

ПОВАРЕХО А. С., канд. техн. наук, доц.,  
доцент каф. «Тракторы»  
E-mail: povarekho@bntu.by

РАХЛЕЙ А. И., канд. техн. наук, доц.,  
доцент каф. Тракторы»  
E-mail: airahley@bntu.by

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15.07.2023

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОАППАРАТОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СНИЖЕНИЕ УСИЛИЯ НА ОРГАНАХ УПРАВЛЕНИЯ

*Современные тенденции развития автотракторостроения предполагают внедрение в создаваемые объекты элементов, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики изделия. Если рассматривать элементы управления узлами, агрегатами и системами машин, то основными функциональными характеристиками являются эргономические (доступность, усилие на органах управления и др.), а также долговечность, хорошее следящее действие и стабильность работы,*

*Если рассматривать тормозную систему трактора, то, учитывая требования нормативных документов об использовании на прицепном составе только пневматического привода тормозных механизмов, целесообразным представляется применение пневматической тормозной системы и на самом тягаче, что позволит облегчить согласование торможения звеньев тракторного поезда [Тракторные поезда]. Кроме того, интерес представляет использование пневматических усилителей в различных системах и приводах.*

*В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований перспективных конструкций пневматического усилителя сцепления тракторов семейства «Беларус» и трехсекционного пневматического тормозного крана управления бортами, предназначенных для универсально-пропашных тракторов кл. 1,4–2,0. Представлены программа и методика проведения экспериментальных исследований, применяемая измерительно-регистрирующая аппаратура, схемы испытательных установок для проведения лабораторных испытаний, места установки датчиков.*

*Проведенные лабораторные исследования позволили получить статические и динамические характеристики испытываемых пневмоаппаратов, позволившие оценить их следящее действие и быстродействие. При выполнении эксперимента изучалось влияние некоторых конструктивных и эксплуатационных факторов на выходные параметры и стабильность работы исследуемых узлов. По результатам работы были предложены рекомендации по совершенствованию конструкции рассматриваемых агрегатов, а также их рациональной установке на тракторе и подключению к его пневматической системе.*

**Ключевые слова:** пневмоусилитель, следящее действие, быстродействие, тормозной кран, давление, усилие, работоспособность, синхронность срабатывания, статическая характеристика, динамическая характеристика, датчики.

### Введение

Широкое применение и совершенствование в настоящее время различного рода систем управления, автоматики, а также средств, обеспечивающих улучшение условий труда оператора транспортных средств за счет сни-

жения усилия на органах управления, улучшения отклика управляемых объектов, повышение эффективности тормозных систем, систем активного привода технологического оборудования тракторов и других механизмов, приводит к необходимости применения на тракторах все

более совершенных пневматических и гидравлических систем, обладающих высоким КПД, точностью регулирования давления в исполнительных механизмах, хорошим следящим действием и безотказностью в работе [1; 2].

Применение пневматических систем в качестве систем управления и их составных элементов на транспортных средствах обусловлено большим количеством преимуществ данного типа привода. На колесных тракторах «Беларус» также имеет место применение пневматического привода, в частности, для привода тормозной системы прицепного состава, с/х машин и орудий, а также выполнения некоторых технологических операций. С точки зрения расширения функционального использования пневмопривода на тракторах целесообразно использовать пневмоагрегаты и для решения других задач [3; 4].

Объектами исследования в представляемой статье являются: пневмоусилитель управления сцеплением (далее ПУ) универсально-пропашных тракторов кл. 1,4–2,0, отличительная особенность которого – наличие подвижного седла клапана, выполняющего роль следящего элемента, и тормозной кран управления бортами (далее ТК) тракторов кл. 1,4–2,0, имеющий две секции прямого действия для управления тормозной системой тягача и секцию обратного действия управления тормозной системой прицепа [5].

Целью проведения исследований ПУ и ТК являлось [2; 7]:

- оценка выходных параметров объектов и их соответствие техническим условиям;
- определение качества следящего действия испытываемых узлов;
- оценка их быстродействия;
- определение влияния на выходке характеристики ПУ темпа нажатия на педаль сцепления и усилия отжимных пружин сцепления;
- определение характеристик узлов при повторно-кратковременных воздействиях на органы управления;
- определение работоспособности узлов при снижении давления в системе.

### **Экспериментальное исследование пневмоаппаратов**

В процессе проведения лабораторных испытаний ПУ сцепления регистрировались следующие параметры:

- 1) давление в управляющей полости ПУ;
- 2) давление на входе в ПУ;
- 3) ход управляющего штока;
- 4) ход силового штока;
- 5) усилие на управляющем штоке;

6) усилие на силовом штоке.

При исследовании ТК управления бортами регистрировались:

- 1) давление на входах секций;
- 2) давление на выходах секций;
- 3) усилие на тормозных педалях;
- 4) ход (угол поворота) тормозных педалей.

Регистрация измеряемых параметров осуществлялась визуально по показаниям соответствующих измерительных приборов, а также путем фиксации электрических сигналов с установленных датчиков на записывающее устройство [6].

Для регистрации давлений в полостях испытываемых узлов использовались потенциометрические датчики давления П-10 и манометры с пределами измерений 0–1,6 МПа.

Перемещения штоков ПУ и педалей ТК регистрировались датчиками угловых перемещений Ш-615А.

Для замера усилий на штоках ПУ использовались динамометры растяжения, а для определения усилия на тормозных педалях – динамометр сжатия.

Перед проведением испытаний все датчики были трехкратно протарированы и построены их тарировочные характеристики [6].

### **Методика проведения испытаний**

При проведении экспериментальных исследований ПУ и ТК с установленными на них датчиками монтировались на стенд «Пневмотест» (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид стенда «Пневмотест»

Схема установки и подключения к пневмосистеме ПУ представлена на рисунке 2.

Лабораторная установка включает ПУ 1, в управляющей 2 и силовой 3 полостях которого установлены датчики 4 и 5 давления. На стенке стенда установлены датчики 6 и 7 угловых перемещений, связанные через рычажную систему соответственно с силовым 8 и управ-

ляющим 9 штоками. С управляющим штоком 9 соединен динамометр 10 растяжения, позволяющий определять усилие, затрачиваемое на привод ПУ сцепления. Усилие отжимных пружин сцепления имитируется пневматиче-

ским цилиндром 11, рабочая полость 12 которого соединена через регулируемый редукционный клапан 13 с ресивером.

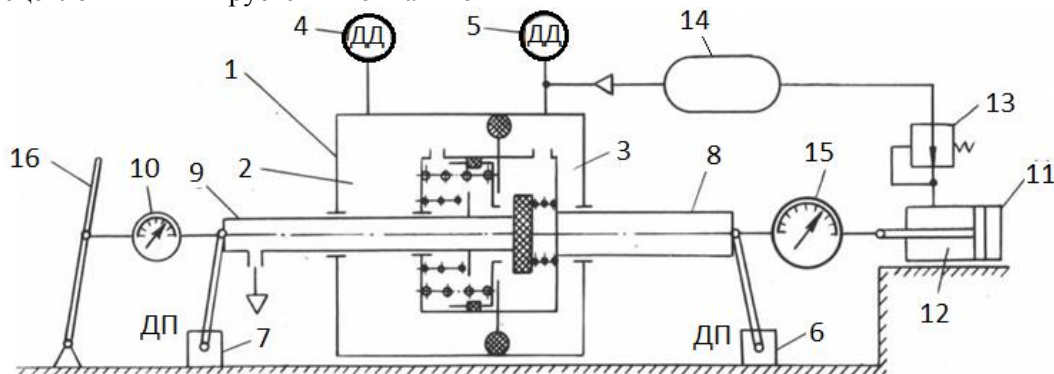


Рисунок 2 – Испытательная установка для лабораторных исследований ПУ

Шток пневмоцилиндра через динамометр 15 растяжения связан с силовым штоком 8. Силовая полость 3 ПУ связана с ресивером 14. Редукционный клапан 13 позволяет регулировать давление в полости 12 пневмоцилиндра 11 и тем самым варьировать значениями силы сопротивления на силовом штоке ПУ.

Управляющий шток 9 через динамометр 10 связан с рычагом 16, посредством которого при проведении испытаний осуществляется управление ПУ.

Схема установки датчиков при испытаниях ТК представлена на рисунке 3. На выходах секций 1 и 2 управления бортами, которые связаны с тормозными камерами 9 и 10, установлены датчики 4 и 5 давления. Выход секции 3 обратного действия соединен с воздухо-распределителем 11 прицепа и в нем установлен датчик 6 давления. Перемещение педалей 7 и 8 управления ТК регистрируется датчиком 12 перемещения, установленным на плите крана и связанным посредством рычага с педалями. С целью контроля давления в системе на выходе из ресивера установлен датчик 13 давления.

Перед проведением испытаний ТК был отрегулирован на одновременное начало подачи сжатого воздуха бортовыми секциями.

Оценка выходных параметров испытываемых узлов (усилий на органах управления, их ходов) осуществлялась визуально по показаниям измерительных приборов и медленному перемещению органов управления [8].

Для определения качества следящего действия были сняты статические характеристики узлов. При этом производилось ступенчатое перемещение управляющего элемента с выдержкой по времени на каждой ступени и за-

пись на регистрирующее устройство ходов управляющего и силового штоков, а также величины давления в управляющей полости ПУ и перемещения тормозных педалей и давлений на выходах секций тормозного крана.

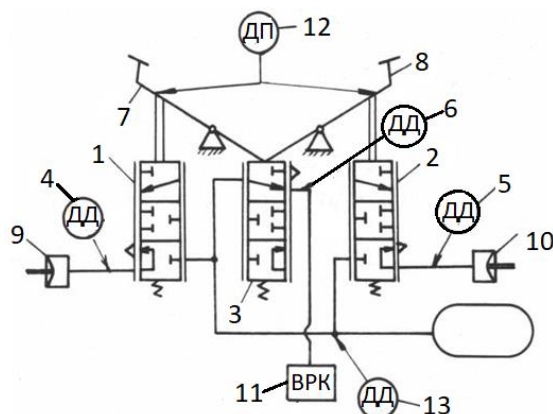


Рисунок 3 – Схема установки датчиков при испытаниях ТК управления бортами

Для оценки быстродействия узлов осуществлялась регистрация параметров при перемещении управляющего штока ПУ за 0,15–0,3 с и педалей ТК за 0,1–0,15 с. Усилие на силовом штоке при этом регулировалось с помощью редуктора давления и было равно 250 Н, 500 Н, 1 кН, 2 кН [8].

Характеристики ПУ и ТК управления бортами при повторно-кратковременных воздействиях определялась следующим образом. Включалось регистрирующее устройство и осуществлялось циклическое перемещение управляющего штока (тормозных педалей) с выдержкой по времени в выдвинутом и исходном положениях. Число циклов было выбрано равным 5, после чего регистрирующий прибор выключался.

Обработка результатов испытаний осуществлялась методом ординат согласно тарировочным характеристикам применявшихся датчиков с применением методов корреляционно-регрессионного анализа [9].

### Результаты испытаний

В результате экспериментальных исследований получены следующие выходные характеристики ПУ:

1. Полный ход управляющего штока – 32 мм.
2. Полный ход силового штока – 30 мм.
3. Усилие, затрачиваемое на перемещение управляющего штока – 128 Н.
4. Усилие, развиваемое силовым штоком при давлении в пневмосистеме 0,7 МПа – 3,2 кН.

Кроме того, отмечено плавное без заеданий перемещение управляющего и силового штоков и высокая герметичность подвижных соединений ПУ, которая проверялась согласно ГОСТ 4364-81 [10].

Качество следящего действия оценивалось по статическим характеристикам, которые приведены на рисунке 4.

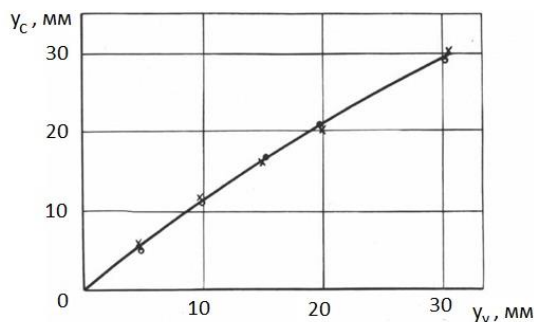


Рисунок 4 – Статическая характеристика ПУ

Как видно из графиков, ПУ обладает хорошим следящим действием во всем диапазоне перемещения управляющего штока, так как имеет место лишь незначительная нелинейность статической характеристики. Зависимости, представленные на рисунке 5, позволяют определить падение давления в управляющей полости пневмоусилителя и характер его изменения при различных значениях начального усилия па силовом штоке. Это дает возможность оценить расход сжатого воздуха при работе ПУ.

Как показывает анализ динамических характеристик (рисунок 6), объект испытаний обладает высоким быстродействием, т. е. практически отсутствует запаздывание в перемещении силового и управляющего штоков. Следует отметить, что имеют место высокоча-

стотные колебания давления в управляющей полости при резком отпускании управляющего штока, что имеет место при «броске» педали сцепления.

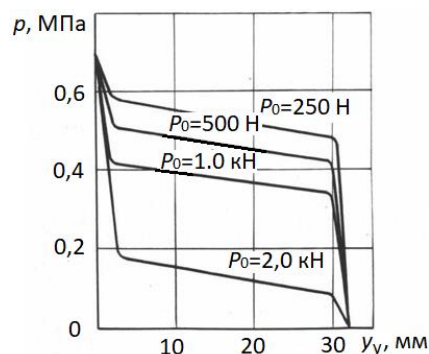


Рисунок 5 – Изменение давления в управляющей полости ПУ по ходу штока управления

Это связано с колебаниями клапана ПУ и определяется жесткостными характеристиками пружины подвижного седла. Однако амплитуда колебаний давления мала и практически не оказывает влияния на перемещение силового штока, но все же происходит увеличение расхода сжатого воздуха за счет перепуска воздуха на управляющей полости в атмосферу. При увеличении времени выдвигания штока ПУ (рисунок 7), т. е. при режиме работы, соответствующем плавному включению сцепления, возникновения колебаний давления в управляющей полости отмечено не было.

Динамические характеристики, приведенные на рисунке 7, позволяют представить цикл работы ПУ, состоящий из нескольких этапов. Вначале (этап I) осуществляется незначительное перемещение управляющего штока на 2–3 мм, а силовой шток остается неподвижным, что соответствует перемещению клапана (выбор зазора) и его прижатию к подвижному седлу. При этом осуществляется падение давления в управляющей полости до величины, определяемой усилием предварительного сжатия пружин сцепления.

Затем осуществляется совместное перемещение управляющего и силового штоков (этап II), что соответствует процессу выключения сцепления. Падение давления в управляющей полости на этом этапе определяется жесткостью отжимных пружин муфты сцепления. После фазы выдержки (этап III) осуществляется этап IV, соответствующий включению сцепления. При этом осуществляется некоторое нарастание давления в управляющей полости при незначительном перемещении управляющего штока и неподвижном силовом штоке, что определяется гистерезисом ПУ вследствие трения его поршня о корпус.



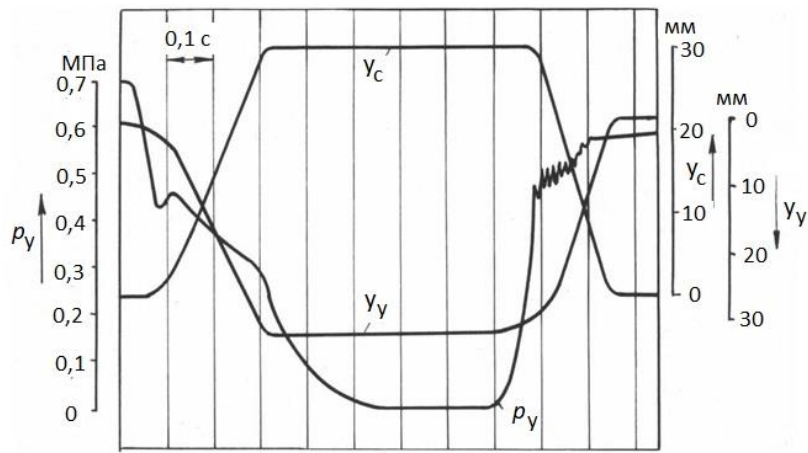


Рисунок 6 – Динамические характеристики ПУ при темпе воздействия на управляющий шток 0,3 с

Затем осуществляется совместное движение управляющего и силового штоков. После перемещения штоков ПУ в исходное положение происходит выравнивание давлений в его управляющей и силовой полостях (этап V).

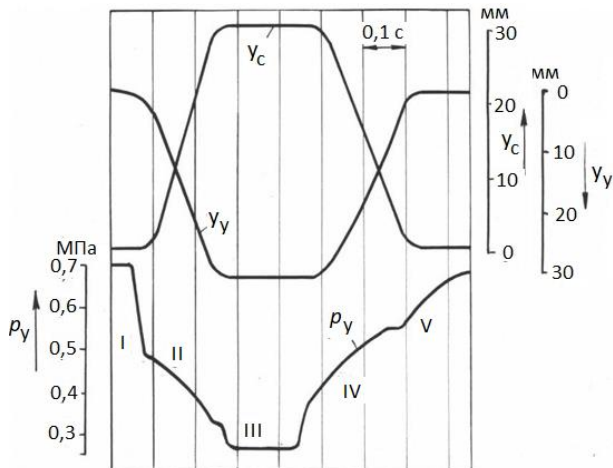


Рисунок 7 – Динамические характеристики ПУ при темпе воздействия на шток управления  $t_n = 2,5$  с

Характеристики ПУ, полученные при повторно-кратковременных воздействиях на управляющий шток (рисунок 8), позволяют выявить быстродействие ПУ, а также стабильность его работы. Как видно из приведенных зависимостей, ПУ имеет высокую стабильность работы, силовой шток перемещается плавно, без рывков и заеданий. Однако после фазы выдержки заметно ступенчатое перемещение управляющего штока, что связано с запаздыванием нарастания давления в управляющей полости. Для устранения это явления целесообразно увеличение пропускной способности соединительных полостей между силовой и управляющей полостью.

В процессе испытаний было установлено, что в случае несоосного расположения силового штока и штока пневматического цилиндра лабораторной установки возникают повышенные силы сопротивления перемещению

силового штока за счет его перекоса и перекоса поршня ПУ. При длительной эксплуатации в подобных условиях могут появиться задиры на силовом штоке и нарушиться работоспособность узла. Для исключения этого целесообразно крепление ПУ выполнить таким образом, чтобы оно позволяло силовому штоку самоустанавливаться и обеспечивало совпадение направлений его перемещения и перемещения передаточного механизма сцепления. Это позволит избежать перекосов силового штока и повысить тем самым долговечность работы узла.

Кроме лабораторных исследований совместно со специалистами ОАО «МТЗ» были проведены экспериментальные исследования ПУ сцепления при установке непосредственно на трактор «Беларус» кл. 2 и привод его осуществлялся от гидравлического цилиндра, связанного с педалью управления сцеплением. После установки ПУ производилась заправка гидросистемы тормозной жидкостью и ее прокачка. При проведении экспериментальных исследований осуществлялась регистрация следующих параметров: давления жидкости в управляющей полости ПУ, давления воздуха в силовой полости, ход педали сцепления и ход силового штока ПУ. Испытания проводились при работающем двигателе и давлении воздуха в ресивере в пределах, обеспечиваемых регулятором давления пневматической системы трактора. При испытаниях оценивалось следящее действие ПУ, а также его характеристики при нажатии и отпуске педали сцепления с высоким темпом и в режиме повторно-кратковременных включений сцепления.

В результате исследований установлено, что ПУ обладает хорошим следящим действием при выключении сцепления. Однако при обратном ходе педали сцепления перемещение силового штока осуществляется рывками. Кроме того, в режиме повторно-

кратковременных включений наблюдалось «зависание» педали в промежуточном положении. Анализ результатов испытаний позволил выявить, что причинами вышеуказанных недостатков ПУ являются недостаточный диа-

метр трубопровода, соединявшего гидроцилиндр с управляющей полостью ПУ, а также достаточно большая инерционность поршневого элемента.

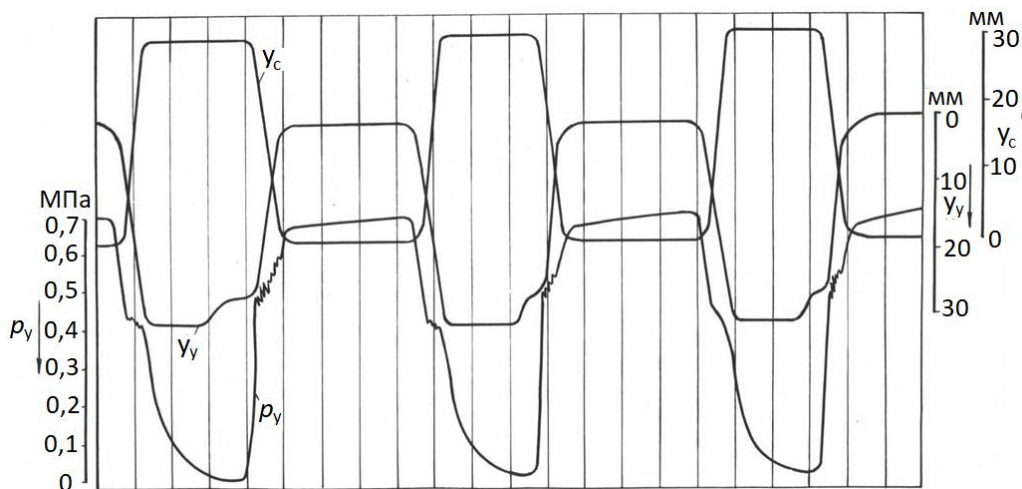


Рисунок 8 – Динамические характеристики ПУ при повторно-кратковременном воздействии на управляющий шток

При проведении лабораторных испытаний пневматического ТК были получены статические и динамические характеристики его секций, а также значения приводного усилия. Усилие на сдвоенных тормозных педалях находится в пределах, допускаемых ГОСТ 12.2.019-2015 [11].

Как видно из рисунка 9, секции ТК обладают удовлетворительным следящим действием, а также обеспечивают опережающее срабатывание по ходу педали секции прицепа [12]. Однако имеет место неравномерное по ходу педали срабатывание секций управления бортами тягача, а именно, в диапазоне хода педали от  $0^\circ$  до  $17^\circ$  происходит опережающее нарастание давления на выходе левой секции, а при дальнейшем перемещении педалей рост давления в левой секции отстает от роста давления в секции управления правым бортом тягача. Регулировка ТК на одновременное начало нарастания давления по бортам привела к существенному рассогласованию величины давления в конечном диапазоне хода педалей. Таким образом, с целью исключения разницы давлений на выходах бортовых секций целесообразно устанавливать уравнивательные клапаны. Это несколько усложняет конструкцию крана, однако повышает безопасность движения при торможении.

Как показывает анализ динамических характеристик (рисунок 10), секции тормозного крана обладают высоким быстродействием. Время срабатывания секций тягача при торможении составляет 0,4 с, а секции прицепа – 0,35 с.

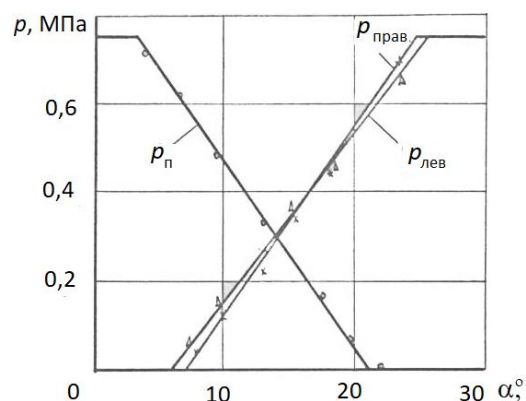


Рисунок 9 – Статические характеристики тормозного крана управления бортами

Оттормаживание секций тягача осуществляется за 0,38 с, а секции прицепа – за 0,55 с. При проведении испытаний установлено, что время срабатывания секций тягача существенным образом зависит от объема подсоединенных к ним тормозных камер и проходного сечения, подводящего воздух ко входу секций трубопровода. В частности, при подсоединении к крану тормозных камер объемом  $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  и внутреннем диаметре подводящего трубопровода 0,008 м, время срабатывания бортовых секций составляло 1,0 с. Таким образом, с точки зрения увеличения быстродействия тормозного крана и повышения безопасности движения целесообразно обеспечить подключение каждой секции к ресиверу с помощью отдельного трубопровода.

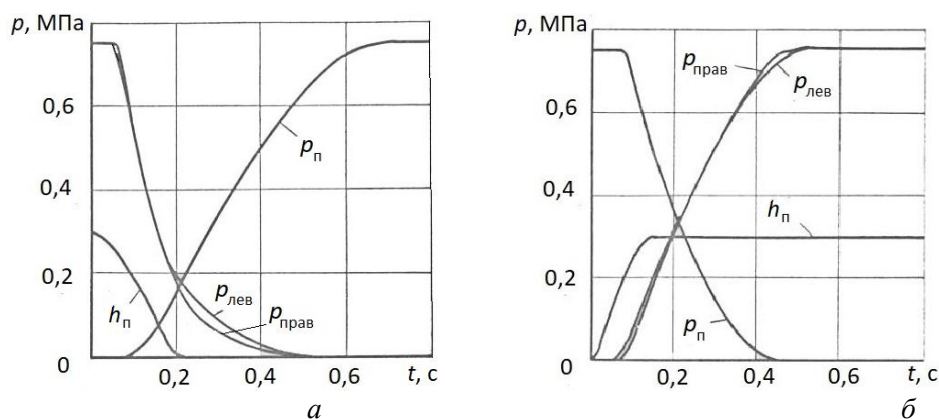


Рисунок 10 – Динамические характеристики тормозного крана управления бортами (а – оттормаживание, б – торможение)

### Заключение

В результате проведения испытаний было отмечено, что как ПУ, так и ТК обладают хорошим следящим действием во всем диапазоне перемещения управляющего элемента, а также высоким быстродействием.

Обнаруженные высокочастотные колебания давления в управляющей полости ПУ при «броске» педали сцепления требуют корректного выбора жесткостных характеристик пружины подвижного седла клапана ПУ.

Для устранения ступенчатого перемещения силового штока и исключения «зависания» педали сцепления в промежуточном положении при обратном ходе целесообразно увеличить пропускную способность связей между силовой и управляющей полостью и уменьшить инерционность поршневого элемента.

Для исключения перекоса штока и цилиндра ПУ, что приводит к увеличению сил сопротивления и возникновению задиров на подвижных частях, предлагается, чтобы крепление ПУ позволяло силовому штоку самоустанавливаться.

Для исключения неравномерного по ходу педали срабатывания секций ТК управления бортами тягача предлагается установка на выходах бортовых секций уравнивающих клапанов. Это несколько усложнит конструкцию ТК, однако повысит безопасность движения при торможении. Для повышения быстродействия ТК, соответственно, безопасности движения, целесообразно обеспечить подключение каждой секции к ресиверу с помощью отдельного трубопровода.

### Литература

1. Логвинов, В. П. Разработка и исследование пневмогидравлического усилителя привода управления сцеплением большегрузного автомобиля : диссертация ... кандидата технических наук : 05.00.00. – Харьков, 2001. – 221 с.

2. Рахлей, А. И. Следящий электропневматический тормозной привод модульного типа тракторного поезда : диссертация ... кандидата технических наук : 05.05.03. – Минск, 1993. – 180 с.

3. Энциклопедия по машиностроению XXL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mash-xxl.info/info/344252/#>. – Дата доступа: 01.09.2023.

4. Богдан, Н. В. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин / Н. В. Богдан // Мн. : Ураджай, 2002. – 426 с.

5. БЕЛАРУС 1221.2/1221В.2 1221.3. Руководство по эксплуатации. – Мн. : ПО «МТЗ», 2009.

6. Шушкевич, В. А. Основы тензометрии / В. А. Шушкевич // Мн. : Вышэйш. школа, 1975. – 352 с.

7. Метлюк, Н. Ф. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей / Н. Ф. Метлюк, В. П. Автушко // М.: Машиностроение, 1980. – 231 с.

8. Тракторы. Виды и программы испытаний: ГОСТ 25836-83. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003.

9. Гребенникова, И. В. Методы математической обработки экспериментальных данных : учебно-методическое пособие / И. В. Гребенникова // Изд-во Урал. ун-та, Екатеринбург. – 2015. – 124 с.

10. Приводы пневматические тормозных систем автотранспортных средств. Технические требования: ГОСТ 4364-81. – М : Стандартинформ, 2006.

11. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности: ГОСТ 12.2.019-2015. – М : Стандартинформ, 2015.

12. Тракторные поезда / П. П. Артемьев [и др.]; под ред. В. В. Гуськова. – М: Машиностроение, 1982. – 181 с.