

УДК 621.225.69.002.51

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Л.А. Хмара, профессор, д.т.н., А.П. Холодов, ассистент, ХНАДУ

*Аннотация.* Представлены результаты лабораторных экспериментальных исследований системы аккумулирования энергии и осциллограммы процесса возврата энергии.

*Ключевые слова:* аккумулятор, энергия, гидропривод, мощность, рекуперация.

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОАККУМУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ

Л.А. Хмара, професор, д.т.н., А.П. Холодов, асистент, ХНАДУ

*Анотація.* Представлено результати лабораторних експериментальних досліджень системи акумулювання енергії та осцилограми процесу повернення енергії.

*Ключові слова:* акумулятор, енергія, гідропривод, потужність, рекуперация.

## HYDROACCUMULATOR SYSTEM EFFECTIVENESS

L. Khmara, Professor, Doctor of Technical Science, A. Kholodov, assistant, KhNAHU

*Abstract.* The results of laboratory experimental investigations of energy storage system and oscillograms of the process of energy return are presented.

*Key words:* accumulator, energy, hydraulic drive, power, recovery.

### Введение

В последнее время ввиду роста цен на топливо и ухудшения экологической обстановки на планете все больший интерес вызывает возможность аккумулирования энергии [1–3].

### Анализ публикаций

Поиски идут в области использования так называемых «вечных» и чистых источников энергии: ветра, морского прибоя, приливов и отливов, рек, солнца и т.д. Другую группу источников и аккумуляторов энергии, которые могут в широких масштабах быть использованы уже в наше время, представляют собой маховики, пружинные двигатели, аккумуляторы в виде поднятого груза или воды, гидро- и пневмоаккумуляторы [4]. Наиболее широкая область применения открывается для быстровращающихся маховиков (гироскопов) и особенно их нового типа, получившего название «супермаховика» (Superflywheel) [3, 4] (рис. 1).

При ограниченной мощности энергоустановок, определяемой обычно установившимися режимами эксплуатации, для форсирования нестационарных режимов, характеризующихся повышенным расходом энергии, и реализации плавности их работы существует потребность в постоянном её запасе. Роль аккумулятора такого запаса успешно может выполнять маховик. Возросший интерес к маховикам объясняется их новыми конструкциями, используемыми материалами, высокой способностью накапливать энергию (по сравнению с другими устройствами подобного назначения) и большим КПД (~ 95 %). К тому же они дают экономию топлива, отличаются экологической чистотой и технической безопасностью [4, 12]. Сейчас в США испытывается ленточный маховик из композитного углеродосодержащего материала высотой 1,2 и диаметром 1,5 м, вращающийся в вакуумной камере на магнитной подвеске с частотой 50000 об/мин, накапливая 133 киловатт-часа энергии, то есть в 3 раза больше, чем обычный аккумулятор

такого же веса. Он позволит экономить 15 % энергии на разгонах. В России использование маховиков на транспорте было впервые предложено инженер-поручиком З.И. Шуберским в 1862 году [13]. Ещё раньше (1791) с целью рекуперации кинетической энергии и достижения плавности движения русский механик-самоучка И.П. Кулибин на своей «самокатной» коляске установил массивный маховик.



Рис. 1. Маховичные двигатели: а – маховичный двигатель (США); б – коляска Кулибина; в – гирозвз Шуберского

Однако для землеройных транспортных машин циклического действия, режим работы гидропривода которых характеризуется резко выраженной циклическостью, наиболее целесообразно устанавливать гидропневматический аккумулятор, простой по конструкции, компактный и удобный в эксплуатации автономных гидросистем [7, 8] (рис. 2, 3). Это объясняется тем, что подъем рабочего органа в процессе копания в большинстве случаев производится при сниженных оборотах двигателя, вследствие перегрузки последнего. Для восстановления числа оборотов двигателя требуется быстрое снятие перегрузки, т. е. выглубление рабочего органа при возможно максимальной скорости его подъема. В этих условиях для получения оптимальной производительности машины необходимо иметь максимально возможную производительность гидронасоса. Однако повышенная производительность гидронасоса нужна только в течение короткого времени. Таким образом, выполнение требований по сочетанию вышеуказанных условий (циклическость действия, падение производительности гидронасоса и необходимость иметь максимальную скорость подъема рабочего органа) может быть обеспечено или установкой гидронасоса большей производительности, или включением в сеть специального аккумулятора давления [7]. Таким образом, на гидрофицированных машинах циклического действия широкое применение получили гидропневмоаккумуляторы.

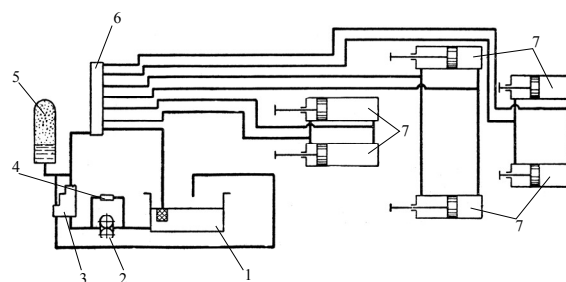


Рис. 2. Схема гидропривода с гидропневмоаккумулятором [7]: 1 – бак; 2 – насос; 3 – автомат разгрузки; 4 – предохранительный клапан; 5 – гидроаккумулятор; 6 – распределитель; 7 – гидроцилиндр

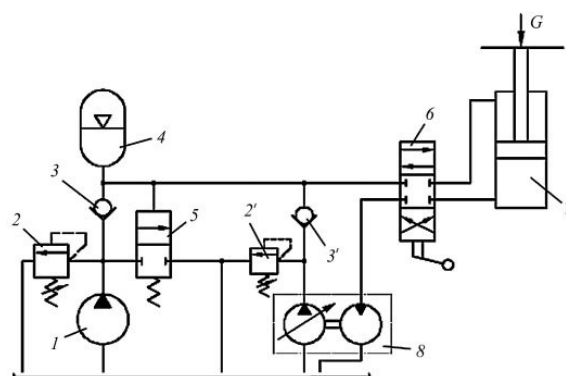


Рис. 3. Гидропривод, рекуперирующий энергию опускаемого груза: 1 – гидронасос; 2 и 2' – предохранительные клапаны; 3 и 3' – обратные клапаны; 4 – пневмогидравлический аккумулятор; 5 и 6 – гидрораспределители; 7 – гидроцилиндр; 8 – блок системы рекуперации (гидромотор и регулируемый насос)

В связи с вышесказанным исследование аккумулярующих систем является неотъемлемой частью процесса их совершенствования и адаптации к различным машинам [4, 5, 7, 8, 9, 10].

### Цель и постановка задачи

На базе лаборатории гидропривода кафедры строительных и дорожных машин Харьковского национального автомобильно-дорожного университета были проведены экспериментальные исследования процесса аккумулярования и возврата гидравлической энергии для совершения полезной работы по подъему груза.

Цель исследования – установить диапазон эффективной работы гидропневмоаккумулятора при различных нагрузках и оценить

возможность эффективной работы данной системы на землеройно-транспортной машине путем анализа развиваемых в процессе работы давлений.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать конструкцию экспериментального стенда;
- произвести планирование экспериментальных исследований;
- проанализировать полученные циклограммы процесса возврата гидравлической энергии и определить работоспособность предлагаемой системы.

Для проведения исследований была создана экспериментальная установка (рис. 4), гидравлическая схема которой представлена на рис. 5 [6].



Рис. 4. Экспериментальная установка

На стенде внешняя нагрузка на гидроцилиндр Ц моделируется с помощью грузовой корзины ГР и четырехкратного полиспаста П. Для визуального наблюдения за развиваемым усилием установлен динамометр Д. На стенде установлен насос НШ-10, который служит для зарядки гидропневмоаккумулятора АК. Давление в газовой и рабочей камерах аккумулятора и в штоковой полости гидроцилиндра контролируется манометрами, а при записи исследуемого процесса – датчиками давления ПД 10/2. Насос приводится в действие от электродвигателя М. Двухпозиционный гидрораспределитель Р1 обеспечивает зарядку АК, после чего происходит про-

цесс возврата энергии в систему для выполнения полезной работы. При этом рабочая жидкость через гидрораспределитель Р2 попадает в штоковую полость гидроцилиндра Ц. Слив осуществляется через гидрораспределитель Р3.

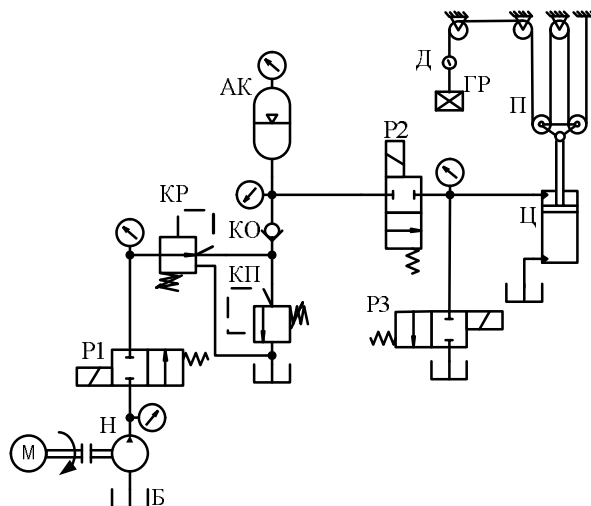


Рис. 5. Экспериментальная установка: М – электродвигатель; Б – бак; Н – гидронасос; Р1, Р2, Р3 – гидрораспределители; КР – редукционный клапан; КО – обратный клапан; КП – клапан предохранительный; АК – гидропневмоаккумулятор; Ц – гидроцилиндр; ГР – груз; П – полиспаст; Д – динамометр

Техническая характеристика экспериментальной установки приведена в табл. 1.

Таблица 1 Техническая характеристика экспериментальной установки

| Оборудование     | Параметр  | Значение   |
|------------------|-----------|------------|
| Гидроаккумулятор | $P_0$     | 3,2 МПа    |
|                  | $V_{AK}$  | 10 л       |
| Насос            | Марка     | НШ-10      |
|                  | $P_{ном}$ | 16 МПа     |
|                  | $Q_n$     | 6,9 л/мин  |
| Электродвигатель | $N_{эд}$  | 2,2 кВт    |
|                  | $n_{эд}$  | 750 об/мин |
| Гидроцилиндр     | $D$       | 50 мм      |
|                  | $d$       | 25 мм      |
|                  | $l_n$     | 100 мм     |

Для записи исследуемого процесса использовалась регистрирующая аппаратура в виде ноутбука со специальным программным обеспечением и аналого-цифровым преобразователем (характеристика: частота опроса каждого канала – 365 Гц, количество каналов – 8, разрядность – 10) (рис. 6), а также датчи-

ком перемещения ППП 200 (рис. 7) для регистрации скорости перемещения штока гидроцилиндра и количества подъемов груза и датчиков давления (рис. 8), установленных в газовой и рабочей камерах гидропневмоаккумулятора и в штоковой полости гидроцилиндра.



Рис. 6. Измерительная аппаратура

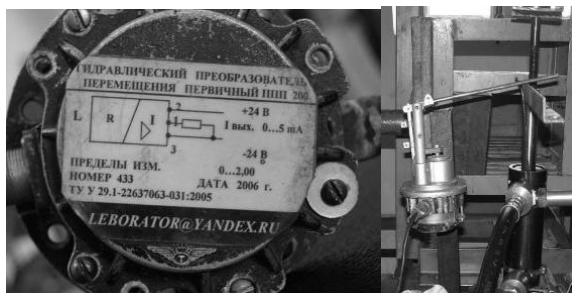


Рис. 7. Гидравлический преобразователь перемещения ППП 200

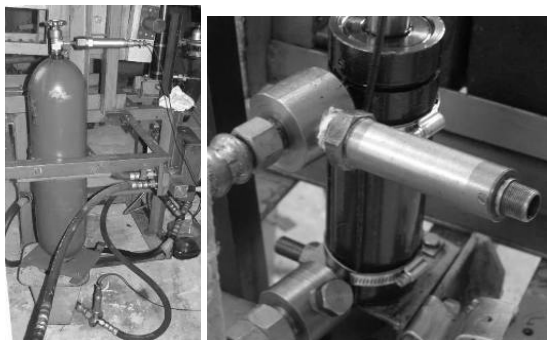


Рис. 8. Расстановка датчиков давления

Проведение эксперимента в лабораторных условиях позволяет, во-первых, исключить действие факторов, влияющих на функционирование гидропривода, но не определяющих его техническое состояние, во-вторых,

создать близкий к эксплуатационному стабильный режим работы, в-третьих, легко регулировать усилие на штоке гидроцилиндра и уровень зарядки аккумулятора.

Исходя из характеристик экспериментальной установки, были выбраны минимальные и максимальные значения факторов и, согласно теории планирования, была составлена таблица условий эксперимента (табл. 2).

Диапазоны, в которых варьировались давление зарядки гидропневмоаккумулятора и усилие на штоке гидроцилиндра, в ходе экспериментальных исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2 Кодирование факторов

| Факторы                                | Уровни     |            |           |                           |                           | Интервал варьирования $\epsilon_i$ |
|----------------------------------------|------------|------------|-----------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|
|                                        | Верхний +1 | Основной 0 | Нижний -1 | Звездная точка - $\alpha$ | Звездная точка + $\alpha$ |                                    |
| $x_1$ – давление в газовой камере, МПа | 10         | 7,5        | 5,5       | 5,5                       | 10                        | 20                                 |
| $x_2$ – масса груза, кг                | 175        | 125        | 75        | 75                        | 175                       | 50                                 |

В соответствии с ортогональным композиционным центральным планом второго порядка был проведен ряд опытов (табл. 3) [11].

Таблица 3 План эксперимента

| № опыта (осциллограммы) | Давление зарядки аккумулятора, Па | Масса груза, кг |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 1                       | 100                               | 175             |
| 2                       | 55                                | 175             |
| 3                       | 100                               | 75              |
| 4                       | 55                                | 75              |
| 5                       | 55                                | 125             |
| 6                       | 100                               | 125             |

В табл. 3 номера опытов соответствуют номерам осциллограмм проведенных опытов на рис. 10. На рис. 9 приведена осциллограмма процесса возврата энергии.

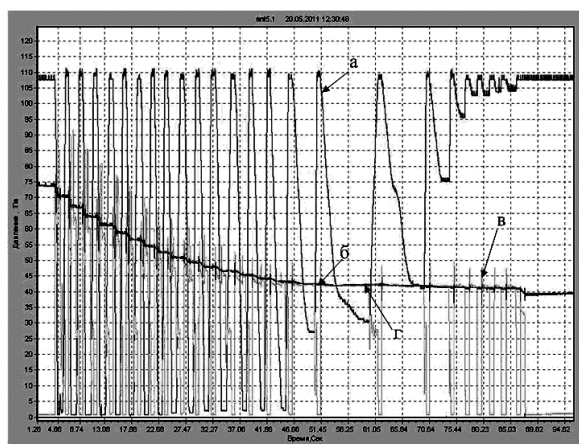


Рис. 9. Осциллограмма процесса возврата энергии при грузе 125 кг и давлении 75 Па: а – перемещение штока гидроцилиндра; б – газовая камера гидроаккумулятора; в – штоковая полость гидроцилиндра; г – рабочая камера гидроаккумулятора

Рассматривая график перемещения штока гидроцилиндра, следует считать, что ниспадающая каждого периода соответствует перемещению штока на поднимание груза. Следовательно, уменьшение частоты периодов соответствует уменьшению скорости перемещения поршня гидроцилиндра по мере разрядки гидроаккумулятора.

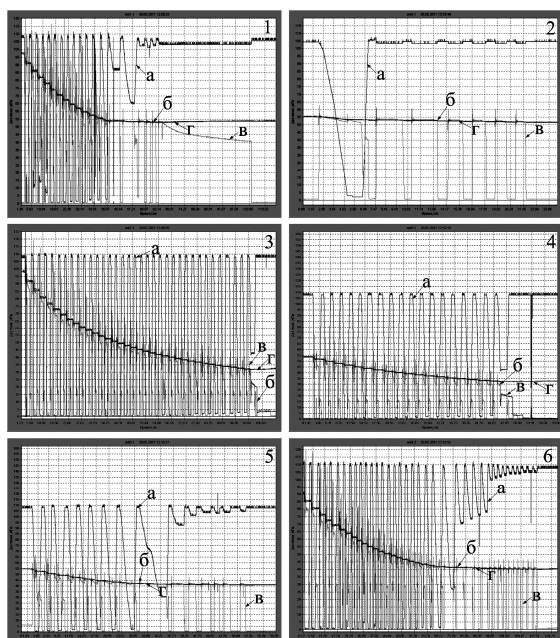


Рис. 10. Осциллограммы процесса возврата энергии

Для визуальной наглядности зависимости количества подъемов груза  $n$  от его массы и давления зарядки введем относительный по-

казатель  $P/m$ , где  $P$  – давление зарядки аккумулятора,  $m$  – масса груза. С помощью системы компьютерной алгебры MathCAD представим полученный результат в виде графика (рис. 11). Также можно представить характер падения давления зарядки  $P$  во времени  $t$  при разрядке гидроаккумулятора в зависимости от усилия, развиваемого на штоке гидроцилиндра грузом массой  $m$  (рис. 12).

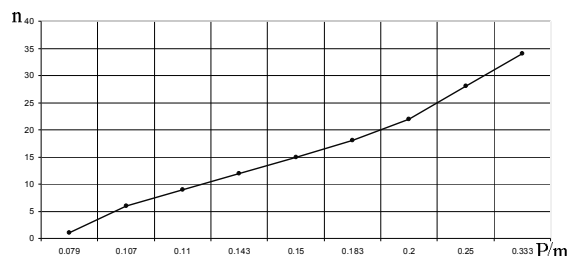


Рис. 11. Зависимость количества подъемов груза от давления зарядки

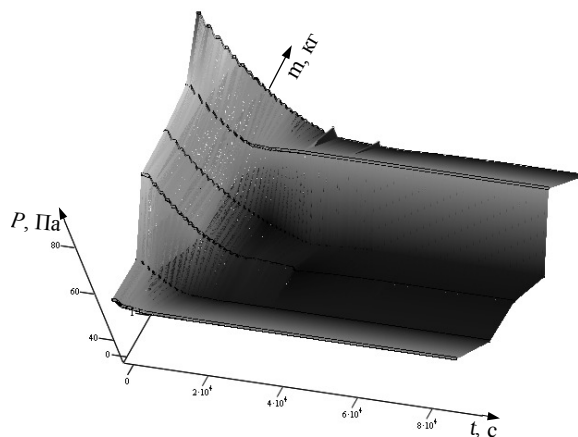


Рис. 12. Сводная диаграмма разрядки гидропневмоаккумулятора

Для гидрофицированных мобильных машин целесообразна разработка новых конструкций гидроаккумуляторов, которые значительно бы не увеличивали массу машины, имели широкий диапазон давлений и были универсальными для всех типоразмеров машин. В связи с этим авторами предложены следующие конструкции гидроаккумуляторов (рис. 13).

На рис. 13, б, в, г показаны конструкции гидропневмоаккумуляторов со вспомогательной жидкостной камерой, где 1 – клапан подачи жидкости в вспомогательную камеру; 2 – вспомогательная жидкостная камера; 3 – поршень; 4 – пневмоклапан; 5 – эластичный разделитель; 6 – газовая камера; 7 – жидкостная рабочая камера; 8 – клапан подачи жидкости в рабочую камеру; 9 – мембрана.

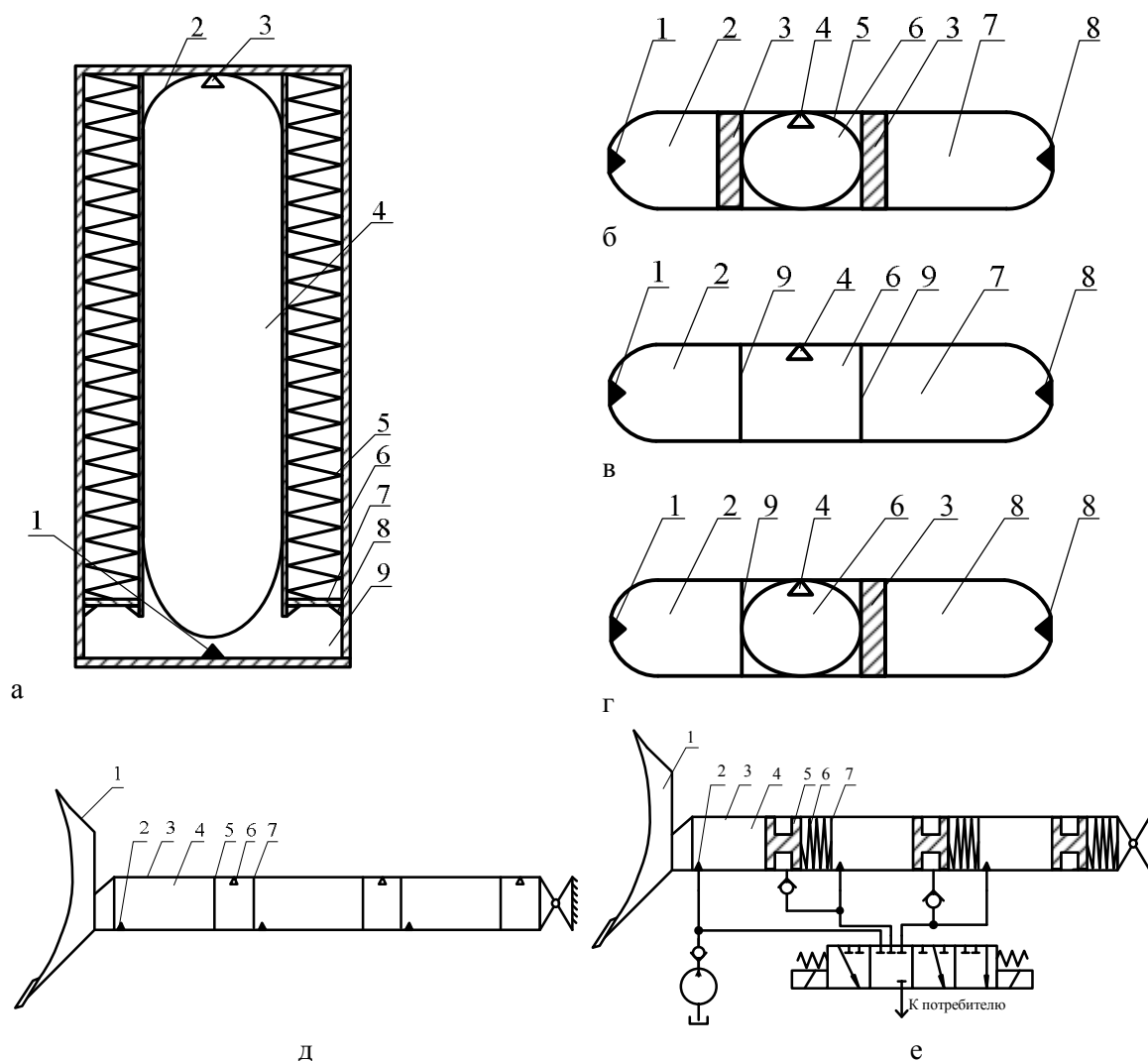


Рис. 13. Перспективные конструкции гидроаккумуляторов: а – гидropневмомеханический аккумулятор; б, в, г – гидropневмоаккумулятор со вспомогательной жидкостной камерой; д, е – гидropневмоаккумулятор, интегрированный в толкающие брусья бульдозера

На рис. 13, д, е приняты такие обозначения: 1 – отвал; 2 – гидроклапан; 3 – толкающий брус; 4 – рабочая камера аккумулятора; 5 – мембрана; 6 – пневмоклапан; 7 – перегородка; 8 – поршень; 9 – пружина. На рис. 9, д, е представлены конструкции гидроаккумулятора, когда в качестве его корпуса используется полая металлоконструкция машины, например толкающие брусья бульдозера. Причем аккумуляторы могут выполняться с несколькими секциями, каждая из которых имеет различное давление. Секции могут выполняться как с мембранным разделителем сред (рис. 9, д), так и с пружинно-поршневым (рис. 9, е). Также возможно использовать специальный алгоритм зарядки данного аккумулятора, когда секции заряжаются поочередно от меньшего давления к большему, для чего необходимо использовать гидрорегулирующую систему (рис. 13, е).

## Выводы

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенной системы. Диапазон эффективной работы гидropневмоаккумулятора зависит от уровня внешней нагрузки и степени его зарядки. Предложенная система может быть применима к различным гидрофицированным машинам циклического действия и позволит снизить установочную мощность первичного двигателя на 5–10 %.

## Литература

1. Хмара Л.А. Применение аккумуляторов потенциальной энергии в строительных машинах (на примере одноковшового экскаватора) / Л.А. Хмара // Строительство. Материаловедение. Машиностроение.

- ние. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин: сб. науч. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, – 2005. – Вып. 33. – С.17–33.
2. Машини для земляних робіт: навч. посібн. / Л.А. Хмара, С.В. Кравець, В.В. Нічке, Л.В. Назаров та ін.; за заг. ред. Л.А. Хмари та С.В. Кравця. – Рівне – Дніпропетровськ – Харків, 2010. – 560 с.
3. Гулиа Н.В. Удивительная механика. В поисках «энергетической капсулы» / Н.В. Гулиа. – Изд-во: НЦ ЭНАС, 2006. – 176 с.
4. Гулиа Н.В. Инерционные двигатели для автомобилей / Н.В. Гулиа. – М.: Транспорт, 1974. – 64 с.
5. Волоцкий В.М. Гидроприводы машин и их оборудование: учебный курс / В.М. Волоцкий. – Х.: Гидроэлекс, 1995. – 156 с.
6. Енергозбереження в гідросистемі бульдозера / М.П. Ремарчук, А.П. Холодов, Я.В. Чмуж, Т.Т. Байрамашвілі // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2010. – №94. – С. 385–392.
7. Алексеева Т.В. Гидропривод и гидроавтоматика землеройно-транспортных машин / Т.В. Алексеева. – М.: Машиностроение, 1966. – 148 с.
8. Алексеева Т.В. Использование принципа аккумулирования энергии в системе управления землеройно-транспортной машины / Т.В. Алексеева, Ю.В. Ремизович, В.Г. Шерман // Исследования и испытания дорожных и строительных машин: сб. науч. работ СибАДИ. – 1969. – Вып. 1. – С. 70–75.
9. Щербаков В.Ф. Рекуперативная система привода гидropодъёмных машин / В.Ф. Щербаков // Строительные и дорожные машины. – 2008. – № 9. – С. 49–51.
10. Щербаков В.Ф. Энергосберегающие гидроприводы строительных и дорожных машин / В.Ф. Щербаков // Строительные и дорожные машины. – 2011. – № 10. – С. 1–2.
11. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
12. Dann Richard T. The Revolution in Flywheels / T. Dann Richard // Machine Design. – 1973. – May 17. – P. 130–135.
13. Broniarek C.A. On surfac Vehicle Body Motion with Gyroscopic storage of Kinetik Energy / C.A. Broniarek, C.N. Sandor // Mech. and Mach. Theory. – 1972. – № 2. – P. 20–25.
- Рецензент: Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 17 ноября 2011 г.
-