary adjusting power for engines of earthmoving machines considering the use of pumped storage systems and systematization of energy consumption in their working cycle by developing a methodology and means for studying the machine energy system. A strategy for creating hybrid drives for earthmoving machines has been defined.

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

Постановка проблемы. На протяжении последних лет вопрос экологической безопасности, в ракурсе возрастающего потребления углеводородных источников энергии, стоит особо остро [1-3]. Тому свидетельствуют данные исследований по количеству выбросов CO₂ при строительстве дорог и инфраструктуры различных министерств транспорта и инфраструктуры мира (рис. 1) [6].

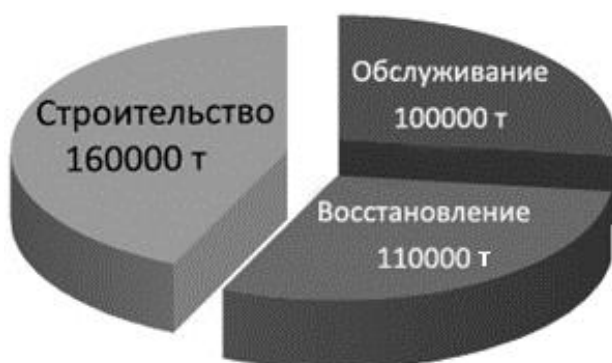


Рис. 1. Ежегодные выбросы CO₂ при строительстве дорог и инфраструктуры.

В связи с этим, применение машин и техники с высокими показателями топливной экономичности и экологической безопасности, а также модернизация находящихся в эксплуатации машин, может явиться одним из наиболее эффективных средств улучшения сложившейся топливно-энергетической и экологической ситуации. Такими машинами являются машины с гибридными силовыми установками. Гибриды получили широкое развитие в автомобильной промышленности, чего

нельзя сказать про машины для земляных работ.

Анализ публикаций. По данным исследований бензиновые и дизельные двигатели потребляют значительную часть нефтепродуктов. Средний КПД двигателей – всего 23 % (бензиновых – до 21, дизельных – около 25 %) [3, 4]. Следовательно, большая часть нефтепродуктов сжигается впустую и наносит вред окружающей среде — идет на нагревание и загрязнение атмосферы. Но и это далеко не полная характеристика эффективности машин. Главный его показатель – не КПД двигателя, а коэффициент загрузки. К сожалению, землеройные машины используют мощные двигатели чрезвычайно неэффективно. Их двигатели рассчитаны на большие нагрузки, но в процессе работы машины они не всегда достигают максимума. Эту проблему пытаются по-своему решить производители автомобилей в Германии, США, Японии, Китае, Швеции и в других странах путем перехода на газовое топливо, перейти на электромобили, поставить на каждую машину специальный поглотитель вредных продуктов сгорания и дожигать их в глушителе, оптимизации рабочего процесса за счет повышения квалификации оператора, а также перераспределением мощности двигателя, аккумуляирования недоиспользованной мощности и дальнейшим ее использованием на нагруженных режимах работы.

Например, компания VOLVO [5] работает в области повышения

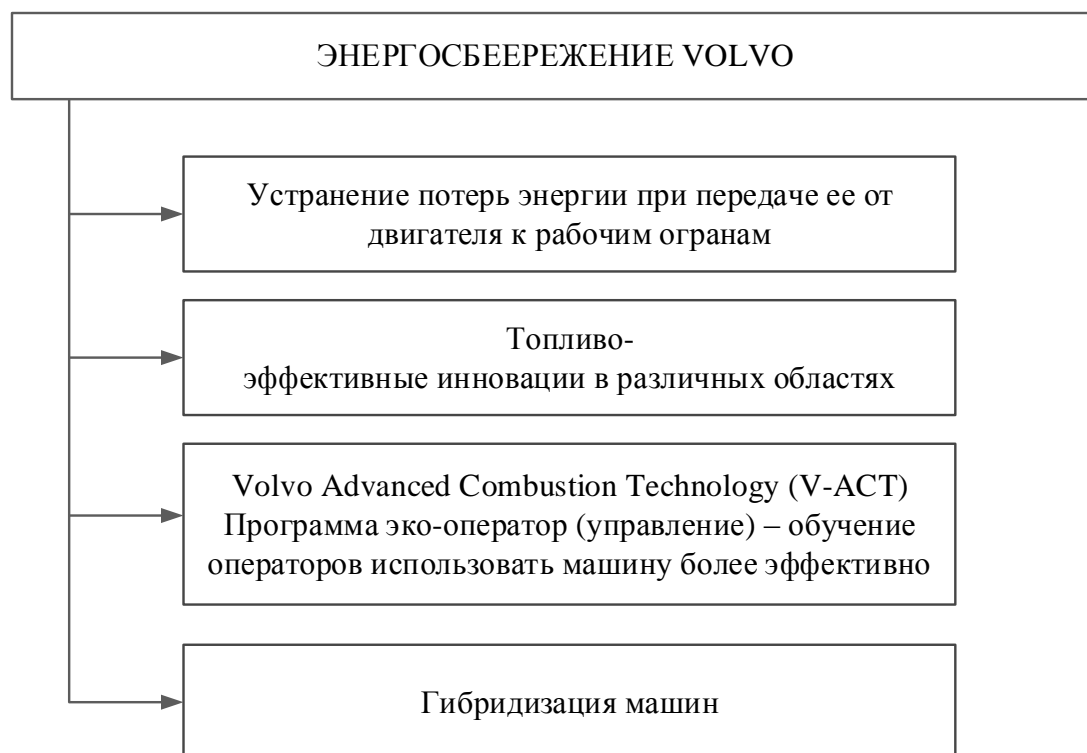


Рис.2. Стратегия повышения энергоэффективности землеройных машин компании VOLVO.

энергоэффективности по следующим направлениям представленным на рисунке 2.

Как известно в автомобильной промышленности широкое распространение получили электрические гибриды. Благодаря современному уровню электротехники и электроники стало возможным создавать компьютеризированные преобразователи энергии достаточно малой массы и стоимости, которая во многом компенсируется преимуществами автоматизированного привода с точки зрения улучшения топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов ДВС, входящего в состав гибридной силовой установки. Однако данные системы предусматривают наличие источников энергии для зарядки аккумуляторов.

Данное условие не всегда выполнимо для землеройных машин, т.к. чаще всего они работают в полевых условиях. А также ввиду их больших мощностей объемы

аккумуляторных батарей и время их зарядки значительно увеличилось бы.

Поэтому производители ищут другие пути повышения топливной экономичности машин для земляных работ.

С помощью гибридных систем на базе топливных элементов как на грузовиках фирмы Hino. Основным агрегатом гибридной установки является 4-цилиндровый дизельный двигатель (с турбонаддувом и системой топливоподачи Common Rail) мощностью 110 кВт и с крутящим моментом 420 Н·м при частоте вращения коленчатого вала соответственно 2500 и 1400 мин⁻¹, скомбинированный с электродвигателем - генератором переменного тока мощностью 36 кВт и с крутящим моментом 333 Н·м [6].

Т.к. эти машины чаще всего гидрофицированы, рационально применение гибридных установок на основе гидропневмоаккумуляторов, позволяющие накапливать гидравлическую энергию на холостых ходах машин и возвращать ее на нагруженных режимах работы (рис.3).

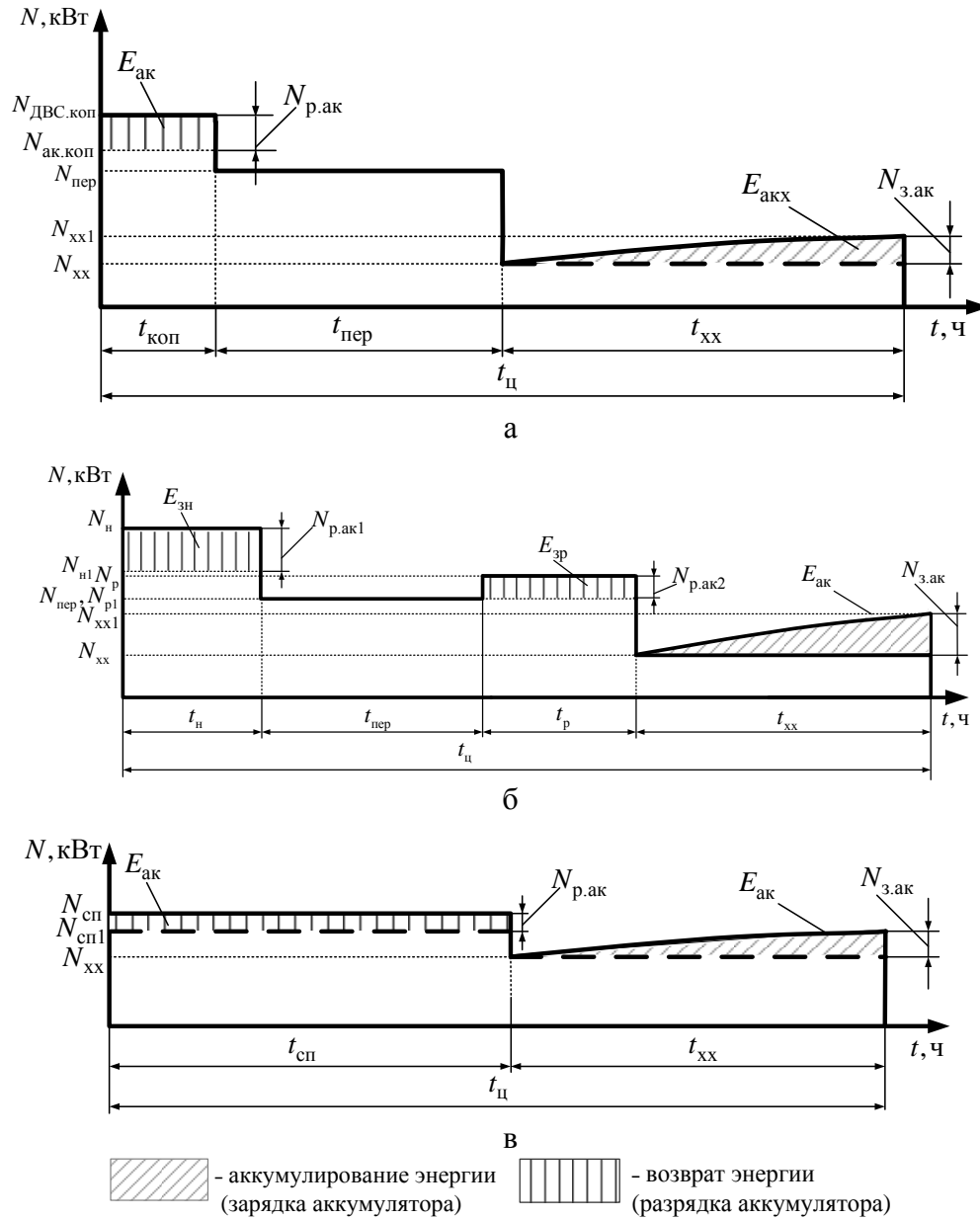


Рис. 3. Циклограммы рабочего процесса машин с использованием гидроаккумулялирующей системы: а – бульдозера; б – скрепера; в – автогрейдера $E_{ак}$ – энергия, затрачиваемая аккумулятором на этапе копания; $N_{р.ак}$ – мощность, затрачиваемая аккумулятором на этапе копания; $E_{акх}$ – энергия, аккумулируемая на холостом ходу; $N_{з.ак}$ – мощность аккумулируемая на холостом ходу; $N_{ДВС.коп}$ – мощность ДВС на операции копания без использования гидроаккумулялирующей системы; $N_{АК.коп}$ – мощность ДВС на операции копания с использованием гидроаккумулялирующей системы; $N_{пер}$ – мощность ДВС на перемещение грунта; $N_{хх1}$ – мощность, затрачиваемая на холостом ходу при использовании гидроаккумулялирующей системы; $N_{хх}$ – мощность, затрачиваемая на холостом ходу без использования гидроаккумулялирующей системы; $t_{коп}$ – время копания грунта; $t_{пер}$ – время операции перемещения грунта; $t_{хх}$ – время холостого хода; $t_{ц}$ – время рабочего цикла.

Цель статьи. Таким образом, целью настоящей работы является установление необходимой установочной мощности двигателей машин для земляных работ с учетом использования гидроаккумулирующих систем и систематизация энергозатрат в их рабочем цикле путем разработка методики и средств исследования энергетической системы машины.

Изложение материала. По определению гибридная машина – это машина использующая для привода механизмов более одного источника энергии. Т.к. гидроаккумулирующая система (ГАС) является приводом рабочего оборудования, то машины, оснащенные такими системами можно назвать машинами с гидрофицированными гибридными силовыми установками (МГГСУ).

Теоретически установочную мощность двигателя гидрофицированной машины можно снизить на величину мощности накапливаемой гидроаккумулирующей системой, которая может быть накоплена на холостых режимах работы машины, во время ее торможения, опускания рабочего оборудования и др., а также за счет совершенствования самой гидроаккумулирующей системы.

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

где $N_{\text{ЭДВС}}$ – мощность двигателя МГГСУ;

$N_{\text{ДВС}}$ – мощность двигателя, заложенная при проектировании;

$N_{\text{ГС}}$ – мощность гидроаккумулирующей системы.

Таким образом, детальное исследование энергопотоков в рабочем цикле машин, исследование способов аккумуляции недоиспользованной энергии позволит равномернее нагружать первичный двигатель и снизить его установочную мощность, что приведет к повышению топливной экономичности и экологической безопасности.

Совершенствование ГАС возможно за счет установки управляемых муфт между первичным двигателем гидронасосом,

позволяющих отключать его на холостых режимах работы (рис. 4, 5)

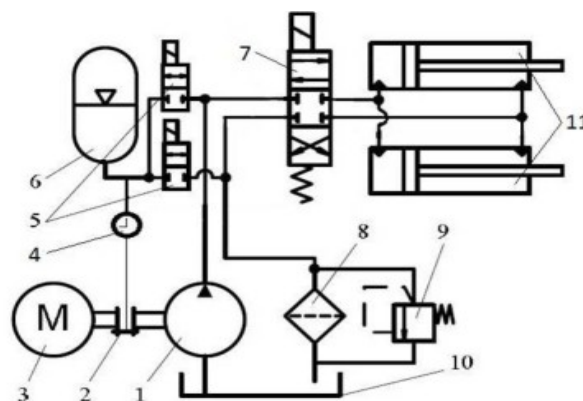


Рис. 4. Схема МГГСУ с управляемой муфтой: 1 – гидронасос; 2 – управляемая муфта сцепления; 3 – ДВС; 4 – датчик давления; 5 – гидрораспределитель управления процессом зарядки – разрядки ГПА; 6 – гидроневмоаккумулятор; 7 – гидрораспределитель; 8 – фильтр; 9 – предохранительный клапан; 10 – бак; 11 – гидроцилиндры управления рабочим оборудованием.

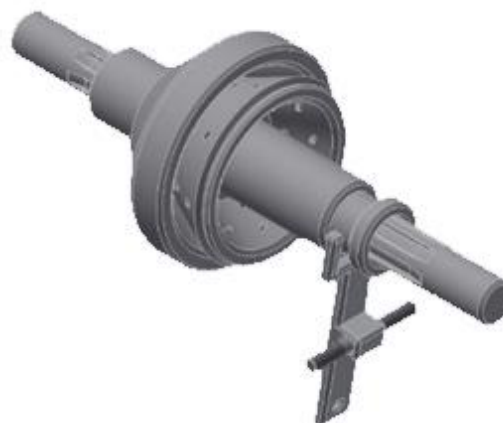


Рис. 5. 3D-модель муфты МГГСУ.

Применение управляемой муфты в гидроаккумулирующей системе позволит снизить затраты энергии первичного двигателя, а следовательно и расход топлива, на холостых режимах работы и на нагруженных режимах с использованием гидроаккумулирующей системы.

Были проведены экспериментальные исследования повышения топливной эффективности машин при отключении гидронасоса на примере трактора Т-40. Результаты которых сведены в таблицу 1 технико-экономических показателей.

Таблица 1

Технико-экономические показатели исследуемого трактора

№ п/п	Показатели	Обозначение	Значение показателя				
			Бульдозер без ГАС	Бульдозер с ГАС	Повышение эффективности бульдозер с ГАС, %	Бульдозер с ГАС и управляемой муфтой	Повышение эффективности бульдозер с ГАС и управляемой муфтой, %
1	Мощность двигателя, кВт	N	66	66	-	66	-
2	Производительность, м ³ /ч	Π	50,52	53,06	4,78	62,8	4,78
3	Масса бульдозера, т	G	7,185	7,220	-	7,23	-
4	Уд. энергоемкость копания, кВт/м ³ /ч	N/Π	1,3	1,2	7,69	1,05	7,69
5	Уд. материалоемкость, т/м ³ /ч	G/Π	0,14	0,13	7,14	0,11	7,14
6	Общий расход топлива, л/смен	Q	47,3	45,6	3,59	42,8	9,59
7	Удельный расход топлива, л/м ³	q	0,14	0,12	14,28	0,12	14,28
8	Обобщенный показатель, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{т}}{(\text{м}^3/\text{ч})^2}$	$\Pi_{NG} = \frac{NG}{\Pi^2}$	0,185	0,169	8,64	0,12	8,64
9	Удельный расход топлива на единицу мощности, $\frac{\text{л/смен}}{\text{кВт}}$	Q/N	0,71	0,69	2,81	0,64	9,85
10	Уд. расход топлива на единицу массы, $\frac{\text{л/смен}}{\text{т}}$	Q/G	6,5	6,3	3,07	5,9	9,23
11	Общий расход топлива на единицу произ-ти, $\frac{\text{л/смен}}{\text{м}^3/\text{ч}}$	Q/Π	0,93	0,86	7,52	0,68	13,97
12	Скорость подъема отвала, м/с	v	0,32	0,41	21,95	0,41	21,95
13	Длительность цикла, с	t	63	57	9,52	57	9,52
14	Себестоимость разработки грунта, грн/м ³	$C_{ед}$	17,86	17	4,81	16,74	6,22

Предлагается система, позволяющая регулировать температуру газовой камеры гидропневмоаккумулятора, что позволит увеличивать давление остаточной рабочей жидкости (рис.6).

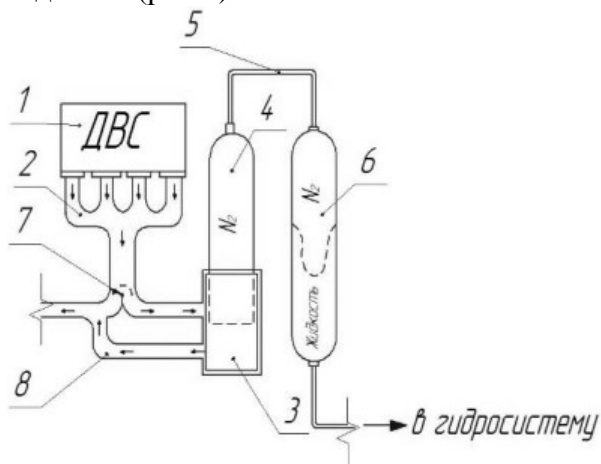


Рис. 6. Регулятор температуры гидроаккумулирующей системы: 1 – ДВС; 2 – выхлопной коллектор; 3 – теплообменник; 4 – баллон с азотом; 5 – трубопровод; 6 – ГПА; 7 – распределительная заслонка; 8 – реверсивная патрубков.

Приведенная схема работает следующим образом, в момент когда в ГПА не достаточное давление для выполнения рабочей операций распределительная заслонка 7 перекрывает поток выхлопных газов в выхлопную систему и направляет их в теплообменник 3, в теплообменник встроенный баллон с газом азота (N₂) 4, при росте температуры в баллоне 4 газ расширяется и подается через трубопровод 5 в газовую полость ГПА 6, таким образом давление в рабочей полости ГПА растет, при достижении номинального давления в рабочей полости ГПА регулирующая заслонка перекрывает поток выхлопных газов идут к теплообменнику и направляет их в выхлопную трубу.

Экспериментальные исследования данной системы показали увеличение количества подъемов рабочего оборудования на накопленной энергии (рис. 7).

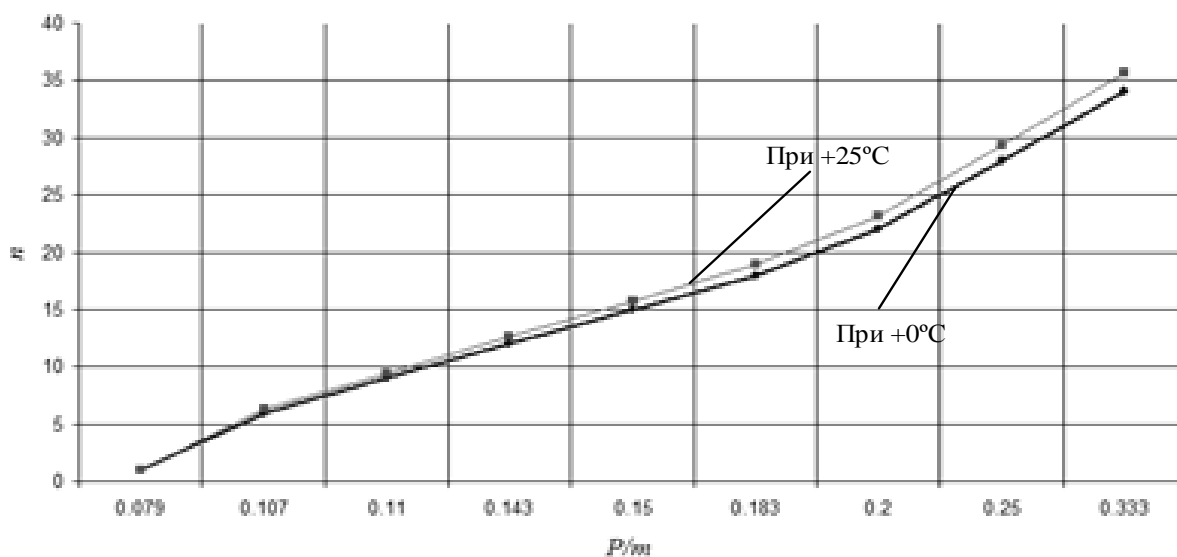


Рис. 7. График зависимости количества подъемов рабочего оборудования от давления зарядки и температуры окружающей среды 0°C и +25°C.

Таким образом перспективны развития энергоэффективных машин для земляных

работ можно представить следующим образом (рис. 8):

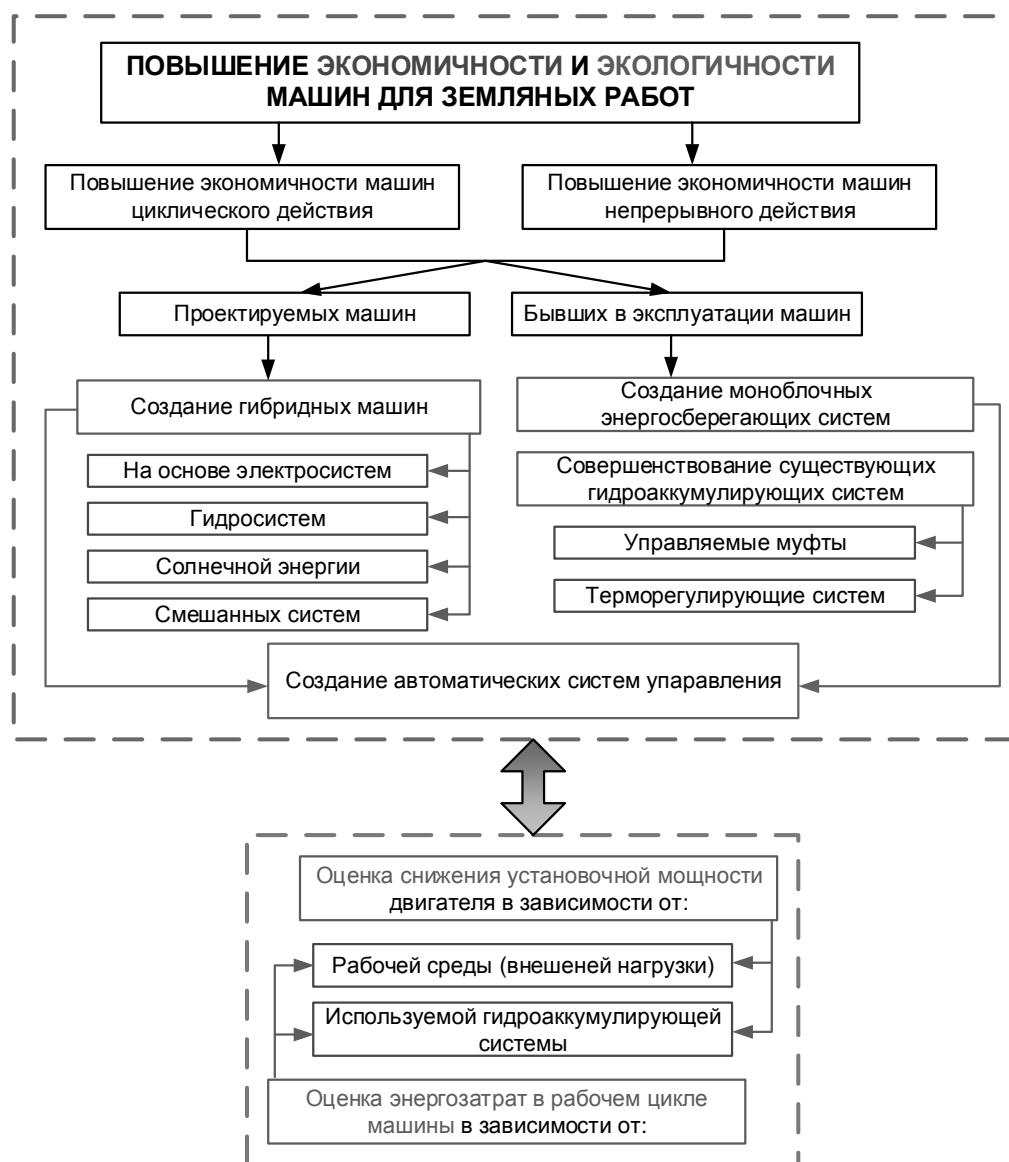


Рис. 8. Стратегия повышения топливной экономичности машин для земляных работ.

Выводы. Проведённый анализ определил стратегию совершенствования машин для земляных работ в области топливной экономичности и экологичности. Гибридные силовые установки для таких

машин смогут повысить топливную экономичность до 30% для вновь проектируемых машин и до 20 % для уже бывших в эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Машини для земляних робіт: Підручник / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, М.П. Скоблюк та ін. Під загальною редакцією проф. Л.А. Хмари та проф. С.В. Кравця. – Х.: ХНАДУ, – 2014 -548 с.
2. Экология: Учебник / С.Х. Карпенков. - М.: Директ-Медиа, 2015. – 662 с.
3. Гибридные силовые установки на основе ДВС: учебное пособие / Гусаков С.В. Москва – 2008. – 184 с.
4. Paul Denholm, Gerald Kulcinski Net energy balance and greenhouse gas emissions from renewable energy storage systems / Paul Denholm, Gerald Kulcinski Energy Center of Wisconsin Research Report 223-1, (2003). – 55 p.
5. Volvo driving fuel efficiency / Volvo construction equipment magazine 01/2010 issue 34 – 22 p.
6. Reducing Greenhouse Gas Emissions in the B.C. Road Building and Maintenance Industry / B.C. Road Builders and Heavy Construction Association Ministry of Transportation and Infrastructure May 2011 – 80 p.

7. Гибридные автомобили Hino // Строительные и дорожные машины – 2014 – № 9 – С. 59 – 60.
8. Хмара Л.А. Применение аккумуляторов потенциальной энергии в строительных машинах (на примере одноковшового экскаватора). Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Вып. 33. – Дн-ск: ПГАСА, 2005. – С. 17 – 33.
9. 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. – Х.: ХНАДУ. – 2012. - Вып. 57. – С. 166-173.
10. Холодов А. П. Аккумуляция энергии в рабочем цикле бульдозеров / А. П. Холодов // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: всеукр. міжвід. зб. наук. пр. – К.: КНУБА. – 2012. – Вып. 78. – С. 63 – 68.
11. Хмара Л. А. Повышение эффективности бульдозера путем использования гидроаккумулирующей системы / Л. А. Хмара, А. П. Холодов // Строительные и дорожные машины и оборудование. – 2012. – №3 – С. 33 – 37.

REFERENCES

1. 1 Mashini dlya zemlyanikh robIt: Navchalniy posIbnik / Khmara L. A., Kravets S. V., NIchke V. V., Nazarov L. V., Skoblyuk M. P., NIKItIn V. G. PId zagalnoyu redaktsIEyu prof..Khmara L. A. ta prof.. Kravtsya S. V. Rivne – DnIpropetrovsk-Kharkiv. – 2010 -557 p.
2. Ekologiya: Uchebnik / S. H. Karpenkov. - M.: Direkt-Media, 2015. – 662 p.
3. Gibridnyie silovyye ustanovki na osnove DVS: uchebnoe posobie / Gusakov S. V. Moskva – 2008. – 184 p.
4. Paul Denholm, Gerald Kulcinski Net energy balance and greenhouse gas emissions from renewable energy storage systems / Paul Denholm, Gerald Kulcinski Energy Center of Wisconsin Research Report 223-1, (2003). – 55 p.
5. Volvo driving fuel efficiency / Volvo construction equipment magazine 01/2010 issue 34 – 22 p.
6. Reducing Greenhouse Gas Emissions in the B.C. Road Building and Maintenance Industry / B.C. Road Builders and Heavy Construction Association Ministry of Transportation and Infrastructure May 2011 – 80 p.
7. Gibridnyie avtomobili Hino // Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny – 2014 – # 9 – P. 59 – 60.
8. Khmara L. A. Primenenie akkumulyatorov potentsialnoy energii v stroitelnyih mashinah (na primere odnokovshovogo ekskavatora). Sb. nauch. tr.: Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Vyip. 33. – Dn-sk: PGASA, 2005. – P. 17 – 33.
9. Khmara L. A. Raspredelenie silovyyih potokov v rabochem tsikle zemleroyno-transportnyih mashin, osnashchennyih gidroakkumuliruyushey sistemoy / L. A. Khmara, A. P. Kholodov // Vestnik HNADU. Sb. nauch. tr. – Kh.: HNADU. – 2012. - Vyip. 57. – P. 166-173.
10. Kholodov A. P. Akkumulirovanie energii v rabochem tsikle buldozerov / A. P. Kholodov // GІrnicHI, budІvelnІ, dorozhnІ ta melliorativnІ mashini: vseukr. mlzhvІd. zb. nauk. pr. – K.: KNUBA. – 2012. – Vyip. 78. – P. 63 – 68.
11. Khmara L. A. Povyishenie effektivnosti buldozera putem ispolzovaniya gidroakkumuliruyushey sistemyi / L. A. Khmara, A. P. Holodov // Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny i oborudovanie. – 2012. – #3 – P. 33 – 37.