

## РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИНЦИПУ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В ГІДРОСИСТЕМАХ ПРИВОДУ МАШИН ЗІ СТІЛОВИМ РОБОЧИМ ОБЛАДНАННЯМ

Ремарчук М.П., д.т.н., професор

(Українська державна академія залізничного транспорту)

*В статті показані напрямки реалізації принципу рекуперації енергії в гідравлічних приводах машин зі стріловим робочим обладнанням за рахунок перетворення енергії при опусканні стріли в енергію обертання поворотної платформи із можливістю складання енергії від гідропневмоакумулятора та від насоса. Таке рішення забезпечує зниження витрат енергії від первинного двигуна.*

**Постановка проблеми.** Зниження витрат енергії становиться особливо актуальною задачею коли складова палива в собівартості одиниці продукції має тенденцію до зростання. За даними [1] складові в собівартості продукції (в процентах) мають значення: перебазування – 0,37; заміна оснастки – 0,34; мастильні матеріали – 8,09; технічне обслуговування – 3,4; зарплата оператора – 1,89; паливо – 40,44; накладні витрати – 3,4; планові накопичення – 4,86; мито – 25,53; різні затрати – 2,56; амортизаційні відрахування – 9,08. З наведеного витікає, що в собівартості продукції паливо складає найбільшу величину, зокрема 40,44 %, а інші складові, наприклад, мито не перевищує 25,53 %.

**Аналіз публікацій.** Проведеними дослідженнями [2] встановлено, що принцип рекуперації енергії використовується на екскаваторах Росії і зарубіжних екскаваторах (фірми Komatsu), схемні рішення яких наведено на рис. 1 і 2. В цій роботі автори показують, що біля 25 % енерговитрат циклу екскаватора складають втрати, які обумовлені процесом піднімання робочого обладнання (без ґрунту) з подальшим його опусканням при необхідності дроселювання робочої рідини, внаслідок чого вона перегрівается.

В гідросистемах зарубіжних екскаваторів (фірма Komatsu) рекуперація енергії забезпечується підключенням її до основної гідросистеми (див рис. 2 а), що включає основні гідроциліндри 1 і 2 та гідророзподільник 3 та ряд додаткових елементів (див рис. 2 б), зокрема, гідроциліндр 8, ємкість 4, зворотний 5 і запобіжний 6 клапани та гідропневмоакумулятора 7. Із наведених схем можна зробити висновок про наявність різних підходів до використання принципу рекуперації енергії в процесі роботи екскаваторів.

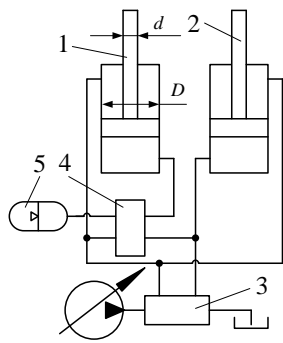


Рис. 1. Рекуперація енергії при опусканні стріли екскаватора (виробники Росії, 1989 р.)

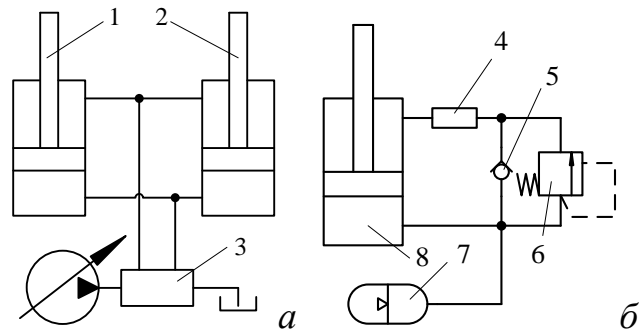


Рис. 2. Рекуперація енергії при опусканні стріли гідрофікованого екскаватора (фірма Komatsu, 1989 р.):  
а – основна; б – додаткова гідросистеми

Для екскаватора 5-ї розмірної групи (ЭО–5126), як відмічається в роботі [3], в інтервалі максимального навантаження гідроциліндрів при виконанні процесу екскавації ґрунту екскаватором безпосередньо саме копання складає до 10 % від тривалості всього робочого циклу. При цьому найбільші втрати енергії виникають в гідросистемі, зокрема, в гідророзподільниках в процесі регулювання швидкості робочого руху, в первинних запобіжних клапанах, в зливних гідролініях та вторинних запобіжних клапанах.

Класифікація систем, по виду рекуперації енергії для екскаваторів, на мові оригіналу [3], наведено на рис. 3. Інформація, що представлена на рис. 3 не потребує особливих пояснень.

Згідно [4], розглянемо процес рекуперації енергії при повороті платформи екскаватора, який забезпечено шляхом використанням гідроаккумулятора і газових балонів, як це показано на рис. 4. Елементами механізму повороту екскаватора (див. рис. 4) є: 1 – гідроаккумулятор; 2 – масляний бак; 3 – гідророзподільник; 4 – високомоментний гідромотор; 5 – платформа екскаватора; 6 – клапан розвантаження; 7 – газові балони. Принцип роботи наступний. Поворот платформи екскаватора забезпечується за рахунок подачі рідини від попередньо зарядженого гідроаккумулятора до гідромотора 4 через гідророзподільник 3. Для зупинки платформи 5 екскаватора гідромотор 4 переводиться в режим насоса і тоді кінетична енергія обертових мас перетворюється в потенційну енергію аккумулятора. Після зупинки платформи підживлювальний насос забезпечує підзарядку гідроаккумулятора. При завершенні зарядки аккумулятора клапан розвантаження 6 переводить насос в режим роботи на масляний бак без навантаження насоса.

Для визначення ефективності роботи різних за принципом роботи аккумуляторів енергії дослідженнями [5] встановлені їх енергетичні характеристики. Аналіз отриманих результатів дозволив визначити, що за рівнем швидкодії відносно електричних аккумуляторів найбільш ефективні є гідропневмоаккумулятори, які здатні віддавати енергію за малий проміжок часу і вони можуть застосовуватись в якості рекуператорів енергії при гальмуванні автомобілів, автобусів і тролейбусів.

Схема акумулювання енергії, наприклад [6], при спусках і гальмуванні тролейбуса наведена на рис. 5. Основними елементами цієї схеми (див. рис. 5) є: 1 – диференціал; 2 – колесо; 3 – муфта зчеплення; 4 – гідроаккумулятор; 5 – гідророзподільник; 6 – мікропроцесорний блок управління (МБУ); 7 – насос-мотор; 8 – бак; 9 – механізм управління насос-мотором. Процес акумулювання енергії забезпечується переводом гідромашини 7 з моторного в насосний режим роботи. Завдяки цьому робоча рідина із бака 8 через гідророзподільник 5 направляється в гідроаккумулятор 4. Мікропроцесорний блок управління 6 забезпечує контроль рівня зарядки аккумулятора. При розгоні або при переміщенні на гору завдяки механізму 9 гідромашину 7 переводять в режим гідромотора. Гідромотор 7 використовуючи накопичену енергію в гідроаккумуляторі разом з потужністю тягового електродвигуна приводять в рух колеса тролейбуса, чим забезпечується зниження пікового навантаження основного електродвигуна тролейбуса.



Рис. 3. Класифікація енергозберігаючих рішень [3], призначених для застосування в гідросистемах одноковшевого екскаватора

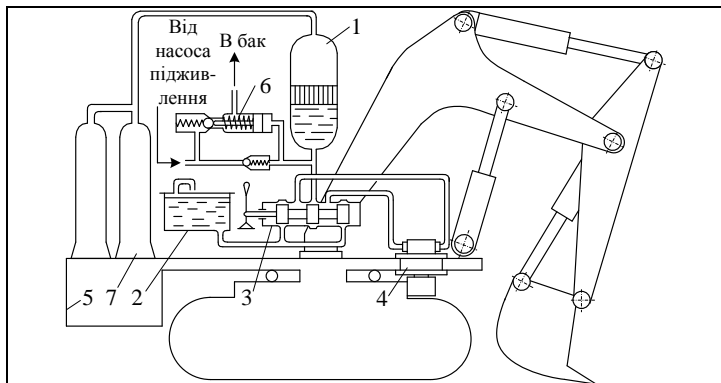


Рис. 4. Механізм обертання поворотної платформи екскаватора, (Україна, ХІТ, 1970 р.)

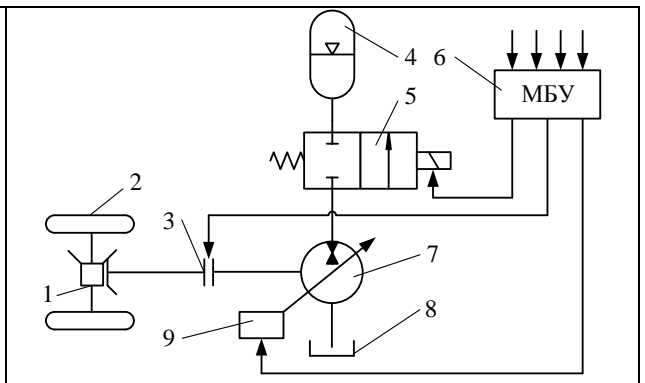


Рис. 5. Гідравлічна система приводу в рух тролейбуса (Росія, МЕІ (ТУ), 2000 р.)

Огляд наукових джерел, в яких розглядаються питання необхідності застосування принципу рекуперації енергії, не вичерпується прикладами наведеними на рис.1, 2, 3, 4 і 5, їх значно більше. Так, до таких розробок можна віднести рекуперацію енергії безпосередньо в приводному колесі [7] фірми General Electric (США), а також застосування рекуперативного дросельного регулювання швидкості [8] в гідроприводі машини, що створено в МАДІ-ПУ. До цього напрямку відносяться розробки гідрофікованих екскаваторів, фірми «Син Катерпілер Міцубісі», в яких двигун внутрішнього згорання замінено на систему живлення від акумуляторних батарей, про що наведено в роботі [9], професором А.В. Ранневим. Такі екскаватори можуть працювати в міській зоні при нормальних режимах навантаження без додаткової зарядки батарей всю зміну. Для роботи протягом 3...4 годин потрібно до 8 годин для підзарядки батарей. Створені екскаватори є екологічно чистими і працюють практично без шумно.

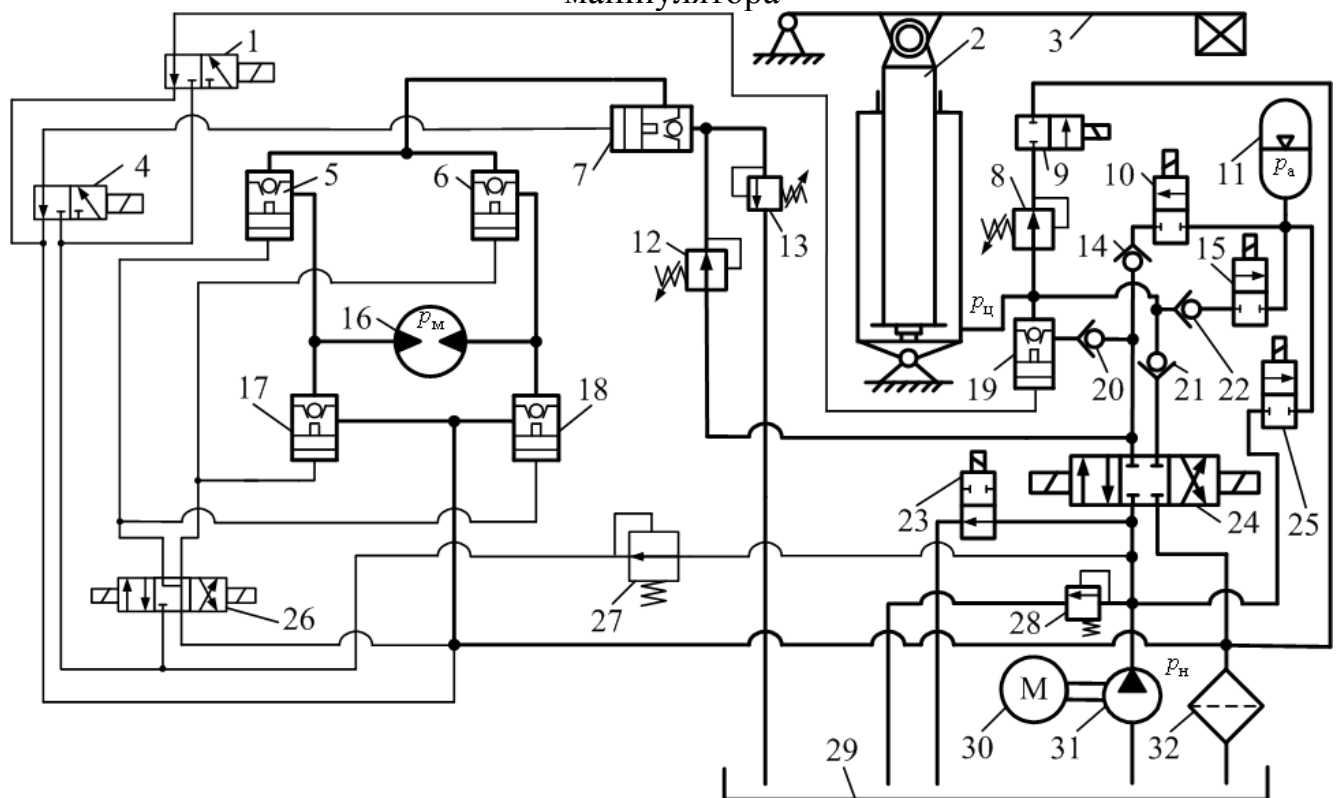
В цілому з наведеного огляду можна констатувати, що представлені розробки здебільшого уже використовуються, а деякі потребують свого теоретичного і експериментального підтвердження. Подальше використання принципу рекуперації енергії в гідросистемах різних за призначенням машин можна отримати за рахунок пошуку ще незадіяних резервів, які можливо виявити тільки на основі знань фізики робочих процесів досліджуваних машин, зокрема зі стріловим робочим обладнанням.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є забезпечення принципу рекуперації енергії в гідросистемах машин зі стріловим робочим обладнанням за рахунок перетворення енергії від опускання стріли в енергію обертання поворотної платформи із можливістю складання енергії від гідропневмоакумулятора та від насоса в складових робочого циклу таких машин.

Для досягнення в роботі поставленої мети необхідно: – визначити умови при яких раціонально суміщати процес опускання стрілового обладнання з роботою механізму обертання цих машин і теоретично обґрунтувати таку можливість; – розробити гідросистему яка при попередніх витратах енергії на підйом стрілового обладнання забезпечить процес перетворення цієї енергії при опусканні стрілового обладнання в енергію механізму обертання машини.

**Результати досліджень.** Для досягнення мети досліджень спочатку розглянемо створену гідросистему з двома механізмами, що включає механізм управління стріловим обладнанням при подачі робочої рідини до плунжерного гідроциліндра та механізм обертання стрілового обладнання за допомогою гідравлічного високомоментного гідромотора. Створена гідросистема наведена на рис. 6.

Рис. 6. Гідросистема машини зі стріловим обладнанням і механізмом обертання цього обладнання, наприклад, для крана або маніпулятора



На рис. 6 позначення відповідають наступному: 1, 4, 9, 10, 15, 23, 24, 25, 26 – гідророзподільники з електромагнітним керуванням; 2 – гідроциліндр плунжерний; 3 – стріла з вантажем; 5, 6, 7, 17, 18, 19 – клапан керований; 11 – гідропневмоакумулятор; 8, 12, 27 – клапан редукційний; 13, 28 – клапан запобіжний; 14, 20, 21, 22 – клапан зворотний; 16 – гідромотор; 29 – масляний бак; 30 – двигун приводний; 31 – насос; 32 – фільтр.

Гідравлічна схема, що наведена на рис. 6, забезпечує такі функції:

- підйом вантажу при умові подачі робочої рідини від насоса 31 під тиском  $\delta_1$  через праву позицію гідророзподільника 23 при включенні цієї позиції, а далі робоча рідина рухається через зворотний клапан 21 до плунжерного гідроциліндра 2 досягаючи тиску рідини на рівні  $\delta_0$ , який забезпечує процес підйому стрілового обладнання;

- традиційне опускання стріли з вантажем забезпечується включенням гідророзподільника 9 з забезпеченням заданої швидкості опускання стрілового

обладнання при витісненні робочої рідини з плунжерного гідроциліндра 2 через редуційний клапан 8 в масляний бак 29 через фільтр 32;

– традиційне обертання механізму повороту машини, тобто, обертання стрілового обладнання і вантажу виконується завдяки сумісній роботі насоса 31 і гідромотора 16 при включенні лівої позиції гідророзподільника 24 та за рахунок подачі напруги на лівий електричний магніт цього гідророзподільника. Рух рідини забезпечується далі через редуційний клапан 12 та через керований клапан 7 при включенні електричного магніту гідророзподільника 4 одночасно з яким включається один з електричних магнітів гідророзподільника 26 правий або лівий, чим забезпечується включення правої або лівої позиції цього ж гідророзподільника 26 і згідно з цим забезпечується направлення рідини управління для попарного відкриття керованих клапанів 5 і 18 або 6 і 17, які відкривають свої затвори і відповідно свої канали для пропуску робочої рідини від насоса 31 до гідромотора 16 і від останнього робоча рідини направляється на злив в масляний бак 29 через фільтр 32 і таким чином забезпечується процес обертання вала гідромотора 16 в тому чи зворотному напрямках, а відповідно процес обертання стрілового обладнання в одному із необхідних напрямків;

– перетворення енергії піднятого вантажу зі стрілою в енергію обертового руху стрілового обладнання забезпечується за рахунок тиску рідини  $\delta_6$ , який створюється під дією вагових параметрів стріли і вантажу. Для створення заданого напрямку руху робочої рідини від гідроциліндра 2 до гідромотора 16 забезпечується подача тиску рідини від насоса 31 в камеру управління керованого клапана 19 завдяки подачі напруги на електричний магніт гідророзподільника 1. Включення робочої позиції гідророзподільника 1, забезпечується відкриття затвору керованого клапана 19 та пропуск робочої рідини під тиском  $\delta_6$  з плунжерного гідроциліндра 2 через канали керованого 19 і зворотного 20 клапанів. Далі слід читати згідно тексту відміченого вище курсивом;

– акумулювання енергії гідропнемоакумулятором 11 при підключенні його до насоса 31. Цей процес забезпечується при подачі напруги на електричний магніт гідророзподільника 25 і включенням позиції цього гідророзподільника в робоче положення, в результаті чого насос 31 трубопроводами з'єднується з гідропнемоакумулятором 11, тобто забезпечується зарядка гідропнемоакумулятора гідравлічною енергією до величини тиску  $\delta_a$ ;

– перетворення енергії гідропнемоакумулятора 11 в енергію обертового руху стрілового обладнання забезпечується за рахунок тиску рідини  $\delta_a$ . Процес віддавання з накопиченої енергії від гідропнемоакумулятор 11 забезпечується при подачі напруги на електричний магніт гідророзподільника 10 і включенням позиції цього гідророзподільника в робоче положення, в результаті чого гідропнемоакумулятор 11 трубопроводами з'єднується через зворотній клапан 14 з редуційним клапаном 12. Далі слід читати згідно тексту відміченого вище курсивом;

– можливий варіант сумісного складання енергії від плунжерного гідроциліндра 2, гідропнемоакумулятора 11 та насоса 31 та інші варіанти,

наприклад складання енергії від гідроциліндра 2 і гідропнемоакумулятора 11 та від гідроциліндра 2 і насоса 31;

– акумулювання енергії гідропнемоакумулятором 11 при підключенні його до плунжерного гідроциліндра 2;

– при включенні одного із гідророзподільників, зокрема, 1, 4, 9, 10, 15, 24 та 25 разом з ними включається в роботу гідророзподільник 23, який перекриває потік робочої рідини від насоса 31 на злив в масляний бак 29. При відключенні всіх гідророзподільників в тому числі і гідророзподільника 23 забезпечується розвантаження насоса 31 від дії високого тиску рідини, який досягає рівня близькому до атмосферного.

Процес перетворення енергії поступального руху штока гідроциліндра, з'єднаного шарнірно зі стріловим обладнанням і вантажем, в обертний рух вала гідромотора механізму повороту базується на особливих функціях складових елементної бази, які з'єднуються в окремі підсистеми, які в свою чергу з'єднані між собою створюючи гідросистему в цілому, як складну технічну систему, що забезпечує виконання робочих функцій з заданими закономірностями. Для встановлення цих закономірностей необхідно виконати ряд складних теоретичних досліджень. Для спрощення досліджень, на першому етапі їх виконання, процес функціонування будемо розглядати тільки для сталого режиму роботи обох гідрофікованих механізмів машини. При цьому таке спрощення є допустимим при розробці дослідницької гідросистеми машини зі стріловим обладнанням і механізмом обертання цієї ж машини.

До відомих параметрів плунжерного гідроциліндра, можна віднести тиск рідини, що діє в робочій порожнині гідроциліндра  $\delta_{\circ}$ , робоча поверхня штока  $F_{\circ}$  та швидкість переміщення штока гідроциліндра  $\mathcal{Q}_{\circ}$ . До відомих параметрів гідромотора можна віднести рівень тиску рідини на вході в гідромотор  $\delta_1$  та кутова швидкість обертів його вала  $\omega_1$ . До відомих параметрів гідропнемоакумулятора можна віднести тиск в його робочій порожнині  $\delta_a$  та тривалість  $t_{\delta a}$  розрядження гідропнемоакумулятора за часом роботи.

До невідомих параметрів можна віднести величини об'ємів робочих камер гідромотора та гідропнемоакумулятора.

Закономірності взаємозв'язку між функціональними параметрами гідравлічних систем приводу механізмів машини можуть бути встановлені на основі застосування принципу рівності потужностей механізмів машини.

Об'єм робочої камери гідромотора, при умові коли гідроциліндр є джерелом енергії, а гідромотор – споживачем, визначається за залежністю

$$V_1 = \frac{2\pi F_{\circ} \mathcal{Q}_{\circ}}{\omega} K_1, \quad (1)$$

де  $K_1 = p_{\circ}/p_1$  – співвідношення тисків рідини на виході гідроциліндра і на вході гідромотора.

Об'єм робочої камери гідромотора, при умові коли гідропнемоакумулятор є джерелом енергії, а гідромотор – споживачем, визначається за формулою

$$V_1 = \frac{2\pi V_a}{\omega t_{\delta a}} K_2, \quad (2)$$

де  $K_2 = p_a / p_1$  – співвідношення тисків рідини на виході гідропнемоакумулятора і на вході гідромотора.

Оскільки в обох випадках при роботі вказаних систем об'єм робочої камери гідромотора є однаковим, тоді можна визначити величину об'єм робочої камери гідропнемоакумулятора, який складатиме величину

$$V_a = \frac{F_{\delta} \mathcal{G}_{\delta} t_{\delta a} K_2}{K_1}. \quad (3)$$

Відмінністю робота двох механізмів є такою, коли гідроциліндр становиться джерелом енергії, а гідропнемоакумулятор працює як споживач. Тоді об'єм робочої камери гідропнемоакумулятор визначається згідно формули

$$V_a = F_{\delta} \mathcal{G}_{\delta} t_{\delta a} K_3, \quad (4)$$

де  $K_3 = p_{\delta} / p_a$  – співвідношення тисків рідини на виході гідроциліндра і на вході в гідропнемоакумулятор.

Можливі і інші варіанти роботи, коли джерелом енергії може бути гідропнемоакумулятор, а гідроциліндр споживачем енергії.

Представлена робота може являтися основою для продовження теоретичних і експериментальних досліджень по виявленню оптимальних рішень при проектуванні машин з такими механізмами.

**Висновки.** На підставі отриманих результатів роботи можна відзначити, що проведені дослідження по розширенню функціональних можливостей гідросистеми машини за рахунок застосування принципу рекуперації енергії буде сприяти більш широкому його застосуванню в гідроприводі, дозволить знизити енерговитрати з поліпшенням екологічних показників таких машин, як гідрофіковані крани та маніпулятори.

## Список літератури

1. Щемелев А.М. Влияние упругой подвески рабочего оборудования погрузчика на технико-экономические показатели его работы / А.М. Щемелев, С.Ю. Кудош // Строительные и дорожные машины. – 2005. – №2. – С. 34–36.
2. Башкиров В.А. Параметры аккумуляторной установки системы рекуперации энергии опускания рабочего оборудования экскаватора / В.А. Башкиров, Ю.М. Качкин // Строительные и дорожные машины. – 1989. – №1. – С. 10–12.
3. Якушев А.Е. Исследование энергосберегающих систем / А.Е. Якушев // Строительные и дорожные машины. – 2003. – №12. – С. 35–38.
4. Мотрохов И.А. Гидрообъемная трансмиссия поворота платформы экскаватора, включающая гидропневматический аккумулятор / И.А. Мотрохов // Горный журнал. – 1970. – №1. – С. 86–91.
5. Голубев В.И. Энергосберегающая гидравлическая система для городского транспорта / В.И. Голубев, В.А. Глушенков, В.П. Ожогин, О.М. Бабаев //



- Приводная техника. – 1997. – №3. – С. 16–17.
6. Бабаев О.М. Гидравлические трансмиссии троллейбусов для горной местности / О.М. Бабаев, В.И. Голубев, В.А. Глушенков, Г.М. Моргунов // Привод и управление. – 2000. – №0. – С. 12–16.
  7. Андриенко Н.Н. Система рекуперации энергии в транспортном средстве фирмы General Electric (США) / Н.Н. Андриенко, В.Л. Хасилев // Строительные и дорожные машины. – 1991. – №1. – С. 7–8.
  8. Щербаков В.Ф. Рекуперационное дроссельное регулирование скорости гидроприводов СДМ / В.Ф. Щербаков // Строительные и дорожные машины. – 2005. – №6. – С. 25–28.
  9. Раннев А.В. Электропривод гидравлических экскаваторов с питанием от аккумуляторных батарей / А.В. Раннев // Строительные и дорожные машины. – 2002. – №8. – С. 15–16.
  10. Ремарчук М.П. Энергозбереження в гідравлічних приводах мобільних і стаціонарних технічних систем / М.П. Ремарчук, С.І. Овсянніков, Я.В. Чмуж, С.В. Воронін // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, вип. 136. – Харків, 2013. – С. 97–106.

#### **Аннотация**

### **РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЦИПА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ МАШИН СО СТРЕЛОВЫМ РАБОЧИМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

Ремарчук Н.П.

*В статье показаны пути реализации принципа рекуперации энергии в гидравлическом приводе машин со стреловым рабочим оборудованием за счет преобразования энергии опускающейся стрелы в энергию вращения поворотной платформы с возможностью суммирования энергии от гидропневмоаккумулятора или от насоса. Такое решение обеспечивает снижение расхода энергии от первичного двигателя.*

#### **Abstract**

### **IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLE OF RECOVERY OF ENERGY IN HYDRAULIC DRIVES OF VEHICLES WITH BOOM WORKING EQUIPMENT**

Remarchuk M.P.

*The article shows the way of the implementation of the principle of recovery of energy in a hydraulic drive cars with the boom work equipment by converting the energy of a lowering the boom in the energy of rotation of the turntable with the possibility of summing energy from гидропневмоаккумулятора or from the pump. This solution ensures the reduction of consumption of energy from the primary engine.*