

Научная статья
УДК 629.331

Результаты исследования процесса функционирования систем управления подключаемым полным приводом автомобилей на стендах с беговыми барабанами по обоснованию диагностических параметров

Олег Сергеевич Яньков¹, Дмитрий Олегович Ухватов²

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Россия

¹yos913005@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6709-4820>

²dim.ia@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8467-4804>

Аннотация. Значительная часть современных легковых автомобилей оснащается системами управления подключаемыми полным приводом, которые обеспечивают их повышенную проходимость, управляемость, безопасность. В связи с этим становится актуальным вопрос о поддержании технического состояния этих систем на должном уровне как в процессе эксплуатации, так и в процессе их испытаний при производстве и экспертизе. Для этого необходимы методы и средства определения технического состояния, а также диагностические параметры. В ходе работы представлены результаты аналитического и экспериментального исследования взаимосвязей между параметрами технического состояния автомобиля с системой AWD с муфтой *Haldex II* и основными параметрами его функционирования на стенде с беговыми барабанами. Выявленные закономерности позволили обосновать диагностические параметры рассматриваемой системы.

Ключевые слова: автомобиль, AWD, *Haldex*, система подключаемого полного привода, стенд с беговыми барабанами, математическая модель, диагностические параметры, экспериментальные исследования, муфта.

Для цитирования: Яньков О.С., Ухватов Д.О. Результаты исследования процесса функционирования систем управления подключаемым полным приводом автомобилей на стендах с беговыми барабанами по обоснованию диагностических параметров // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 4 (42).

Original article

The results of a study of the functioning of control systems for plug-in all-wheel drive vehicles on stands with running drums to substantiate diagnostic parameters

Oleg S. Yankov¹, Dmitrii O. Ukhvatov²

^{1,2}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹yos913005@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6709-4820>

²dim.ia@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-8467-4804>

Abstract. A significant part of modern passenger cars is equipped with plug-in all-wheel drive control systems, which ensure their increased cross-country ability, controllability, and safety. In this regard, the issue of maintaining the technical condition of these systems at the proper level both during operation and during their testing during production and expertise becomes urgent. This requires methods and means of determining the technical condition, as well as diagnostic parameters. In the course of the work, the results of an analytical and experimental study of the relationship between the parameters of the technical condition of a car with an AWD system with a *Haldex II* clutch and the main parameters of its functioning on a stand with running drums are presented. The revealed patterns allowed us to substantiate the diagnostic parameters of the system under consideration.

Keywords: car, AWD, *Haldex*, plug-in all-wheel drive system, stand with running drums, mathematical model, diagnostic parameters, experimental studies, clutch.

For citation: Yankov O.S., Ukhvatov D.O. The results of a study of the functioning of control systems for plug-in all-wheel drive vehicles on stands with running drums to substantiate diagnostic parameters // *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. № 4 (42).

Введение

Современный автомобиль представляет собой сложную техническую мехатронную систему, что обусловлено их постоянным совершенствованием, внедрением в конструкцию интеллектуальных систем, обеспечивающих высокие эксплуатационные характеристики, среди которых имеются системы, управляющие распределением мощности на ведущих колёсах. Ведется активная разработка систем управления подключаемым полным приводом, а также усовершенствование закона распределения мощности к колесам ведущих осей [1, 2, 3]. Наибольшее распространение получили системы управления подключаемым полным приводом автомобилей. Примером такой системы является автоматическая система распределения крутящего момента по осям автомобиля AWD (от англ.: *All-Wheel Drive*), которая используется во многих современных кроссоверах (*Mitsubishi Outlander*, *Toyota RAV4*, *Kia Sportage*, *Volkswagen Tiguan* и пр.). Основой системы AWD в большинстве случаев является фрикционная муфта *Haldex*, используемая многими американскими, европейскими, корейскими и японскими автопроизводителями.

Её высокая сложность, взаимосвязь с другими автоматизированными системами и, зачастую, тяжёлые условия эксплуатации приводят к периодическому возникновению отказов [4]. При этом большая часть времени затрачивается не на ремонт, а на определение как самой неисправности, так и причин её возникновения. Авторами статьи был проведён анализ неисправностей системы AWD с муфтой *Haldex II* поколения и причин их возникновения, полученного в ходе опроса сервисных, дилерских центров, СТО и прочих организаций в г. Иркутске и Иркутской области в период с 2021 г. по 2024 г., результаты которого показаны на рисунке 1.

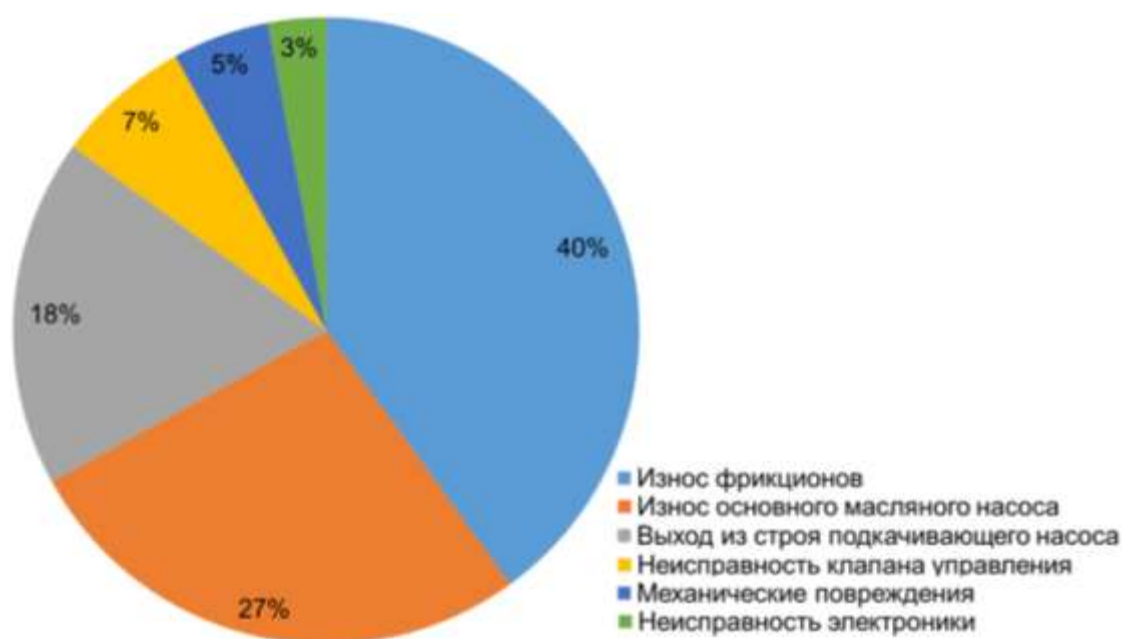


Рис. 1. Причины возникновения неисправностей системы AWD с муфтой *Haldex II* поколения

Анализ причин возникновения неисправностей системы AWD с муфтой *Haldex* позволяет условно разделить их на три группы: причины, связанные с механическими повреждениями и износом фрикционов, причины, связанные с некорректной работой гидравлических элементов муфты, а также причины, связанные с некорректной работой электроники. Если третья группа неисправностей поддаётся выявлению известными методами, например, с

использованием сканеров, то определение неисправностей, вызванных первыми двумя группами причин затруднительно без применения современных методов диагностики и реализующего их оборудования, а также диагностических параметров.

Целью работы является обоснование диагностических параметров, используемых для оценки технического состояния систем управления полным приводом автомобилей на стендах с беговыми барабанами. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи построения математической модели исследуемого процесса, выполнить проверку её адекватности, а также провести серию численных экспериментов с варьированием технического состояния. Полученные результаты обеспечат как поддержание высоких эксплуатационных свойств автомобилей с указанными системами, находящихся в условиях эксплуатации, так и могут быть применены в процессе испытаний автомобиля при его производстве и экспертизе.

Методы

Для решения задач авторами статьи был разработан комплекс математических моделей, в котором исследуемый процесс представлен в виде системы «Автомобиль-Стенд» [5,6]. Разработанный комплекс моделей позволяет в реальном времени осуществлять имитационное моделирование процесса функционирования автомобиля с системой управления подключаемым полным приводом на стенде с беговыми барабанами, а также проводить аналитические исследования по выявлению зависимостей диагностических параметров от параметров технического состояния.

Комплекс математических моделей учитывает:

- параметры процесса функционирования силовой установки;
- параметры процесса функционирования трансмиссии с муфтой

HalDEX II поколения с учётом её технического состояния;

- процессы взаимодействия эластичной шиной с беговыми барабанами стенда;
- динамические процессы в системе «Автомобиль-Стенд».

Определено, что эффективное исследование технического состояния систем управления полным приводом автомобилей на стендах с беговыми барабанами возможно при задании тестового режима разгона с имитацией буксования колёс ведущей оси и измерением силовых и кинематических параметров процесса: сил тяги F_{ki} на ведущих колёсах автомобиля и скорости колёс V_{ki} .

Для подтверждения достоверности комплекса математических моделей было выполнено экспериментальное исследование процесса функционирования автомобиля с системой AWD на стенде с беговыми барабанами [6]. Экспериментальное исследование было реализовано на разработанном исследовательском стендовом комплексе ИРНТУ, включающем в себя полноопорный гибридный стенд с беговыми барабанами, позволяющем проводить измерение параметров функционирования автомобиля [7,8]. Стенд состоит из блоков беговых барабанов 3 и 5, соединённых цепной передачей. Пары беговых барабанов блока соединены друг с другом и с маховыми массами 8 цепными 10 и карданными 6 передачами. Кинематически блоки барабанов соединены при помощи редукторов 1 и карданных передач 2. Имитация буксования заданной оси автомобиля как в процессе моделирования, так и в ходе экспериментального исследования задавалась за счёт фрикционных муфт 9, соединяющих беговые барабаны с трансмиссией стенда (рис. 2).

В качестве объекта исследования был использован автомобиль Volvo S60 2.5T AWD с муфтой Haldex II поколения.

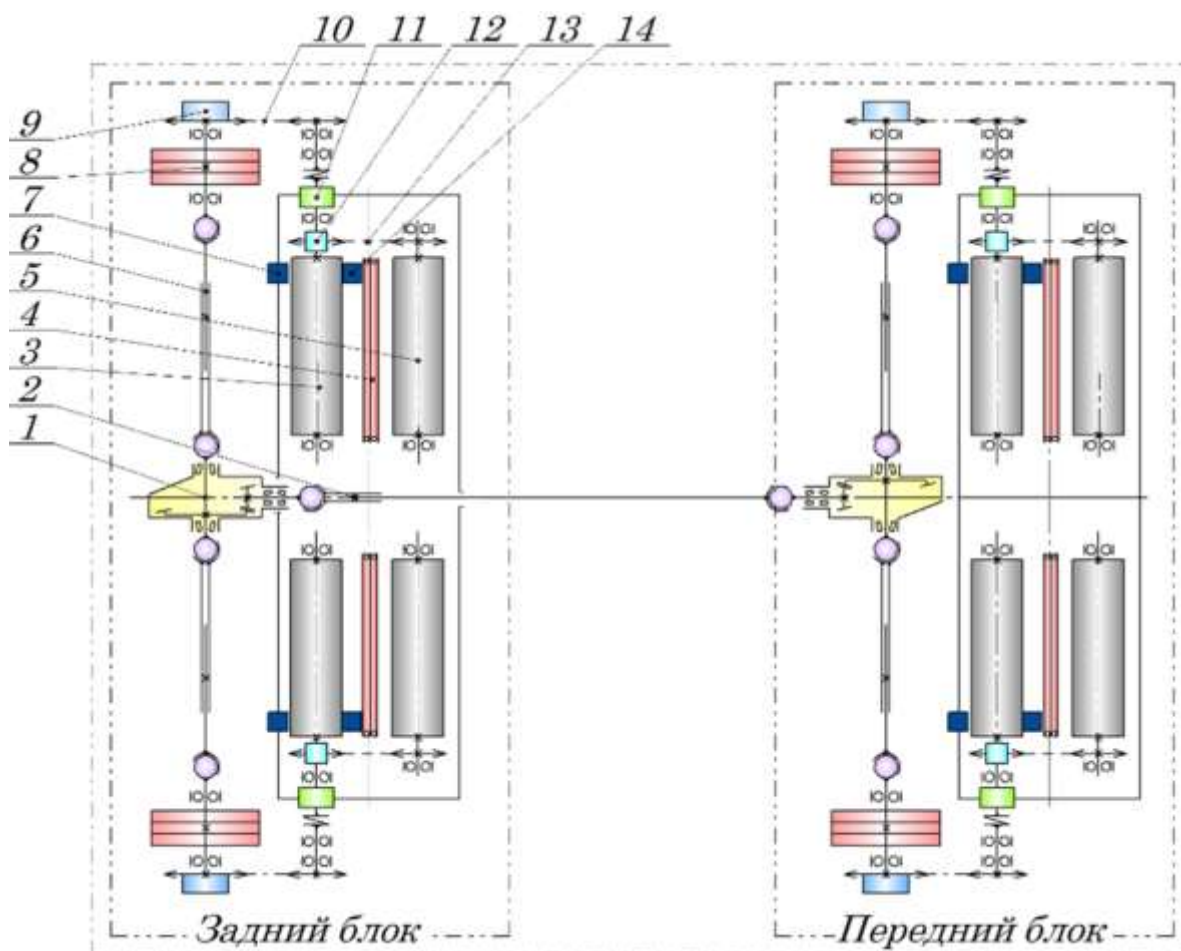


Рис. 2. Схема полноопорного гибридного стенда с беговыми барабанами:

1 – редуктор блока беговых барабанов; 2 – карданная передача; 3 – задний беговой барабан; 4 – ролик следящей системы; 5 – передний беговой барабан; 6 – карданная передача привода пары беговых барабанов; 7 – датчик скорости беговых барабанов; 8 – маховая масса; 9 – фрикционная муфта; 10 – цепная передача привода маховых масс; 11 – датчик силы; 12 – симметричный дифференциал; 13 – цепная передача привода переднего бегового барабана; 14 – датчик скорости ролика следящей системы

Аналитическое и экспериментальное исследования производились в соответствии со следующими тестовыми режимами:

- 1) разгон ведущих колёс КТС до заданной скорости с имитацией низкого коэффициента сцепления шин ведущих колёс передней оси;
- 2) разгон ведущих колёс КТС до заданной скорости с имитацией низкого коэффициента сцепления шин ведущих колёс задней оси.

Исходные параметры при проведении исследования:

- 1) момент инерции маховых масс – 3,5 кг·м²;
- 2) уровень активации органа управления силовой установкой – 25%;
- 3) время приведения органа управления силовой установкой в

заданное положение – 1 с;

- 4) конечная, имитируемая скорость разгона – 30 км/ч;

Расчет комплекса математических моделей осуществлялся в программной среде «Универсальный механизм-9».

Скорости V_{ki} , характеризующие исследуемый имитируемый режим, определялись по скорости роликов 4 следящей системы стенда. Силы тяги F_{ki} на ведущих колёсах измеряются бесконтактными магнитоупругими датчиками 11.

Оценка соответствия результатов математического моделирования результатам экспериментального исследования процесса функционирования автомобиля с системой управления подключаемым полным приводом на стенде с беговыми барабанами, осуществлялась по критерию Фишера.

Оценку адекватности проводили при уровне значимости, равном 95%. На рисунке 3 представлены результаты сравнения зависимостей скоростей ведущих колёс V_{ki}^{Π} в процессе разгона КТС с буксованием колёс передней оси, полученных аналитически и экспериментально. Рассчитанное значение критерия Фишера для скоростей колёс передней оси V_{K12}^{Π} составило

$F_p = 664,35$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение

критерия Фишера для скоростей колёс задней оси V_{K34}^{Π} составило

$F_p = 231,55$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

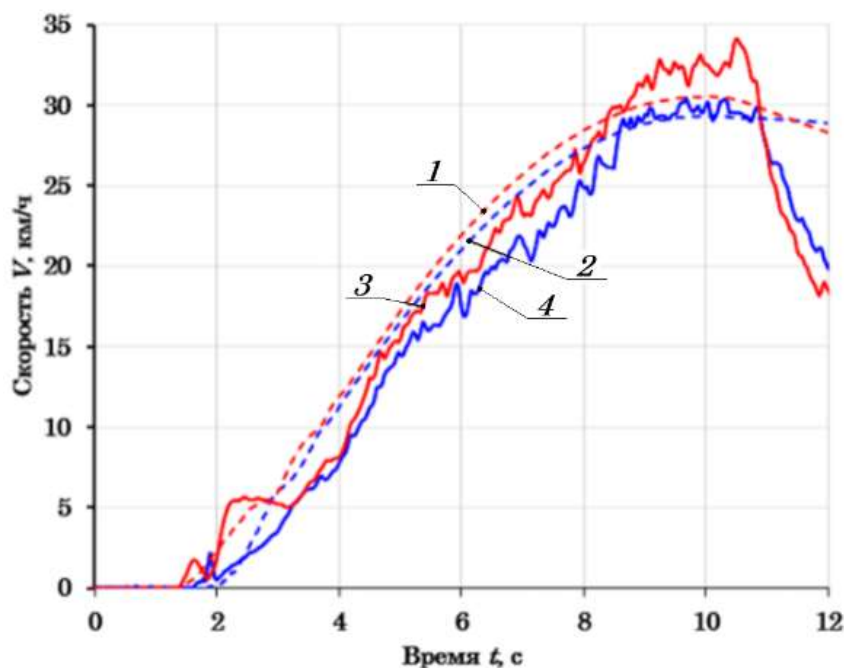


Рис. 3. Зависимость скоростей ведущих колёс V_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона автомобиля Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси:

- 1 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} (расчёт);
- 2 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π} (расчёт);
- 3 – скорость колёс передней оси V_{K12}^{Π} (эксперимент);
- 4 – скорость колёс задней оси V_{K34}^{Π} (эксперимент)

На рисунке 4 представлены результаты сравнения зависимостей сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе разгона КТС с буксованием колёс передней оси, полученные в ходе экспериментального и аналитического исследований. Рассчитанное значение критерия Фишера для сил тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} составило $F_p = 401,85$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$. Рассчитанное значение критерия Фишера для сил тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} составило $F_p = 561,55$, при табличном значении $F_{(v_1, v_2, \%)}^T = 3,49$.

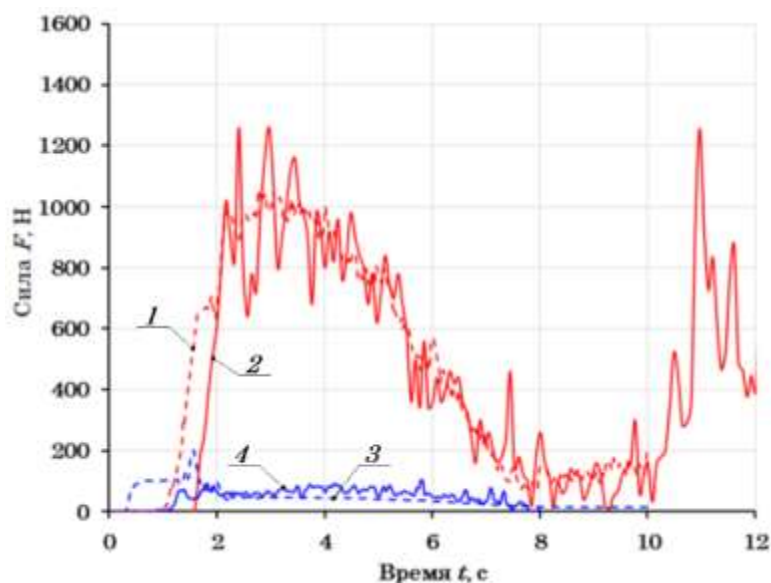


Рис. 4. Зависимости сил тяги ведущих колёс F_{Ki}^{Π} в процессе имитации разгона автомобиля Volvo S60 2.5T AWD с буксованием колёс передней оси:

- 1 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} (расчёт);
- 2 – силы тяги колёс задней оси F_{K34}^{Π} (эксперимент);
- 3 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} (расчёт);
- 4 – силы тяги колёс передней оси F_{K12}^{Π} (эксперимент)

Проверка адекватности разработанного комплекса математических моделей показала, что результаты аналитических исследований согласуются с данными, полученными в ходе экспериментов. Таким образом можно сделать вывод, что комплекс математических моделей признан адекватным и пригодным для проведения аналитических исследований процесса, что позволяет выявлять зависимости диагностических параметров системы управления подключаемого полного привода *AWD* от параметров её технического состояния.

Результаты

Для определения диагностических параметров были выполнены многовариантные виртуальные эксперименты на разработанном комплексе математических моделей с изменением параметров технического состояния системы *AWD* автомобиля. В результате были выявлены основные параметры функционирования: сил тяги F_{Ki} на ведущих колёсах автомобиля и скорости колёс V_{Ki} . Изменение технического состояния системы осуществлялось за счёт варьирования следующих параметров: коэффициента трения μ между

ведущими и ведомыми дисками муфты; темпа нарастания давления P прижатия дисков муфты и уставки срабатывания системы ω_y .

Неисправности, связанные с износом фрикционных дисков, в ходе аналитического исследования задавались за счёт изменения коэффициента трения μ между ведущими и ведомыми дисками от 0,1 до 0,3 (с дискретностью 0,05). В результате выполненного многовариантного расчёта получены зависимости сил тяги F_{K12}^{30} на передних ведущих колёсах при буксовании колёс задней оси и сил тяги F_{K34}^{10} на задних ведущих колёсах при буксовании колёс передней оси автомобиля от времени t при разгоне (рис. 5). Силы тяги F_{Ki} , являются наиболее информативными параметрами, поскольку по их значениям можно оценить эффективность передачи крутящего момента между ведущими осями автомобиля. На графике отчётливо видно, что при уменьшении коэффициента трения μ происходит увеличение силы тяги F_{Ki} , что обусловлено функционированием насоса гидравлической системы, который из-за буксования ведущих колёс передней оси чрезмерно увеличивает давление. При этом, включение муфты сопровождается рывками с повышением силы тяги F_{Ki} на ведущих колёсах автомобиля.

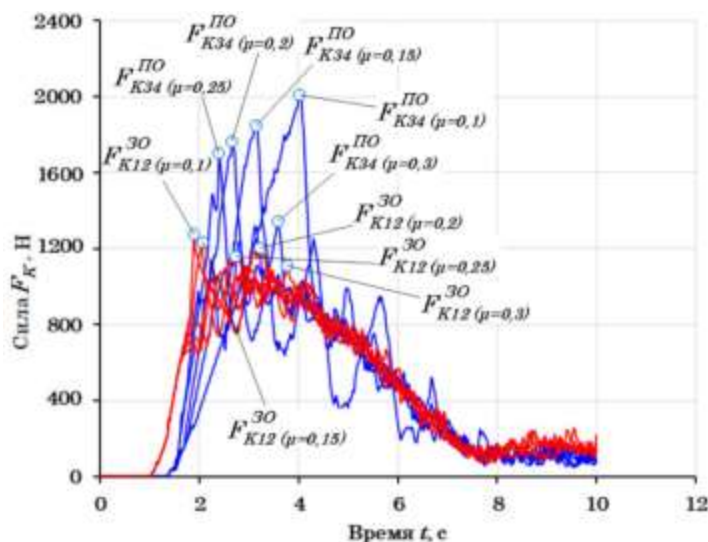


Рис. 5. Зависимость сил тяги F_{Ki} на ведущих колёсах автомобиля при разгоне автомобиля на стенде в процессе имитации буксования колёс передней и задней оси с варьированием технического состояния муфты путём изменения коэффициента трения μ между ведущими и ведомыми дисками муфты

Для оценки эффективности передачи крутящего момента муфтой, определяемой фрикционными свойствами, предлагается использовать параметр относительной разности сил ΔF :

$$\Delta F = \frac{F_{34\max}^{\text{ПО}} - F_{12\max}^{\text{ЗО}}}{F_{34\max}^{\text{ПО}}}; \quad (1)$$

где $F_{34\max}^{\text{ПО}}$ – максимальная сила тяги на задних колёсах автомобиля, при имитации буксования передней оси в режиме разгона на стенде; $F_{12\max}^{\text{ЗО}}$ – максимальная сила тяги на передних колёсах автомобиля, при имитации буксования задней оси в режиме разгона на стенде.

Смысл диагностического параметра ΔF заключается в реализации передаваемого трансмиссией крутящего момента между ведущими осями автомобиля. Связь диагностического параметра ΔF с параметром технического состояния – коэффициентом трения μ описывается полиномиальной регрессией (рисунок 6) с коэффициентом достоверности $R^2 = 0,999$:

$$\Delta F = -44,959\mu^3 + 22,5\mu^2 - 5,1412\mu + 0,9044. \quad (2)$$

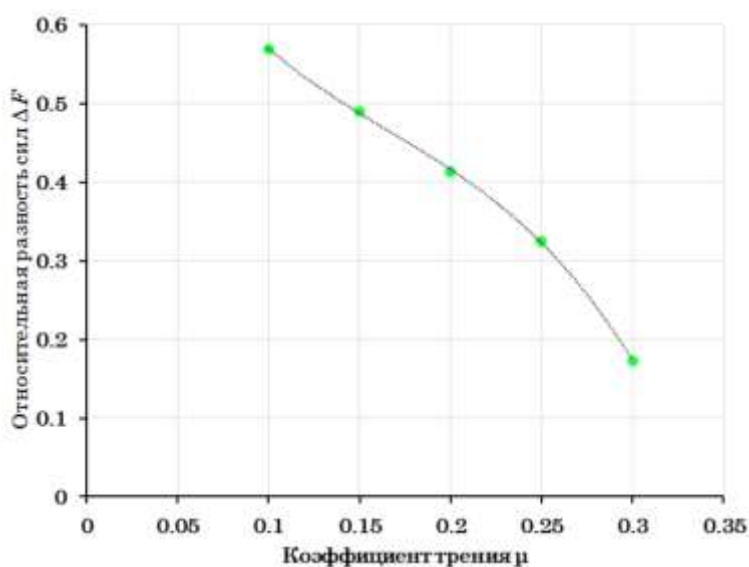


Рис. 6. Зависимость относительной разности сил ΔF от параметра технического состояния – коэффициента трения μ между ведущими и ведомыми дисками муфты

Неисправности, связанные с некорректной работой гидравлического насоса муфты, в ходе аналитического исследования задавались за счёт изменения темпа Δp нарастания давления P прижатия дисков муфты от 0,15 МПа/с до 0,55 МПа/с (с дискретностью 0,1 МПа/с). Этот параметр отражает насколько качественно функционирует насос гидросистемы подключаемого полного привода.

На рисунке 7 представлены зависимости средних скоростей V_{Ki} колёс, полученные в процессе моделирования при варьировании темпа нарастания давления P прижатия дисков муфты при буксовании ведущих колёс передней оси. При снижении давления P происходит увеличение времени синхронизации t_{Ci} скоростей колёс передней $V_{12}^{ПО}$ и задней $V_{34}^{ПО}$ осей автомобиля при срабатывании муфты.

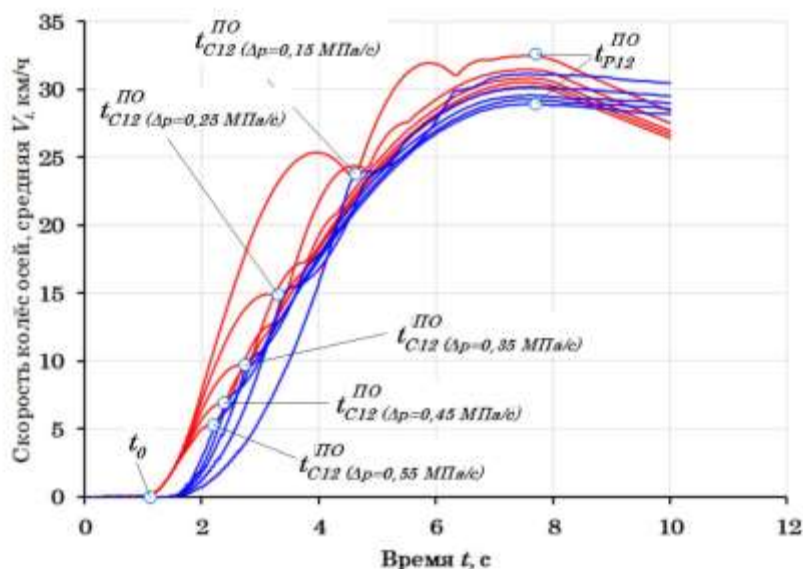


Рис. 7. Зависимость средних скоростей V_{Ki} колёс при разгоне автомобиля на стенде в процессе имитации буксования колёс передней оси с варьированием технического состояния муфты путём изменения темпа нарастания давления P прижатия дисков муфты

Для оценки эффективности функционирования гидравлической системы муфты, определяемой скоростью увеличения давления P ,

предлагается использовать параметр относительного времени срабатывания системы Δt :

$$\Delta t = \frac{t_{c12}^{по}}{t_{p12}^{по}}; \quad (3)$$

где $t_{c12}^{по}$ – время, соответствующее моменту равенства средних скоростей V_{Ki} передних и задних колёс в процессе разгона при имитации буксования ведущих колёс передней оси на стенде; $t_{p12}^{по}$ – максимальное время разгона автомобиля до заданной скорости, при имитации буксования передней оси на стенде.

Смысл диагностического параметра Δt заключается в быстроедействии передачи крутящего момента между ведущими осями автомобиля. Диагностический параметр Δt связан с параметром технического состояния – темпом нарастания давления Δp уравнением полиномиального вида (рис. 8):

$$\Delta t = -4,4444\Delta p^3 + 6,5873\Delta p^2 - 3,4556\Delta p + 0,896. \quad (4)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,999$.

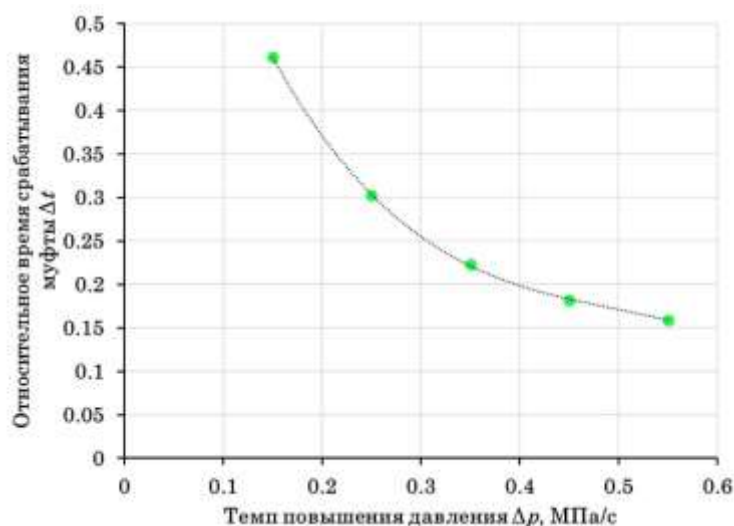


Рис. 8. Зависимость времени срабатывания системы Δt от параметра технического состояния – темпа нарастания давления Δp

Неисправности, связанные с некорректной работой электронной составляющей системы, в ходе аналитического исследования задавались

путём варьирования уставки ω_y срабатывания системы от 5% до 20% (с дискретностью 5%). Этот параметр характеризует разность между угловыми скоростями буксующих и отстающих колёс, определяющую момент срабатывания муфты системы управления подключаемым полным приводом. На рисунке 9 представлены зависимости средних скоростей V_{Ki} колёс при разгоне автомобиля на стенде в процессе имитации буксования передней оси с варьированием технического состояния системы за счёт изменения уставки срабатывания ω_y .

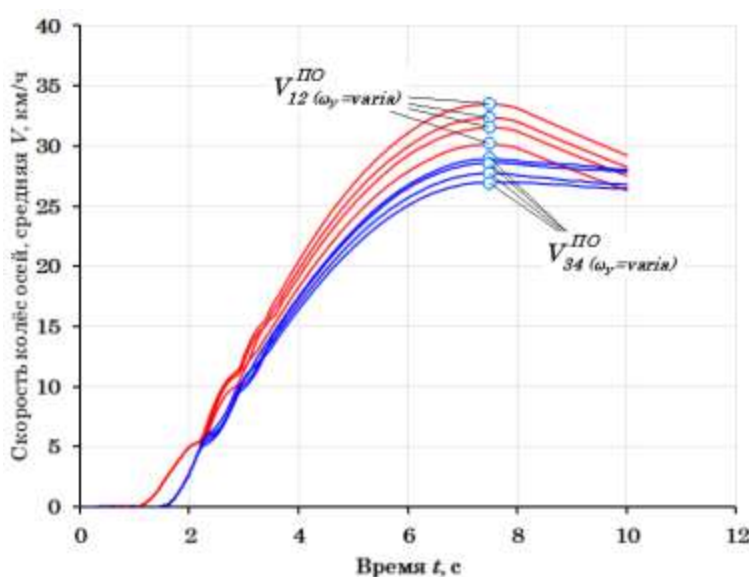


Рис. 9. Зависимость средних скоростей V_{Ki} колёс при разгоне автомобиля на стенде в процессе имитации буксования колёс передней оси с варьированием технического состояния системы, путём изменения уставки срабатывания ω_y

При варьировании значения ω_y происходит изменение скоростей колёс передней $V_{12}^{ПО}$ и задней $V_{34}^{ПО}$ осей автомобиля. Для оценки эффективности функционирования электронной части системы AWD, определяемой уставкой срабатывания ω_y , предлагается использовать параметр относительной скорости разгона ΔV :

$$\Delta V = \frac{V_{12max}^{ПО}}{V_{34max}^{ПО}}; \quad (5)$$

где $V_{12max}^{ПО}$ — максимальная средняя скорость передних колёс в процессе разгона автомобиля на стенде при имитации буксования передней оси;

$V_{34max}^{ПО}$ – максимальная средняя скорость задних колёс в процессе разгона автомобиля при имитации буксования передней оси на стенде.

Физическая суть этого параметра ΔV заключается в корректности определения автоматизированной системой управления трансмиссией AWD ситуации, когда произошло буксование передних колёс. Диагностический параметр ΔV связан с параметром технического состояния – уставкой срабатывания ω_y линейным уравнением вида (рисунок 10):

$$\Delta V = -0,0101\omega_y + 1,0089. \quad (6)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации $R^2 = 0,999$.

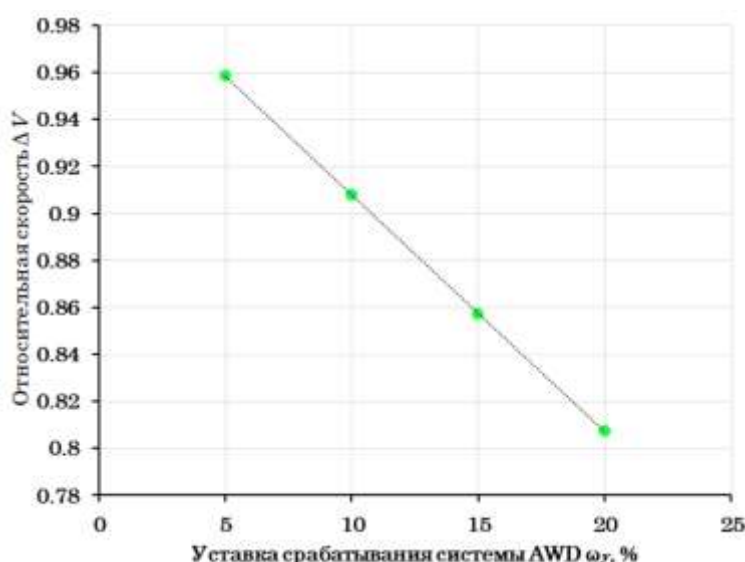


Рис. 10. Зависимость относительной скорости разгона ΔV от параметра технического состояния – уставки срабатывания ω_y

Выводы

В результате проведённой работы можно сделать следующие выводы.

1. Применение разработанного комплекса математических моделей позволяет с достаточной точностью выполнять аналитические исследования процесса функционирования автомобиля с системой управления подключаемым полным приводом AWD с муфтой *Haldex II* на стендах с беговыми барабанами.

2. Использование многовариантных расчётов комплекса моделей в ходе аналитического исследования позволяет варьировать параметрами технического состояния системы *AWD*, что даёт возможность обосновывать диагностические параметры для контроля её технического состояния.

3. Предложены следующие диагностические параметры: относительная разность сил ΔF тяги, относительное время срабатывания системы Δt и относительная скорость разгона ΔV .

В перспективе планируется выполнить аналитические и экспериментальные исследования процесса функционирования муфт *Haldex* следующих поколений с выявлением как диагностических параметров, так и их нормативных значений.

Список источников

1. Антонян, А. В. Повышение устойчивости и управляемости автомобилей колесной формулой 4x4 путем перераспределения подводимых к колесам вращающих моментов : специальность 05.05.03 "Колесные и гусеничные машины" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Антонян Акоп Ваганович, 2021. – 209 с. – EDN XFHQNC.
2. Влияние межосевого перераспределения мощности на управляемость и устойчивость полноприводного автомобиля с комбинированной энергетической установкой / Е. Е. Баулина, А. В. Кругашов, В. В. Серебряков, А. И. Филонов // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 3(92). – С. 34-39. – EDN UDDLTD.
3. Жилейкин, М. М. Разработка закона распределения моментов по колесам многоосной колесной машины с электро-механической трансмиссией, выполненной по схеме "мотор-ось" / М. М. Жилейкин, В. А. Середюк // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 5. – С. 85-101. – DOI 10.7463/0514.0705516. – EDN SKCZCR.
4. Яньков, О. С. К вопросу о диагностике систем подключаемого полного привода / О. С. Яньков, Д. О. Ухватов, А. В. Куртова // Мировая наука на пути к устойчивому развитию: естественно-научные исследования, технический прогресс : Материалы IV Международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 31 марта 2023 года. – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Манускрипт", 2023. – С. 253-257. – EDN DLTBGM.

5. Яньков, О. С. Математическая модель процесса функционирования колесного транспортного средства с системой подключаемого полного привода на стенде с беговыми барабанами / О. С. Яньков, Д. О. Ухватов, А. В. Куртова // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации : Материалы 116-й Международной научно-технической конференции, Улан-Удэ, 12–13 сентября 2023 года. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2023. – С. 105-115. – DOI 10.53980/9785907746091_105. – EDN ZLFHNP.
6. Процесс функционирования КТС с автоматизированной системой полного привода на стенде с беговыми барабанами / Д. О. Ухватов, О. С. Яньков, А. И. Федотов [и др.] // Грузовик. – 2024. – № 8. – С. 12-16. – DOI 10.36652/1684-1298-2024-8-12-16. – EDN RHGLSM.
7. Патент на полезную модель № 198516 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/28. бесконтактный измеритель для силового тормозного роликового стенда: № 2020113148: заявл. 26.03.2020: опубл. 14.07.2020 / А. И. Федотов, О. С. Яньков, А. С. Чернышков [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Фритрейн". – EDN REWMZI.
8. Патент на полезную модель № 199093 U1 Российская Федерация, МПК G01L 5/13. Гибридный универсальный полноопорный стенд для контроля технического состояния колесных транспортных средств: № 2020111732: заявл. 23.03.2020: опубл. 13.08.2020 / А. И. Федотов, О. С. Яньков, А. С. Чернышков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Иркутский национальный исследовательский технический университет" (ФГБОУ ВО "ИРНИТУ"). – EDN QULBNR.

References

1. Antonyan A.V. Povysheniye ustoychivosti i upravlyayemosti avtomobiley kolesnoy formuloy 4kh4 putem pereraspredeleniya podvodimyykh k kolesam vrashchayushchikh momentov (Increasing the stability and controllability of 4x4 vehicles by redistributing the torque supplied to the wheels) Candidate's thesis, Moscow, 2021.
2. Baulina Ye.Ye., Krutashov A.V., Serebryakov V.V., Filonov A.I. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*, 2015, no. 3(92), pp. 34-39.
3. Zhileykin M.M., Seredyuk V.A. *Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana*, 2014, no. 5, pp. 85-101.
4. Yan'kov O.S., Ukhvatov D.O., Kurtova A.V. Mirovaya nauka na puti k ustoychivomu razvitiyu: yestestvenno-nauchnyye issledovaniya, tekhnicheskii progress, Materialy konferentsii, Rostov-na-Donu, Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Izdatel'stvo "Manuskript", 2023, pp.253-257.

5. Yan'kov O.S., Ukhvatov D.O., Kurtova A. V Bezopasnost' kolesnykh transportnykh sredstv v usloviyakh ekspluatatsii, Materialy konferentsii, Ulan-Ude, Vostochno-Sibirskiy gosudarstvennyy universitet tekhnologiy i upravleniya, 2023, pp.105-115.
6. Ukhvatov D.O. Yan'kov O.S., Fedotov A.I. Krivtsov S.N., Lobov N.V. *Gruzovik*, 2024, no. 8, pp. 12-16.
7. Fedotov A.I., Yankov O.S., Chernyshkov A.S. et al., Patent RU 198516 U1, 14.07.2020.
8. Fedotov A.I., Yankov O.S., Chernyshkov A.S., Patent RU 199093 U1, 13.08.2020.

Рецензент: А.М. Иванов, д-р тех. наук, проф., МАДИ

Информация об авторах

Яньков Олег Сергеевич, канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВО «ИРНИТУ».

Ухватов Дмитрий Олегович, аспирант, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ».

Information about the authors

Yankov Oleg S., Candidate of Sciences (Technical), associated professor, INRTU.

Ukhvatov Dmitrii O., postgraduate, INRTU.

Статья поступила в редакцию 03.10.2024; одобрена после рецензирования 08.10.2024; принята к публикации 19.12.2024.

The article was submitted 03.10.2024; approved after reviewing 08.10.2024; accepted for publication 19.12.2024.