

УДК 625.08

А. М. Щемелев, канд. техн. наук, проф., А. С. Шибeko

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

Представлена система, обеспечивающая накопление кинетической энергии поступательно движущихся и вращающихся масс при торможении мобильной машины посредством гидравлического мотор-насоса (связан через трансмиссию с ведущими колесами), закачивающего рабочую жидкость в гидроаккумулятор с последующим использованием энергии накопленной жидкости при разгоне.

Приоритетным направлением при разработке новой техники является снижение себестоимости единицы производимой продукции, что наравне с повышением конкурентоспособности ведет к росту сбыта производимой продукции. Рассмотрение данного вопроса применительно к сектору подъемно-транспортной и строительно-дорожной техники очередной раз доказывает, что снижение энергопотребления таких машин является наиболее значимой задачей, направленной на повышение их конкурентоспособности, так как энергозатраты составляют наибольшую долю в себестоимости единицы производимой продукции. Одним из эффективных способов снижения энергопотребления является использование энергосберегающих систем торможения, основанных на принципе рекуперации энергии торможения [1, 2]. Такие системы на сегодняшний день являются актуальной альтернативой классическим системам торможения.

Авторами разработана и запатентована [3, 4] система рекуперативного торможения (СРТ), принцип работы которой заключается в следующем: рекуперативное торможение осуществляется за счет момента, возникающего на гидродвигателе, который кинематически связан с движителем и закачивает рабочую жидкость в блок гидроаккумуляторов. В моменты наибольшей загрузки двигателя внутреннего сгорания машины, при работе в корректорном режиме осуществляется «подкрутка» трансмиссии гидродвигателем, использующим энергию жидкости, закачанной в блок гидроаккумуляторов при торможении.

Современная практика научных ис-

следований предполагает наличие двух взаимно дополняющих друг друга методов — расчетно-теоретического и экспериментального. Поэтому для подтверждения полученных теоретических результатов [5, 6] разработан образец СРТ применительно к погрузчику ТО-18Б, реализующей полученные характеристики. Проведены экспериментальные исследования одноковшового фронтального погрузчика ТО-18Б, оборудованного СРТ.

Целью проведения экспериментов являлось подтверждение работоспособности рекуперативной системы торможения. В задачу экспериментальных исследований входило:

- получение численных значений давления и расхода гидравлической жидкости на выходе гидродвигателя, его частоты вращения, а также тормозного пути и пути разгона исследуемой машины;
- сопоставление полученных экспериментальных результатов с проведенными теоретическими исследованиями;
- оценка адекватности теоретических исследований.

Эксперименты проводились на испытательном полигоне Белорусско-Российского университета. Экспериментальная установка состоит из следующих основных частей: погрузчик ТО-18Б; гидравлическая часть; механическая часть; пневматическая часть; измерительная часть.

Погрузчик ТО-18Б — погрузчик одноковшовый фронтального типа с техническими характеристиками, соответствующими данным завода-изготовителя.

Гидравлическая часть. Для проведения экспериментальных исследований с

рекуперативной гидравлической системой торможения был выбран гидродвигатель, который соответствовал следующим требованиям: обратимость (реверсируемость) — возможность работы гидромашины в режиме насоса или мотора как в прямом, так и в обратном направлениях для обеспечения возможности работы тормозной системы как при движении машины вперед, так и при движении машины назад; регулируемость — возможность плавного регулирования рабочего объема гидромашины для обеспечения плавного изменения момента сопротивления на колесах движителя; максимальный рабочий объем мотор-насоса и допустимое давление должны обеспечивать тормозной момент, необходимый для остановки погрузчика согласно требованиям стандарта для землеройных машин СТБ ИСО 3450-2001 *Тормозные системы колесных машин: требования к эффективности и методы испытаний*; надежность при работе на высоких (до 2000 мин⁻¹) частотах вращения для обеспечения возможности установки в наиболее низкомоментную часть трансмиссии; надежность при работе

в условиях переменных нагрузок, так как погрузчик — это машина циклического действия и за цикл совершает не менее четырех разгонов и соответственно четырех торможений. Выбранный гидродвигатель — гидромотор аксиально-поршневой, регулируемый 303.3.112 с дополнительно разработанными, изготовленными и смонтированными на нем устройством пневматического регулирования и входным и выходным штуцерами.

Монтаж гидродвигателя производился посредством соединения шлицев вала со шлицами зубчатого колеса с последующим креплением фланца гидродвигателя к корпусу раздаточного редуктора и последующей затяжкой и контровкой зубчатого колеса болтом с шайбой для обеспечения неподвижности в осевом направлении.

Последующая сборка системы рекуперативного торможения производилась в соответствии с разработанной для проведения испытаний гидравлической схемой, изображенной на рис. 1.

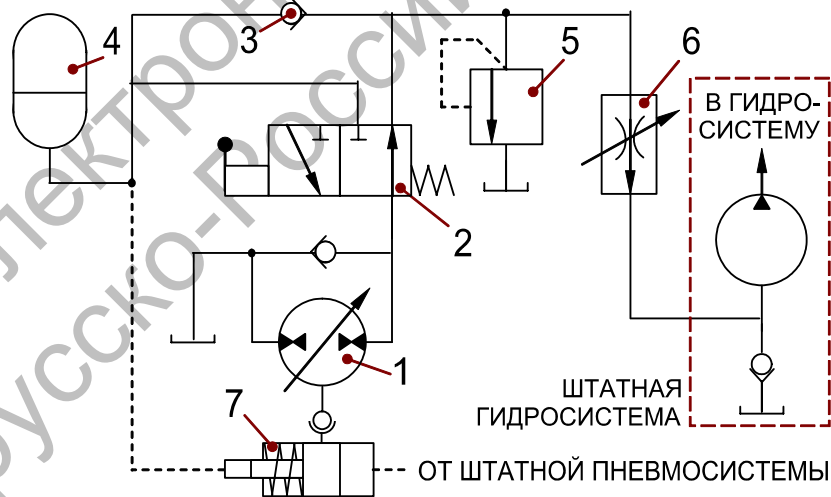


Рис. 1. Гидравлическая часть системы рекуперативного торможения: 1 – гидродвигатель; 2 – гидрораспределитель; 3 – обратный гидравлический клапан; 4 – гидроаккумулятор; 5 – предохранительный клапан; 6 – регулятор расхода; 7 – регулятор

В схеме, представленной на рис. 1, гидравлическая жидкость в гидродвигатель 1 поступает из бака и далее посредством гидрораспределителя 2 направляется

либо в штатную гидросистему через регулятор расхода 6, либо на зарядку блока гидроаккумуляторов 4, либо на предохранительный клапан 5. Гидрораспре-

делитель 2 направляет жидкость либо от гидродвигателя, либо к гидродвигателю: в зависимости от режима работы (разгон, торможение) и направления движения погрузчика. Регулирование рабочего объема гидродвигателя происходит при помощи регулятора 7 за счет воздействия, получаемого от штатной тормозной пневмосистемы в поршневую полость и от гидроаккумулятора 4 в штоковую полость. Гидросистема рекуперации энергии торможения представляет собой встраиваемую систему, действие которой осуществляется на следующих этапах рабочего цикла.

Равномерное движение машины. На рабочем режиме скоростей реверсивный регулируемый гидродвигатель 1, находясь в режиме минимального расхода, подает жидкость через регулятор расхода 6 на вход рабочего насоса штатной гидросистемы.

Торможение машины. Оператор начинает воздействовать посредством штатной пневмосистемы на регулятор 7, тем самым изменяя подачу гидродвигателя 1, что вызывает увеличение давления в гидролинии между гидродвигателем 1 и гидроаккумулятором 4 и, как следствие, зарядку гидроаккумулятора 4. В случае полной зарядки гидроаккумулятора жидкость уходит через предохранительный клапан 5 на слив в гидробак.

Разгон машины. Помощник оператора включает вторую секцию гидрораспределителя 2 и жидкость от гидроаккумулятора 4 поступает на вход гидродвигателя 1, передавая дополнительную мощность посредством трансмиссии на движитель.

Гидравлическое соединение гидродвигателя с гидрораспределителем, гидроаккумулятором и другими элементами, смонтированными на погрузчике, производилось с помощью рукавов высокого давления.

Пневматическая часть. Для проведения экспериментальных исследований с рекуперативной гидравлической системой торможения была также задействована штатная пневмосистема погрузчика. Для забора воздуха из пневмосистемы (рис. 2) в

участок между главным тормозным краном 2 и цилиндрами тормозными был вмонтирован дополнительный пневмораспределитель 3, установленный в кабине оператора.

Механическая часть. Для проведения экспериментальных исследований было определено место установки дополнительного гидродвигателя для рекуперативной гидравлической системы торможения, которое должно было удовлетворять следующим требованиям: наличие свободного места для пространственного расположения; частота вращения должна находиться в пределах номинального режима работы для обеспечения требуемой производительности и надежности; взаимодействие с движителем должно осуществляться посредством жесткой кинематической связи для обеспечения постоянной возможности осуществлять замедление. Место, которое полностью соответствовало необходимым требованиям, — это участок трансмиссии, где установлен аварийный гидронасос рулевого управления (рис. 3).

Для обеспечения возможности привода дополнительно устанавливаемого гидродвигателя экспериментальной установки был разработан и изготовлен новый узел раздаточного редуктора, включающий новое зубчатое колесо и корпус. Новое зубчатое колесо было изготовлено с параметрами зубчатого венца, аналогичными тем, что были на шестерне коробки передач, с которым колесо должно было вступать в зацепление.

Необходимость изготовления нового колеса была продиктована тем фактом, что зубчатое колесо демонтированного раздаточного редуктора не обеспечивает необходимое межосевое расстояние, которое требуется для монтажа гидромотора большего типоразмера. Корпус нового раздаточного редуктора был разработан и изготовлен в соответствии с требованиями для обеспечения надежной связи дополнительно устанавливаемого гидродвигателя с зубчатым колесом штатной коробки передач.

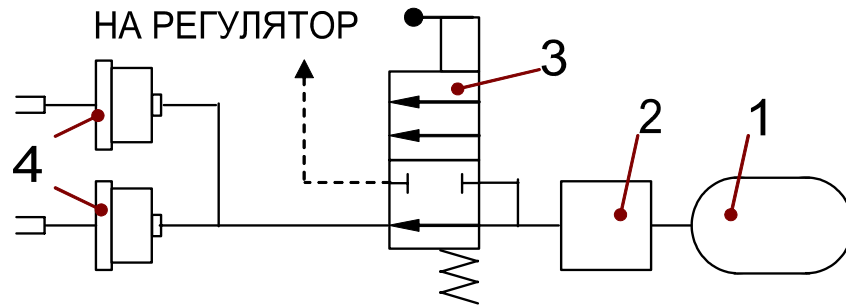


Рис. 2. Пневматическая часть системы рекуперативного торможения: 1 – ресивер; 2 – главный тормозной кран; 3 – пневмораспределитель; 4 – цилиндры тормозные

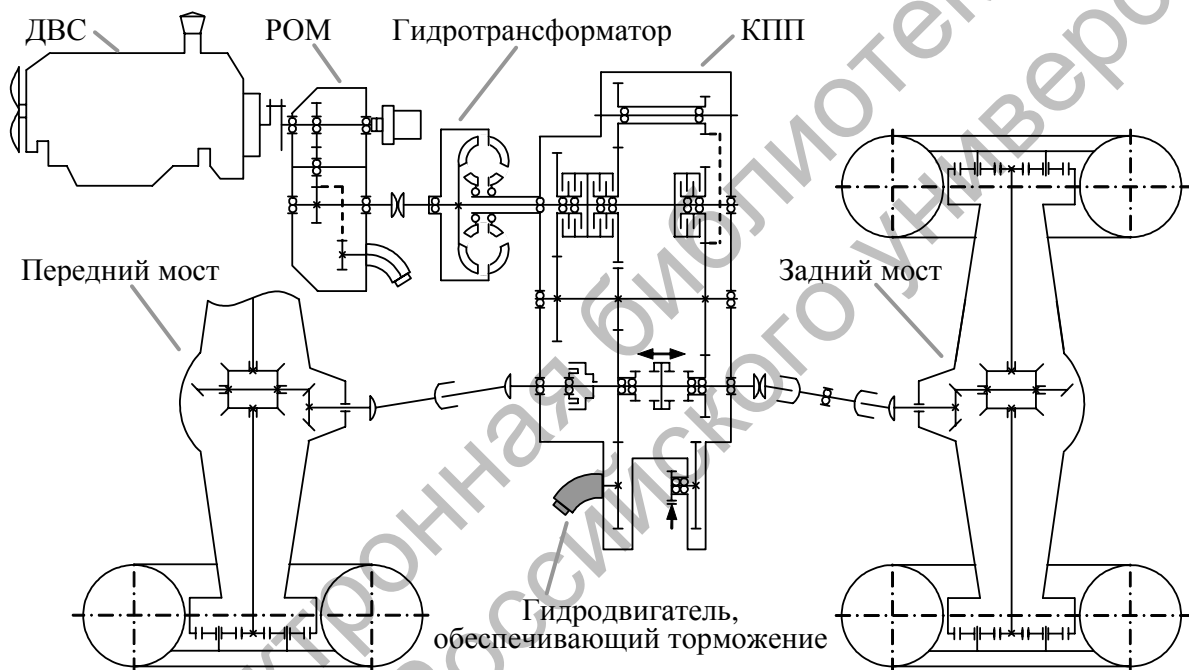


Рис. 3. Кинематическая схема погрузчика ТО–18Б с изображением места подключения гидродвигателя СРТ

Монтаж разработанного корпуса с зубчатым колесом производился с использованием крепежной системы демонтированного раздаточного редуктора.

Измерительная часть. Для проведения экспериментальных исследований с рекуперативной гидравлической системой торможения были использованы три вида регистрирующих датчиков: датчик частоты вращения, датчик давления, датчик расхода.

Основные технические данные датчика регистрации частоты вращения

ДЧХ–8М–В (изготовитель УП «Холтрон», 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 17), дата выпуска 2006 г., приведены в табл. 1.

Датчик регистрации частоты вращения был смонтирован в разработанный корпус раздаточного редуктора таким образом, чтобы регистрировать частоту вращения дополнительного зубчатого колеса.

Постоянная и жесткая кинематическая связь дополнительного зубчатого колеса с колесами движителя позволяла путем несложных математических вы-

числений определять скорость, ускорение и расстояние перемещения погрузчика в

любой момент времени.

Табл. 1. Технические характеристики датчика регистрации частоты вращения ДЧХ–8М–В

Параметры	Значение
Величина рабочего зазора, мм	0–5
Ток потребления не более, мА	10
Диапазон измеряемой частоты, кГц	0,1–10
Напряжение питания, В	9–30
Выходной сигнал $U_{\text{вых}}$, В: при $U_{\text{вых}} = 0$ при $U_{\text{вых}} = 1$	≤ 1 В $15 \pm 0,5$ В
Габаритные размеры, мм	$D = (M20 \times 1)$, $L = 95$
Диапазон рабочих температур, °С	–40...+100

Датчик регистрации расхода рабочей жидкости ТДР14–2–3 (турбинный преобразователь) из комплекта датчиков портативного измерительного комплекса МП–2000 производства ООО ВНИИСТРОЙДОРМАШ (Москва, 2000 г.) с диапазоном измеряемых расходов 10–450 л/мин и погрешностью измерения расхода – 1,5 %.

Датчик регистрации расхода рабочей жидкости был смонтирован в участок вновь разработанной гидросхемы между гидроаккумулятором и гидродвигателем для регистрации как величины потока, исходящего от гидродвигателя, так и величины потока, поступающего на вход гидродвигателя.

Датчик регистрации давления рабочей жидкости ДД–400МПК из комплекта датчиков портативного измерительного комплекса МП–2000 производства ООО ВНИИСТРОЙДОРМАШ (Москва, 2000 г.) с диапазоном измеряемых давлений 0,1–40 МПа и погрешностью измерения давления 1,5 %.

Датчик регистрации давления рабочей жидкости был смонтирован в участок вновь разработанной гидросхемы между гидроаккумулятором и гидродвигателем для регистрации величины давления зарядки гидроаккумулятора.

При проведении исследований использовалась специально разработанная

регистрирующая аппаратура (контроллер Аксон–04Т) с возможностью записи снимаемых значений на ЭВМ типа «notebook».

Контроллер Аксон–04Т имеет встроенный CAN интерфейс с поддержкой протоколов CAN 2.0А и CAN2.0В.

Через CAN–USB конвертер осуществляется преобразование и обмен полученной и обработанной информацией с системой верхнего уровня (в нашем случае ЭВМ типа «notebook»). Управление контроллером осуществляется с ЭВМ, вывод результатов в файл и на экран обеспечивается с помощью специализированной прикладной программы.

Структурная схема измерительного комплекса изображена на рис. 4.

Работа комплекса осуществляется следующим образом: контроллер с определенной частотой (для нашего эксперимента около 10 раз в секунду) опрашивает каждый из датчиков. Сигнал, полученный от датчика, с помощью процессора контроллера обрабатывается и отправляется в очередь по CAN–шине в CAN–USB конвертер, который преобразует сигналы в данные, понятные ЭВМ, и по шине USB отправляет на компьютер. Затем данные принимаются специализированной программой-драйвером и

передаются программе-оболочке, которая предоставляет возможность записи данных на любой цифровой носитель и ото-

бражения данных в численном виде и в виде графических зависимостей на дисплее монитора.

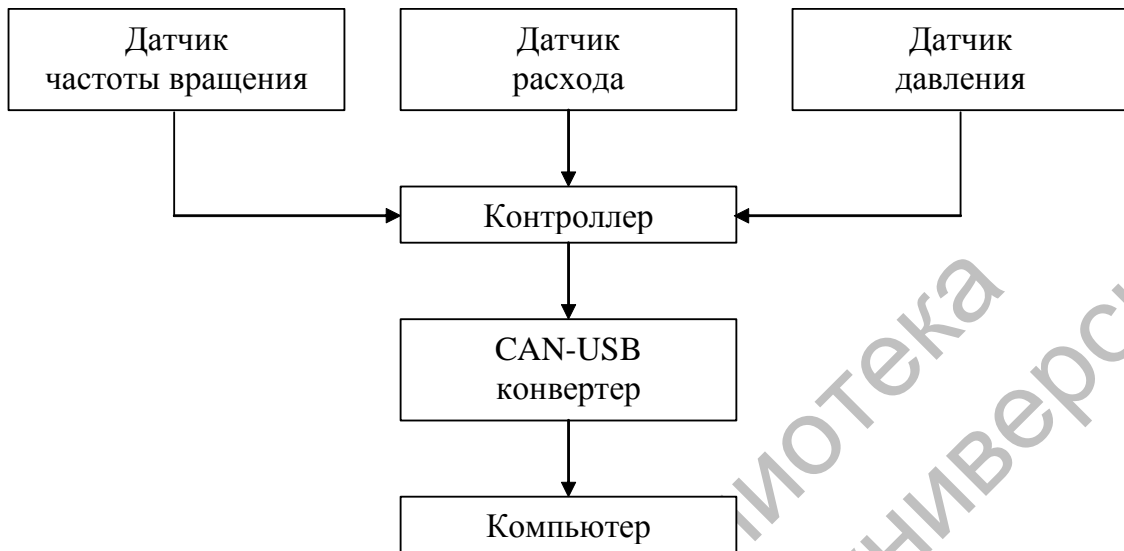


Рис. 4. Структурная схема измерительного комплекса

Методика проведения полевых испытаний СРТ. Полевые испытания проводились с целью определения выходных параметров испытуемой машины как без системы рекуперативного торможения, так и с установленной системой. Фиксирование выходных параметров было вызвано необходимостью обоснования соответствия математических моделей реально происходящим процессам.

Методика проведения полевых испытаний погрузчика без установленной системы рекуперативного торможения предполагала следующий перечень операций:

- путем увеличения подачи топлива и последовательном включении первой и второй передач вперед погрузчик разгонялся до максимальной скорости, при этом коленчатый вал ДВС переходил на максимальную частоту вращения;

- путем воздействия на педаль тормоза производилось штатное замедление погрузчика;

- путем увеличения подачи топлива и при включении первой передачи назад

погрузчик разгонялся до максимальной скорости, при этом ДВС переходил на максимальную частоту вращения;

- путем воздействия на педаль тормоза производилось штатное замедление погрузчика.

Методика проведения полевых испытаний погрузчика с установленной системой рекуперативного торможения предполагала следующий перечень операций:

- путем увеличения подачи топлива и при последовательном включении первой и второй передач вперед погрузчик разгонялся до максимальной скорости, при этом ДВС переходил на максимальную частоту вращения;

- путем воздействия на кнопку увеличения подачи жидкости гидродвигателем производилось нештатное замедление погрузчика;

- путем увеличения подачи топлива и при одновременном включении первой передачи назад и при включении секции гидрораспределителя, соединяющей выход гидроаккумулятора с входом гидро-

двигателя, работающего на максимальных оборотах, погрузчик разгонялся до максимальной скорости, при этом ДВС переходил на максимальную частоту вращения;

– путем воздействия на педаль тормоза производилось штатное замедление погрузчика.

В процессе проведения полевых испытаний производилась запись следующих параметров: частота вращения вала дополнительно установленного гидродви-

гателя, давление зарядки гидроаккумулятора и расход гидравлической жидкости через гидродвигатель.

Результаты проведения полевых испытаний СРТ. Исследования СРТ при подведении дополнительной мощности к трансмиссии за счет совместной работы гидроаккумулятора и гидродвигателя были тщательно проанализированы, обобщены и приведены в виде графических зависимостей на рис. 5.

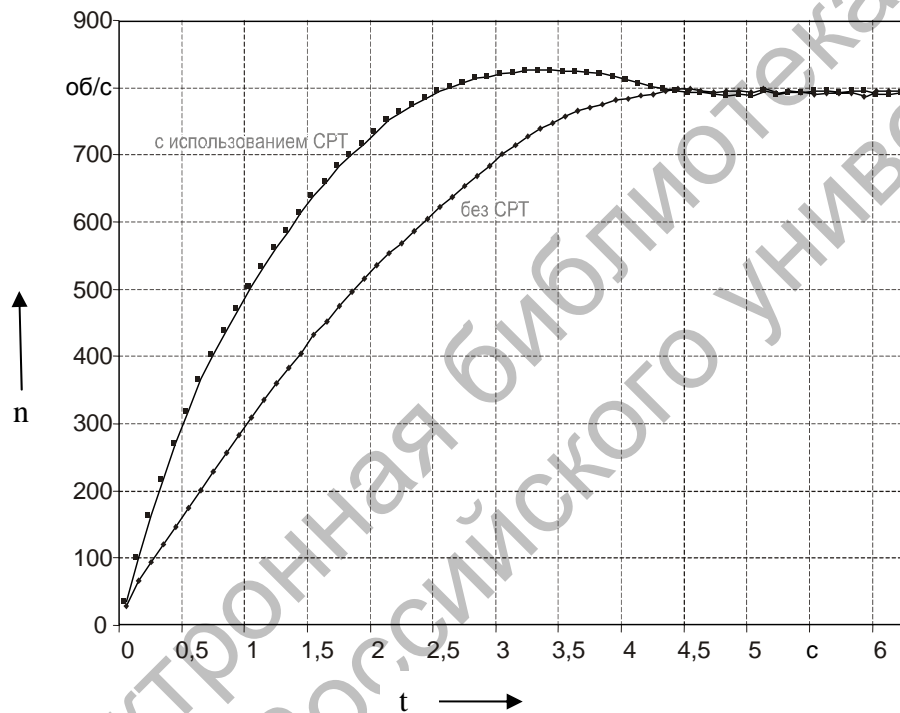


Рис. 5. График зависимости частоты вращения вала гидродвигателя от времени разгона погрузчика

Анализ графиков показывает, что погрузчик, оборудованный СРТ, способен разогнаться до максимальной скорости, соответствующей первой задней передаче, в среднем за 2,6 с, в отличие от погрузчика, не оборудованного СРТ, который достигает соответствующей скорости в среднем за 4,5 с.

Кроме того, при подведении дополнительной мощности к трансмиссии происходит кратковременное увеличение частоты вращения вала гидродвигателя до 736 с^{-1} (на машине, не оборудованной СРТ, при прочих равных условиях частота

вращения составляет 705 с^{-1}). Таким образом, время разгона на первой задней передаче до максимальной скорости с использованием СРТ сокращается в среднем в 1,73 раза, а скорость перемещения во время разрядки гидроаккумулятора возрастает в среднем на 4–6 %, что на общем цикле работы сказывается следующим образом (табл. 2).

Анализ табличных данных показывает, что применение СРТ на погрузчике ТО-18Б при дальности транспортировки 20 м и коэффициенте наполнения ковша, равном 1,1, дает возможность получить

сокращение времени рабочего цикла до 11,5 %.

В результате проведения полевых испытаний по работе СРТ установлено, что работоспособность системы, с точки зрения соответствия параметрам государ-

ственных стандартов по торможению, обеспечивается на должном уровне, о чем свидетельствуют графики, полученные на основе данных серии опытов и приведенные на рис. 6.

Табл. 2. Составляющие времени цикла с использованием СРТ и без нее

Продолжительность, с	Погрузчик без СРТ	Погрузчик с СРТ
Копание	6	6
Транспортировка	23	19
Разгрузка	3	3
Холостой ход	20	17
Цикл	52	46

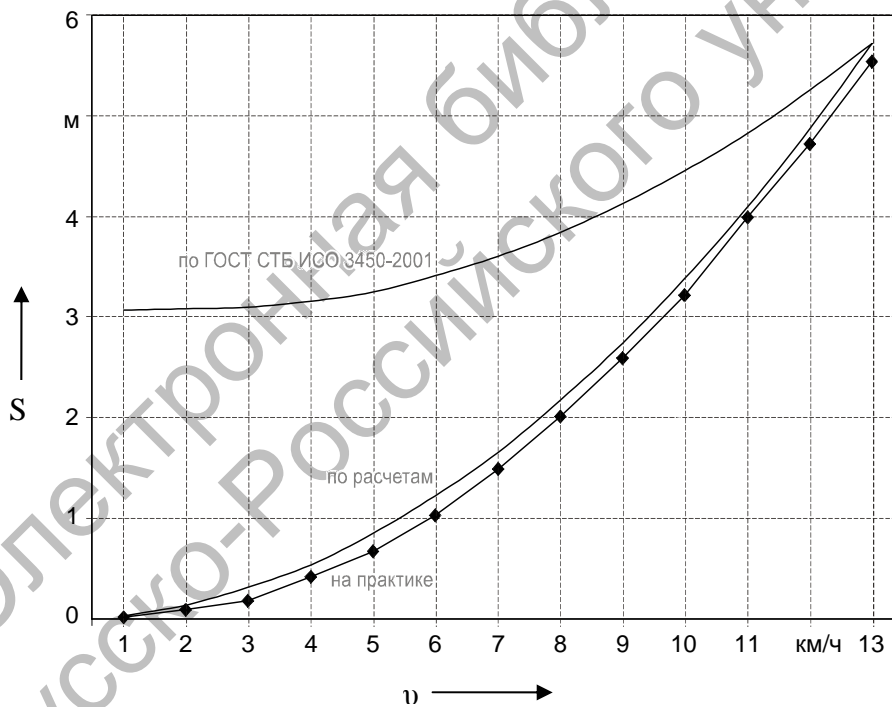


Рис. 6. График зависимости тормозного пути от скорости движения в момент начала торможения, при приложении максимального момента на гидродвигателе

Из вышеприведенных зависимостей видно, что при торможении погрузчика, движущегося со скоростью 13 км/ч, по расчетным данным путь торможения по абсолютной величине должен был не превышать значения, соответствующего ГОСТу, на практике подтвердились теоретически по-

лученные данные. Расхождение же теоретически и практически полученных данных в среднем составило 7–12 %, что обусловлено рядом технических причин и является вполне допустимым. Результаты проведения полевых испытаний показали, что разработанный образец СРТ, ха-

рактические характеристики которого соответствуют расчетным данным, полностью работоспособен. При проведении полевых испытаний СРТ на базе погрузчика ГО-18Б было установлено, что результаты, полученные экспериментальным путем, отличаются от данных, полученных аналитически, на 7–11 %, что находится в пределах допустимых значений. Таким образом, можно утверждать, что приведенные методики выбора рациональных параметров СРТ на базе разработанных математических моделей с учетом принятых при их составлении допущений являются достаточно корректными и вполне применимыми для аналитических расчетов. Поэтому проведение полевых испытаний позволило обосновать достаточную сходимость результатов разработанных методик рационального выбора элементов и их параметров СРТ с результатами, полученными на реальных образцах СРТ, что подтверждает целесообразность внедрения методик расчета при создании моделей СРТ на базе пневмоколесных одноковшовых фронтальных погрузчиков и демонстрирует высокий технико-экономический потенциал СРТ.

Выводы

1. Разработана СРТ, позволяющая осуществить преобразование штатной тормозной системы в энергосберегающую;
2. Разработана методика по выбору рациональных параметров СРТ.
3. Разработана прикладная программа, реализующая алгоритм вычисления рациональных параметров СРТ.

A. M. Schemelev, A. S. Shibeko
Experimental analysis of brake energy system
Belarusian-Russian University

The system, providing accumulation of kinetic energy of forward moving and rotating weights at braking a mobile machine by means of the hydropump (it is connected through transmission with drive wheels), injecting a working liquid in the hydraulic accumulator with subsequent use of energy of the saved up liquid at dispersal is considered.

4. Проведены полевые испытания, в ходе которых получены численные значения основных контролируемых параметров.

5. Проведен сопоставительный анализ полученных экспериментальных результатов с проведенными теоретическими исследованиями.

6. Произведена оценка адекватности теоретических исследований.

7. Подведение дополнительной мощности в трансмиссию во время разгонов повышает скорость и сокращает время разгона, что приводит к сокращению времени рабочего цикла до 11,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богдан, Н. В.** Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин / Н. В. Богдан. – Минск : Ураджай, 2002. – 460 с. : ил.
2. **Гулиа, Н. В.** Накопители энергии / Н. В. Гулиа. – М. : Наука, 1980. – 152 с. : ил.
3. **Пат. 8565 С1 ВУ, МПК E02F 9/22.** Гидропривод одноковшового фронтального погрузчика / А. С. Шибeko, А. М. Щемелев. – № 20040476 ; заявл. 22.10.2004 ; опубл. 30.06.2005 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.
4. **Пат. 1965 С1 ВУ, МПК E02F 9/22.** Гидросистема одноковшового фронтального погрузчика / А. С. Шибeko, А. М. Щемелев. – № 20040054 ; заявл. 29.01.2004 ; опубл. 30.10.2006 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь.
5. **Щемелев, А. М.** Энергосберегающая система торможения фронтального погрузчика / А. М. Щемелев, А. С. Шибeko // Строительно-дорожные машины. – 2004. – № 5. – С.10–14.
6. **Шибeko, А. С.** Система рекуперативного торможения фронтального погрузчика // Вестн. Харьковского национального автодорожного ун-та. – 2004. – № 27. – С. 86–88.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 10.01.2007