

Лабораторная установка вспомогательной системы для разгона автомобиля на основе пневмогидравлической рекуперации энергии торможения



С. В. Данилов,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Технологические
машины и переработка
материалов»
Северо-Кавказской
государственной академии
(СКГА),



Р. Ш. Шайлиев,
канд. техн. наук, доцент
кафедры «Технологические
машины и переработка
материалов» СКГА,



Р. Ш. Мамаев,
генеральный директор
ООО «АвтоРэт»

Становится очевидным, что многие вопросы так называемой зеленой повестки требуют более серьезной проработки и корректировки. В этой связи совершенствование автомобилей с двигателями внутреннего сгорания является по-прежнему актуальной экологической, экономической и социальной задачей.

При разгоне автотранспортного средства с места в выхлопных газах содержится максимум вредных веществ, а двигатель и весь кузов подвержены наибольшей вибрации, сопровождающейся шумом. Проблему можно решить, придав автомобилю дополнительную тягу для ускорения, используя систему рекуперации энергии торможения (РЭТ), тем самым уменьшив нагрузку на двигатель и сцепление [1]. Это приведет к сокращению расхода топлива, выбросов газов и шума [2, 3].

В работах [4–6] рассматривается теоретическая возможность применения пневмогидравлического баллона для аккумуляции кинетической энергии автомобиля при торможении и использование ее для разгона. Проведены теоретические расчеты: зависимости крутящего момента на валу гидромотор-насоса (ГМН) от падения давления в баллоне, числа оборотов вала, динамических процессов при использовании механической бесступенчатой передачи, экономии топлива.

Авторами ранее проведен анализ конструктивных и технологических недостатков существующих устройств и схем для вспомогательной системы ускорения автомобиля [7, 8], а также приведены результаты теоретических исследований по обоснованию эффективности конструктивной схемы, выбора и взаимного расположения узлов и агрегатов предлагаемой системы рекуперации энергии торможения автомобиля в работе [2].

В связи с этим для подтверждения теоретических умозаключений и расчетов назрела необходимость создания лабораторной установки вспомогательной системы для разгона автомобиля на основе пневмогидравлической рекуперации энергии торможения.

Для удовлетворения потенциальных потребителей по результатам опроса трех автотранспортных предприятий (ЗАО «Апсны», МУП «ЧППАП № 1», Черкесское городское МУП «Специализированное автохозяйство по уборке города») получены рекомендации желаемых технических характеристик и конструктивных особенностей системы РЭТ [9]:

- применять пневмогидравлический аккумулятор (ПА) 25–100 л.;
- иметь дополнительную тяговую мощность 10–20 кВт;
- вместо двух 2-позиционных механических распределителей использовать один 3-позиционный электромагнитный (ЭМР);
- для управления расположить пульт на приборной панели в кабине автомобиля, а в перспективе соединить с педалями акселератора и тормоза;
- устанавливать устройство только на высокопольные автобусы типа ПА3;
- применить ряд дизайнерских неконструкторских решений.

По стоимости системы РЭТ инженерно-технические работники рекомендовали не выходить за пределы 100 тыс. руб. В результате пересмотра начальной схемы вспомогательной системы для разгона автомобиля предлагается

Научно-исследовательская работа проводилась при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере программы Студенческий стартап.

Авторы выражают благодарность студентам СКГА Д. А. Биджиеву, Д. В. Рыбаку, Б.-А. Р. Шайлиеву за технические работы при изготовлении лабораторного образца.

Таблица 1. Узлы и агрегаты вспомогательной системы для разгона автомобиля

Наименование	Технические характеристики	Примечание
Гидравлический мотор-насос	При работе как насос: • рабочий объем — 10 см³; • давление на выходе ном./max — 16/21 МПа; • подача — 21 л/мин; • номинальная частота вращения — 40 об/с При работе как мотор: • давление на входе ном./max — 10/21 МПа; • частота вращения ном./max/min — 20/50/4 об/с; • мощность — 5,5 кВт/7,5 л. с.; • крутящий момент ном./max — 30/70 Нм	Переделанный (модернизированный) шестеренчатый насос НШ 10 правосторонний: • сделана линия дренажа для отвода рабочей жидкости, чтобы сальники не протекали; • высверлено отверстие 3 мм под штуцер со сливом в бак для масла; • фигурные пластины расположены с обеих сторон всасывания и нагнетания
Пневмогидравлический аккумулятор	Резиновый мешок заполнен сжатым азотом, максимальное давление — 20 МПа; объем max/эффективный — 15/12 л	Эффективный объем — объем максимально уместящейся рабочей жидкости
Электрический датчик давления масла	Срабатывание — 20 МПа; рабочее напряжение — 12 В	
Электромагнитный распределитель BE 6.574A OF 12B	Гидравлический 4-линейный 3-позиционный; рабочее напряжение — 12В	
Рукава высокого давления VS-1SN10-STD	Проход — 10 мм; температура — 40...+100 °С; ном./max давление — 18/25 МПа	Производство — Италия; внутренний и внешний слой — синтетическая резина, стойкая к агрессивным средам
Шкив	6-ручейковый; диаметр — 115 мм	Сталь 45
Гидробак	Объем — 20 л	Имеются два отверстия для всасывания и слива рабочей жидкости, спускной кран для стравливания воздуха, обратный клапан
Электродвигатель с встроенным электромагнитным тормозом AIR 90L6E	Мощность — 2,2 кВт; частота вращения вала — 1500 об/мин; сила тока статора — 5,3 А; КПД — 78%; коэффициент мощности — 0,82; тормозной момент — ном./max 15/17; масса — 37 кг	Используется вместо двигателя внутреннего сгорания (ДВС) для передачи вращательного движения карданному валу
Электромуфта	Рабочее напряжение — 12 В; шесть ручьев; диаметр шкива — 115 мм; диаметр прижимной пластины — 98 мм; длина шлицов — 15 мм; посадочное место электромагнита — 45 мм	Электромуфта имеет шлицевое соединение с валом гидромотор-насоса

усовершенствованная конструктивная схема (рис. 1).

Принцип работы вспомогательной системы для разгона автомобиля

При торможении автомобиля водитель нажимает на пульте управления кнопку «Стоп» и гидравлический электромагнитный распределитель переводится в положение «заправка ПГА». При нагнетании в него до 20 МПа срабатывает датчик давления и гидравлический ЭМР переводится в нейтральную позицию, отключается электромуфта. Далее затухающее инерционное вращение вала мотор-насоса создает избыточное давление масла в гидропроводе, которое сливается в бак для масла. Водитель может принудительно перевести гидравлический электромагнитный распределитель в нейтральную позицию, нажав на пульте управления кнопку «Нейтраль».

При трогании автомобиля с места водитель нажимает на пульте управления кнопку «Старт», и гидравлический электромагнитный распределитель переходит в позицию подачи масла в ги-

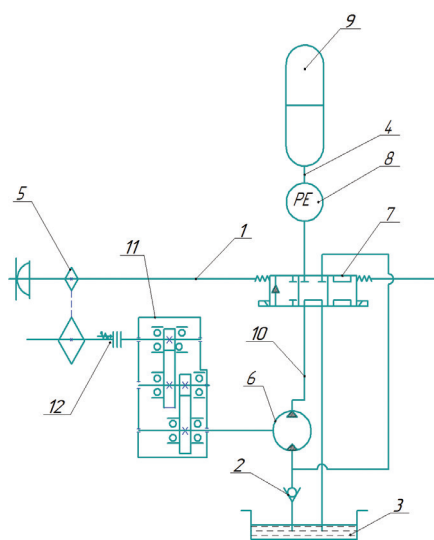


Рис. 1. Усовершенствованная конструктивная схема вспомогательной системы для разгона автомобиля 1 — карданный вал; 2 — обратный клапан; 3 — бак для масла (гидробак); 4 — гидропровод нагнетания в пневмогидравлический аккумулятор; 5 — цепная передача; 6 — гидромотор-насос; 7 — электромагнитный распределитель; 8 — датчик давления масла электрический; 9 — пневмогидравлический аккумулятор; 10 — гидропровод подачи масла в распределитель; 11 — понижающий редуктор; 12 — электромуфта

дравлический мотор-насос, подключается электромуфта. Автомобиль начинает разгон.

После ускорения водитель нажимает кнопку «Нейтраль» и принудительно переводит ЭМР в нейтральную позицию. При этом отключается электромуфта, ГМН не работает. В табл. 1 приведены узлы и агрегаты рассматриваемой системы.

Привод ГМН осуществляется ременной передачей с карданного вала лабораторной установки через 6-ручейковый шкив диаметром 115 мм. Причем шкив привода подключен к отключаемой электромуфте для исключения холостой работы ГМН и ее отключения при нагнетании давления рабочей жидкости в ПГА 20 МПа для предотвращения разрывов рукавов высокого давления и протечек в местах соединений.

Шкив на карданном валу закреплен на фланцевом соединении с редуктором заднего моста через проставку с центрированием по пазу фланца. Обороты вращения ГМН и карданного вала одинаковые.

Численные расчеты технических характеристик вспомогательной системы для разгона автомобиля

По проведенным расчетам при работе ГМН в режиме насоса за минуту можно закачать в ПГА 21 л рабочей жидкости (масла). Длина рукавов высокого давления, м: ПГА — ЭМР 0,6; гидробак — ГМН 3; ЭМР — гидробак 2,5; ГМН — ЭМР 0,9; ЭМР — ГМН 1,5.

Проведены численные расчеты скорости заполнения активного объема 12 л масла в ПГА. Объем рабочей камеры ГМН — 10 см³, диаметр входного и выходного отверстий ГМН — 6 мм, номинальная частота вращения — 40 об/с, внутренний диаметр рукава высокого давления — 10 мм, длина соединения от ГМН через ЭМР до ПГА для заправки — 0,9 + 0,6 = 1,5 м.

Воспользуемся формулой для определения объема исходящей рабочей жидкости в секунду из ГМН:

Vс = VГМН / Vпат,

где VГМН — расход рабочей жидкости в ГМН, л/с; Vпат — расход рабочей жидкости через выходной патрубок ГМН, л/с.

Сечение патрубка Sпат = πr² = 3,14·32 = 28,26 мм². Учитывая объем и частоту вращения ГМН, получим объем масла, проходящего в секунду через патрубок Vпат = 28,26·40 = 1,1304 см³/с. Нагнетаемый объем масла в камере ГМН VГМН = 10·40 = 400 см³/с — перекачивание рабочей жидкости в секунду:

Vс = VГМН / Vпат = 400/1,1304 = 353,8 см³/с.

Используемый объем ПГА под масло 12 л. Имеем t = 12/0,3538 = 34 с. Пневмогидравлический аккумулятор теоретически будет заполнен маслом до давления 20 МПа за 34 с. Но это теоретический расчет, поскольку при торможении частота вращения карданного вала будет постепенно уменьшаться, то будет затухать и частота вращения вала ГМН. Точные экспериментальные данные по времени зарядки ПГА приведем по результатам испытаний изготовленного лабораторного образца.

Для определения динамических характеристик гидравлического мотор-насоса, работающего как мотор при разгоне автомобиля, воспользуемся следующими формулами (табл. 2):

Расчет крутящего момента M на валу ГМН, Нм:

M = 1,59VГМН Ph,

где P — давление, бар; VГМН — рабочий объем, см³; h — объемный КПД ГМН, принимаем 0,8.



Рис. 2. Лабораторная установка вспомогательной системы для разгона автомобиля

Расчет числа оборотов n на валу ГМН, об/мин:

n = Q·1000h/VГМН,

где Q — подача рабочей жидкости из ПГА, л/мин; VГМН — рабочий объем, см³.

Расчет выдаваемой ГМН мощности N, Вт:

NГМН = M·2πn.

Как видно из расчетов, с опорожнением ПГА частота вращения вала ГМН, соответственно и карданного вала, понижается. Это означает, что нужно отключать насос до полного опорожнения, иначе он будет создавать дополнительное сопротивление вращению карданного вала, уже набравшего высокие обороты при разгоне.

Аналогично прослеживается падение мощности ГМН, силы крутящего момента и частоты оборотов его вала при понижении давления в ПГА.

Создание лабораторного образца установки вспомогательной системы для разгона автомобиля

Лабораторная установка вспомогательной системы для разгона автомобиля на принципах РЭТ смонтирована на раме

бортового автомобиля УАЗ 3303 в натуральном масштабе (рис. 2).

Электродвигатель на станине, имитирующий работу ДВС, соединен болтами со стальной плитой 300×200×5 мм, которая приварена к прямоугольным металлическим профилям 40×25×2,5 мм, образующим опору электродвигателя. Два металлических профиля по краям приварены к верхней части рамы. Для придания жесткости конструкции стальная плита с заднего торца закреплена швеллером к поперечной стойке рамы.

Гидромотор-насос в сборе с 6-ручейковым шкивом и электромуфтой закреплен болтами с уголком, приваренным к опорной конструкции в виде рамы из параллельно приваренных между собой уголков 250×40×40 мм толщиной 5 мм. На заднем мосту слева приварен П-образный швеллер 200×80×80 мм толщиной 5 мм, имеющий четыре параллельных продольных отверстия в виде пазов для перемещения вдоль заднего моста опорной конструкции передачи силы крутящего момента (рис. 3).

Принцип салазок использован для натяжения 6-ручейкового ремня между шкивами ГМН и карданного вала. После его натяжения опорная рама гидромотор-

Таблица 2. Динамические характеристики ГМН, работающего как мотор

Давление в ПГА P, бар	Подача рабочей жидкости из ПГА Q, л/мин	Крутящий момент на валу ГМН M, Нм	Число оборотов вала ГМН n, об/мин	Выдаваемая ГМН мощность N, кВт/л.с.
200	20	39,75	1600	6,657/9
150	15	29,81	1200	3,744/5,1
100	10	19,88	800	1,665/2,3
50	5	9,94	400	0,416/0,57



Рис. 3. Устройство передачи силы крутящего момента «гидромотор — насос — карданный вал»



Рис. 4. Электромагнитный распределитель с переключателем

насоса затягивается четырьмя болтами с швеллером на заднем мосту. Данное устройство передачи силы крутящего момента выставлено по двум плоскостям параллельной соосности шкивов, чтобы ремень не слетал, а в третьей плоскости натяжение происходит перемещением устройства передачи силы крутящего момента перпендикулярно осям карданного вала и гидравлического мотор-насоса. Шкив на карданном вале закреплен четырьмя болтами между фланцем карданного вала и хвостовиком с центрированием шкива по внутреннему круглому пазу фланца.

Для автоматизации циклов «торможение — остановка — разгон» на задней части рамы закреплен электромагнитный 4-линейный 3-позиционный распре-

делитель ВЕ6.574АОФ 12В с монтажной плитой и пультом управления — 3-позиционным переключателем, устанавливаемым в кабине автомобиля (рис. 4). Потребляемое напряжение ЭМР — 12 В. Переключатель принудительно переводит его в одну из трех позиций: торможение, нейтраль, разгон за 0,05 с.

Пневмогидравлический аккумулятор и гидробак закреплены на задних поперечинах рамы стальными хомутами (рис. 4). Узлы соединены рукавами высокого давления VS-1SN10-STD разной длины.

После изготовления лабораторного образца установки проведена проверка работоспособности всех узлов. Испытания по зарядке ПГА в режиме торможения и использования аккумулированной

энергии рабочей жидкости в режиме разгона проводили на открытой площадке в целях безопасности.

При натурных испытаниях получены следующие технические характеристики: скорость зарядки (закачивания масла) ПГА — 36–40 с; число оборотов колес до полного опорожнения ПГА — 110–120 об. (колеса стандартные, с шинами 225/75 R16, длина окружности шины — 2,337 м, «пройденный путь» — 257–280 м).

Проведем численный расчет тяговой силы на карданный вал для разгона колеса автомобиля УАЗ 3303 с ускорением 1 м/с^2 . За исходные данные примем:

- масса автомобиля — 1600 кг, масса на одно колесо $m_k = 400 \text{ кг}$;
- момент инерции колеса $J_k = 1,373 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- статический радиус колеса — 225/75 R16, радиус качения $r_d = r_k = 0,372 \text{ м}$;
- коэффициент сопротивления качению по таблице $f_c = 0,01$;
- требуемое ускорение $a = 1 \text{ м/с}^2$.

Нормальная реакция на колесо R равна нормальной нагрузке $F = m_k g = 400 \cdot 9,81 = 3924 \text{ Н}$. Угловое ускорение колеса $e = a/r_k = 1/0,372 = 2,688 \text{ рад/с}^2$. Формула расчета условий работы ведущего колеса:

$$T_r / r_d - f_c R - J_k e / r_d > 0.$$

Умножая обе части неравенства на r_d и перенеся все в правую часть, получим условие для тяговой силы:

$$T_r > r_d f_c R + J_k e = 0,372 \text{ м} \cdot 0,01 \cdot 3924 \text{ Н} + 1,373 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot 2,688 \text{ рад/с}^2, \\ T_r > 18,3 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

То есть для достижения ускорения в 1 м/с^2 тяговая сила должна превышать 18,3 Н·м, что согласуется с результатами проведенных расчетов выше. При этом при понижении давления в ПГА до 80 бар и ниже такое ускорение невозможно. Полученные результаты подтверждаются данными работы [10].

Нужно учесть, что работу ДВС при расчетах не использовали, и данные получены исключительно на тяговой мощности ГМН. Принцип работы установки изначально предполагает, что разгон автомобиля осуществляется при работающем ДВС, и рассматриваемая система является для разгона вспомогательной, а не основной.

Заключение

Обоснована возможность оснащения уже эксплуатируемого подвижного состава автотранспорта вспомогательными системами для разгона автомобиля

с помощью пневмогидравлического аккумулирования энергии при торможении.

Необходимо учесть, что пневмогидравлический аккумулятор с эффективным используемым объемом в 12 л недостаточно производителен, так как в нем остается 40 % рабочей жидкости из-за падения мощности гидромотор-насоса при опорожнении ПГА. Рекомендуемый эффективный объем — 20 л.

В ходе проведенных работ теоретические расчеты по рассматриваемой теме получили экспериментальное подтверждение. ■

Источники

1. Попов А. В., Чернова Г. А., Великанова М. В., Губанов Д. А. Анализ возможных причин возникновения неисправностей сцеплений автобусов Volgabus // Грузовик. 2020. № 5. С. 31–34.
2. Данилов С. В., Мамаев Р. Ш., Рыбак Д. В., Шайлиев Р. Ш. Вспомогательная система для ускорения автомобиля на основе принципов рекуперации энергии торможения // Транспорт Российской Федерации. Журнал о на-

- уке, практике, экономике. 2024. № 2. С. 55–58.
3. Ивлев В. И., Мисюрин С. Ю. Автономные пневматические приводы для легких транспортных средств // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 2. С. 32–34.
4. Рябов И. М., Ширяев С. А., Юсупов Ю. Г. Формирование структуры пневмогидравлической системы рекуперации и энергии торможения мобильной машины, обеспечивающей высокую надежность // Проектирование специальных машин для освоения горных территорий: материалы международной научно-практической конференции, 30 сентября – 2 октября 2016 г., Владикавказ. Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2016. С. 114–119.
5. Худорожков С. И., Галышев Ю. В. Динамика рекуперативного механического бесступенчатого привода транспортного средства // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 3(178). С. 216–222.
6. Бороденко Ю. Н. Концепции построения пневматических гибридов //

- Автомобильный транспорт (Харьков). 2020. № 46. С. 19–26. DOI: 10.30977/AT.2219-8342.2020.46.0.19.
7. Рябов И. М., Ширяев С. А., Данилов С. В. и др. Анализ пускотормозного устройства транспортного средства // АвтоГазо Заправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2021. Т. 20. № 6. С. 263–266.
8. Данилов С. В., Рыбак Д. В. Анализ режимов движения пассажирского автомобильного транспорта на городских маршрутах г. Черкесска // Научно-исследовательские публикации. 2022. № 1. С. 47–49.
9. Рыбак Д. В., Шайлиев Р. Ш. Схема вспомогательной системы для разгона городского автомобильного транспорта // Актуальные вопросы современной науки и практики: Сб. науч. ст. по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2022. С. 36–42.
10. Рябов И. М., Омарова З. К., Юсупов Ю. Г. Оценка экономической эффективности модернизации городских автобусов и автомобилей-такси путем установки системы рекуперации энергии торможения // Грузовик. 2019. № 8. С. 36–40.



Общероссийская общественная организация **РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА**

Академия включает
48 РЕГИОНАЛЬНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ

ДАТА ОСНОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
ТРАНСПОРТА:

26 июня 1991 года



Президент Академии:
А. Т. Н.
АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ МИШАРИН

СОСТАВ АКАДЕМИИ В 2023 ГОДУ

> 680 УЧЕНЫХ-ТРАНСПОРТНИКОВ:

170 ДОКТОРОВ НАУК

510 КАНДИДАТОВ НАУК

260 ПОЧЕТНЫХ ЧЛЕНОВ ПАТ

