Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение
высшего образования
«Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды
Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова»

На правах рукописи



БЛИННИКОВА ЛАРИСА ГЕННАДЬЕВНА

АДАПТИВНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гармаш Юрий Владимирович

Рязань 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕХНИКЕ 12
1.1 Анализ факторов, влияющих на плавность хода автомобиля 12
1.2 Требования, предъявляемые к характеристикам амортизаторов автомобильной техники 20
1.3 Современные подходы к разработке подвесок с электронным управлением и рекуперативных электромагнитных амортизаторов 25
1.4 Анализ проблем, возникающих при демпфировании колебаний радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на транспортных средствах . 33
1.5 Выводы по первой главе 37
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ 39
2.1 Основы построения адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески 39
2.2 Способы реализации адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний 46
2.3 Выводы по второй главе. 57
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ 59
3.1 Моделирование адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески в среде Simulink 59

3.1.1 Имитационное моделирование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний в среде Simulink 61
3.1.2 Моделирование с учетом микропрофиля дороги 65
3.2 Экспериментальное исследование адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески 69
3.2.1 Экспериментальное исследование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний на дискретной элементной базе 70
3.2.2 Экспериментальное исследование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний на элементах с высокой степенью интеграции 75
3.3 Выводы по третьей главе 85
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ 86
4.1 Анализ результатов исследования 86
4.2 Эффективность применения адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески 87
4.2.1 Эффективность применения адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний на транспортных средствах 88
4.2.2 Эффективность применения адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний для виброзащиты радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на транспортных средствах 93
4.2.3 Рекомендации по направлениям дальнейших исследований 95
4.3 Выводы по четвертой главе 97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 98
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 103

ПРИЛОЖЕНИЕ А Описание микросхемы TL494 120
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Описание микросхемы IL6562 124
ПРИЛОЖЕНИЕ В Печатная плата информационно-управляющей системы 129
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты внедрения 130
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патенты 133

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Технологическое развитие Российской Федерации (РФ) в современных условиях, ее промышленный и экономический рост невозможны без активного применения информационно-измерительных и управляющих систем (ИИУС).

Автомобильная техника (АТ) является основой автомобильных парков многих отраслей российской экономики (топливно-энергетический комплекс, геологоразведка, строительный комплекс и др.) и системообразующим компонентом Вооруженных Сил (ВС) РФ, определяющим подвижность всех родов войск.

В сложившихся непростых геополитических и макроэкономических реалиях передовые технологии становятся ключевым фактором обеспечения устойчивого развития отечественного промышленного сектора. Новой тенденцией в автомобилестроении является разработка автоматизированных систем подвески, кроме того, системы демпфирования колебаний радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), широко используемой в настоящее время в системах связи, навигации, системах управления, служат для ее защиты от воздействия внешних механических нагрузок.

Важным элементом подвески или системы демпфирования является амортизатор. Одно из перспективных направлений в разработке современных амортизаторов – создание управляемых электроникой амортизаторов с автоматически регулируемыми характеристиками.

Также в последнее годы все более широкое распространение получают устройства рекуперации энергии. Особенно важна рекуперация для автотранспортных средств (АТС), которым присущ дефицит электроэнергии, например, электромобилей.

В современной автомобильной технике применяются рекуперативные тормозные системы, сохраняющие энергию, которая теряется при торможении.

Еще одним способом восстановления энергии, находящимся на стадии исследований, являются рекуперативные подвесные системы.

Разработка амортизаторов-генераторов, позволяющих преобразовать механическую энергию колебаний в электрическую с последующим ее использованием для подзарядки аккумуляторной батареи (АКБ), весьма перспективна. Такие рекуперативные системы сейчас активно разрабатываются у нас в стране и за рубежом [1 – 7].

Применение электромагнитных систем демпфирования, над которыми в настоящее время работают многие исследователи и производители, позволит осуществлять рекуперацию энергии и активное демпфирование колебаний, улучшить технические, эксплуатационные, экономические и эргономические характеристики информационно-управляющих систем демпфирования.

Следовательно, работа, посвящённая моделированию адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески с возможностью регулирования ее характеристик с помощью средств современной электроники, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследования и разработку электромагнитных систем демпфирования и рекуперативных амортизаторов внесли многие отечественные и зарубежные ученые, в том числе Миханошин В. В., Посметьев В. И., Никонов В. О., Сергиенко А. Н., Любарский Б. Г., Гусев Е. П., Григорчук В. С., Крамаренко Е. Ю., Bose A., Zuo L., Goldner R., Zhang Z., Gupta A., Sultoni A. и др. [1, 2, 3, 4, 6, 8 –15].

Управляемым амортизаторам посвящены работы Котиева Г. О., Новикова В. В., Рябова И. М., Круглова С. П. и др. [16 – 21].

В электромагнитных системах демпфирования изменение характеристик демпфирующего элемента достигается за счет изменений свойств магнитного поля. При движении катушки индуктивности в магнитном поле в ней возникает электродвижущая сила (ЭДС) и при наличии сопротивления нагрузки

электрический ток, который затем можно использовать, например, для подзарядки аккумуляторной батареи.

Однако в настоящее время подобные устройства не получили практического применения и внедрения в основном из-за сложности и высокой стоимости конструкции, а также недостаточной разработки эффективных электронных управляющих систем.

Объект исследования – информационно-управляющая система (ИУС) демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

Предмет исследования – адаптивное управление демпфированием колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

Цель исследования – улучшение демпфирующих свойств рекуперативной электромагнитной подвески и защищенности перевозимого оборудования в различных дорожных условиях за счет применения электронной адаптивной ИУС.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести анализ современного состояния систем демпфирования колебаний, применяемых в технике;

2) провести теоретическое обоснование и предложить способы реализации адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески;

3) разработать имитационную модель и провести экспериментальное исследование адаптивной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески;

4) оценить эффективность применения адаптивной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

Методология и методы исследований. Решение поставленных в диссертационной работе задач проводилось с применением теоретических и экспериментальных методов исследования. Использовались методы системного анализа, цифрового моделирования случайных процессов, методы имитационного

моделирования с использованием пакета MATLAB/Simulink, а также методы теоретической электротехники и схемотехники.

Научная новизна результатов исследования.

1. Проведено теоретическое обоснование построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески (соответствует пп. 1, 2 паспорта специальности 2.2.11.), отличительными особенностями которой являются:

– получение необходимой амортизаторной характеристики за счет регулирования отбираемой мощности в соответствии с выявленными закономерностями;

– преобразование энергии механических колебаний в электрическую энергию с коэффициентом полезного действия (КПД) порядка 90%, с возможностью ее последующего использования, например, для заряда аккумуляторной батареи, при сохранении демпфирующих характеристик амортизатора;

– возможность изменения амортизаторной характеристики за короткое время (~ 1 мс), в том числе и в автоматическом режиме.

2. Предложен способ регулирования демпфирующих свойств подвески за счет управления электрическим током, отбираемым от электромагнитного амортизатора с помощью ИУС на основе широтно-импульсной модуляции, отличающийся адаптацией характеристик амортизатора к условиям эксплуатации и позволяющий улучшить плавность хода на 9 – 13% (соответствует пп. 1, 2 паспорта специальности 2.2.11.).

3. Разработана имитационная модель построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески в среде Simulink, отличительной особенностью которой является возможность моделирования разных условий эксплуатации при движении по дорогам различного профиля (соответствует п. 3 паспорта специальности 2.2.11.).

Положения, выносимые на защиту:

1. Способ регулирования демпфирующих свойств подвески за счет управления электрическим током, отбираемым от электромагнитного амортизатора с помощью адаптивной ИУС на основе широтно-импульсной модуляции, позволяющий за счет регулирования отбираемой мощности изменять силу сопротивления демпфирующего устройства по любому закону и получить автоматически управляемую адаптивную подвеску (соответствует пп. 1, 2 паспорта специальности 2.2.11.).

2. Теоретическое обоснование построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, обладающей возможностью быстрой адаптации подвески к условиям эксплуатации, что обуславливает новое свойство АТС и РЭА, позволяющее защищать перевозимое оборудование в любых дорожных условиях (соответствует пп. 1, 2 паспорта специальности 2.2.11.).

3. Имитационная модель построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, позволяющая моделировать работу подвески при эксплуатации АТС на дорогах с различным микропрофилем (соответствует п. 3 паспорта специальности 2.2.11.).

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Предложен новый способ регулирования демпфирующих свойств подвески за счет управления электрическим током, отбираемым от электромагнитного амортизатора с помощью адаптивной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, который может быть использован при разработке систем демпфирования колебаний АТС и РЭА.

2. Разработана имитационная модель построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески в среде Simulink, которая позволяет моделировать работу амортизатора с характеристикой любого вида при эксплуатации АТС на дорогах с различным микропрофилем.

3. Предложены новые технические решения построения электронной ИУС, позволяющие осуществлять активное гашение колебаний, которые могут быть использованы при совершенствовании существующих и создании новых ИИУС.

Предлагаемые технические решения, обеспечивающие изменение силы сопротивления амортизатора по любому закону, позволяют:

- изменять в автоматическом режиме демпфирующие свойства подвески в зависимости от подрессоренной массы;

- расширить классификационную группу эксплуатации РЭА военного назначения с 1.1 (аппаратура стационарных помещений, сооружений) до 1.3 (аппаратура объектов на колесных и гусеничных шасси, не имеющих противопульного бронирования и артиллерийско-минометного вооружения) согласно ГОСТ РВ 20.39.304-98 [22] по сравнению со стандартными техническими решениями, а также повысить защищенность элементов РЭА, применяемых для обработки специальных данных, от несанкционированного доступа.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационных исследований использованы АО «НПО «Рязаньприбор» при испытаниях модернизированной аппаратуры образования тракта передачи данных (АОТ ПД), в учебном процессе РВВДКУ, а также реализованы в Восьмом управлении Генерального штаба ВС РФ в ходе работ по улучшению технических характеристик аппаратуры, разработанной для передачи специальных данных и эксплуатируемой в воинских частях и организациях МО РФ.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность обеспечивается логическим построением исследования, соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, их уровнем и глубиной, а также их соответствием с имитационной моделью электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

Основные положения диссертации представлены и обсуждены:

- на X, XI, XII, XIII, XVII, XVIII Международных научно-практических конференциях «Наука и образование XXI века» и XI, XII, XIV, XV Международных студенческих научно-практических конференциях «Студенческий научный поиск – науке и образованию XXI века» в СТУ (г. Рязань, 2016 – 2024 гг.);

- на 2-ой Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» и 5-ой Международной научно-практической интернет-конференции «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса» в ОГУ (г. Орел, 2016 г.);

- на II и III научно-практических семинарах «Направления повышения технической готовности вооружения, военной и специальной техники ВДВ» в РВВДКУ (г. Рязань, 2021, 2022 гг.);

- на XXV Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед 2022» (бронзовая медаль);

- на XXXVIII Всероссийской научно-технической конференции «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы» (г. Рязань, 2025 г.).

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликованы 30 научных работ, из них 3 статьи в рекомендуемых изданиях ВАК по специальности 2.2.11, 5 статей в изданиях из перечня ВАК по другим специальностям, 3 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus, 2 патента РФ на полезную модель, 3 статьи в других научных журналах и 14 статей по результатам конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 126 наименований и 5 приложений. Объем диссертации составляет 135 страниц, включая 43 рисунка и 3 таблицы.

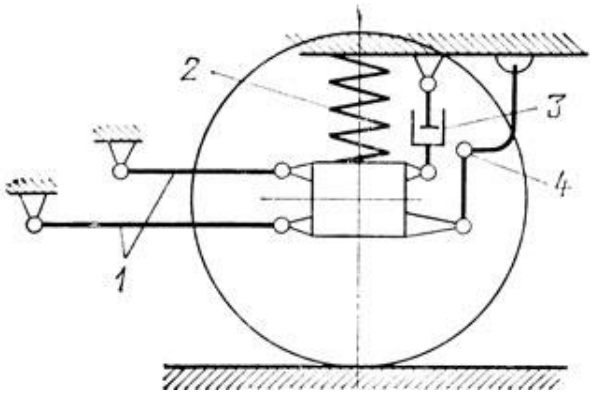
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТЕХНИКЕ

В инженерной практике часто возникает необходимость минимизировать воздействие нежелательных механических колебаний. С этой целью применяются различные демпфирующие устройства. Особенно незаменимы демпферы в конструкциях автомобильных подвесок.

Подвеска – ключевой элемент автомобиля. В её функциональные задачи входит обеспечение виброзащиты груза и людей, находящихся в автомобиле, а также защита его конструктивных элементов. Кроме того, эффективная работа подвески является определяющим фактором управляемости и необходимым условием обеспечения безопасности дорожного движения.

1.1 Анализ факторов, влияющих на плавность хода автомобиля

Автомобильная подвеска (рисунок 1.1) представляет собой совокупность направляющего устройства *1*, упругого устройства *2*, гасящего устройства *3* и стабилизирующего устройства *4* [23, 24, 25], которые осуществляют упругую связь колес с корпусом транспортного средства (ТС).



1– направляющее устройство, 2 – упругое устройство,
3 – гасящее устройство, 4 – стабилизирующее устройство

Рисунок 1.1 – Схема автомобильной подвески

Назначение подвески – обеспечение плавности хода автомобиля, а также предотвращение отрыва колес транспортного средства от дороги с целью повышения безопасности его движения.

Дорожные неровности являются основными причинами возникновения колебаний автомобиля, который представляет собой сложную колебательную систему. Колебания оказывают существенное влияние на плавность хода транспортного средства.

Колебания и плавность хода автомобиля подробно рассмотрены в трудах Р. В. Ротенберга, Я. М. Певзнера, А. А. Хачатурова [26, 27, 28], также эти вопросы отражены в работах А. А. Силаева, А. И. Гришкевича, В. П. Тарасика, В. Ф. Васильченкова, В. К. Вахламова [23, 29, 30, 31, 32].

Автомобиль можно представить как многомассовую колебательную систему с несколькими степенями свободы. Частоты колебаний подрессоренных масс на упругих устройствах подвески находятся в пределах 60 – 150 мин$^{-1}$. Неподрессоренные массы колеблются на упругих устройствах подвески и шинах с частотами 350 – 700 мин$^{-1}$ [23].

Из-за гашения в подвеске свободные колебания автомобиля всегда затухают. Это является результатом действия жидкостного трения в гидравлических амортизаторах, сухого трения в рессорах и шарнирах подвески, межмолекулярного трения в шинах и резиновых деталях подвески.

Преобладание жидкостного трения способствует интенсивному затуханию колебаний, что позволяет эффективно настраивать параметры демпфирования и обеспечивать требуемую плавность хода ТС.

Влияние сухого трения стараются максимально исключить из-за невозможности управлять его действием.

Сила сопротивления в амортизаторе считается пропорциональной скорости перемещения поршня в процессе колебаний. Коэффициент сопротивления амортизатора k, Н·с/м, определяется по формуле [23]:

$$k = \frac{F_c}{v_n}, \qquad (1.1)$$

где F_c – сила сопротивления амортизатора, Н;

v_n – скорость перемещения поршня амортизатора, м/с.

Оценка эффективности демпфирования по коэффициенту сопротивления k амортизатора является недостаточной, поскольку одинаковые амортизаторы ведут себя по-разному в различных подвесках. Более объективным показателем является коэффициент сопротивления подвески h, $с^{-1}$, который учитывает величину подрессоренной массы транспортного средства [26]:

$$h = \frac{k}{M}, \tag{1.2}$$

где k – коэффициент сопротивления амортизатора, Н·с/м;

M – подрессоренная масса, кг.

А лучше всего оценивать гашение колебаний в автомобильной подвеске с помощью относительного коэффициента затухания ψ [26]:

$$\psi = \frac{h}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{2cM}}, \tag{1.3}$$

где $\omega = \sqrt{\frac{2c}{M}}$ – собственная частота колебаний, $с^{-1}$;

c – жесткость подвески, Н/м.

Из формулы (1.3) видно, что на затухание колебаний влияет не только сопротивление амортизатора, но и параметры колеблющейся системы.

Свободные затухающие колебания подрессоренной M и неподрессоренной m масс каждой части автомобиля подвески с амортизатором (при отсутствии сухого трения) описываются системой дифференциальных уравнений [23, 26, 28, 33]:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + 2k(\dot{z} - \dot{\zeta}) + 2c_p(z - \zeta) = 0, \\ m\ddot{\zeta} - 2k(\dot{z} - \dot{\zeta}) - 2c_p(z - \zeta) + 2c_ш\zeta = 0, \end{cases} \tag{1.4}$$

где z и ζ – вертикальные перемещения подрессоренной и неподрессоренной масс соответственно, м;

m – неподрессоренная масса, кг;

c_p – жесткость подвески, Н/м;

$c_ш$ – жесткость шины, Н/м.

После преобразования системы (1.4) математическую модель затухающих колебаний автомобильной подвески можно записать в виде [26, 33]:

$$\begin{cases} \ddot{z} + 2h_0\dot{z} + \omega_0^2 z - 2h_0\dot{\zeta} - \omega_0^2\zeta = 0, \\ \ddot{\zeta} + 2h_к\dot{\zeta} + \omega_к^2\zeta - 2h_к\dot{z} - \omega_{к0}^2 z = 0, \end{cases} \quad (1.5)$$

где $h_0 = \frac{k}{M}$, $h_к = \frac{k}{m}$ – коэффициенты сопротивления подвески, с$^{-1}$;

$\omega_0^2, \omega_к^2, \omega_{к0}^2$ – парциальные частоты колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс:

$$\omega_0^2 = \frac{2c_p}{M}, \quad \omega_к^2 = \frac{2(c_p + c_ш)}{m}, \quad \omega_{к0}^2 = \frac{2c_p}{m}. \quad (1.6)$$

В случае слабой связанности колебательных процессов подрессоренной и неподрессоренной масс последними двумя членами в обоих уравнениях можно пренебречь, и система (1.5) распадается на два уравнения [26, 32, 33]:

$$\ddot{z} + 2h_0\dot{z} + \omega_0^2 z = 0, \quad \ddot{\zeta} + 2h_к\dot{\zeta} + \omega_к^2\zeta = 0. \quad (1.7)$$

Решения дифференциальных уравнений (1.7) имеют вид [26, 32, 33]:

$$z = A_z e^{-h_0 t}\ sin(\omega t + \varphi_0), \quad \zeta = A_\zeta e^{-h_к t}\ sin(\overline{\omega} t + \varphi_к), \quad (1.8)$$

где A_z, A_ζ – начальная амплитуда колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс соответственно, м;

t – время, с;

φ_0, $\varphi_к$ – начальный фазовый угол колебаний, рад;

$\omega = \omega_0\sqrt{1-\psi_0^2}$ – частота колебаний подрессоренной массы, с$^{-1}$;

$\psi_0 = \frac{h_0}{\omega_0}$ – относительный коэффициент затухания колебаний подрессоренной массы;

$\overline{\omega}$ – частота колебаний неподрессоренной массы, с$^{-1}$;

$\psi_к$ – относительный коэффициент затухания колебаний неподрессоренной массы.

У современных автомобилей $\psi_0 = 0{,}15 - 0{,}25$, $\psi_k = 0{,}25 - 0{,}45$.

В результате многочисленных исследований установлено, что колебания кузова автомобилей, в основном, происходят с затуханием, при котором ψ = 0,15 – 0,30 [23, 26, 27, 32]. При таких значениях коэффициента ψ обеспечивается наилучшая плавность хода.

Затухание, пропорциональное скорости колебаний, обладает особенностью, заключающейся в том, что уже небольшое сопротивление вызывает быстрое затухание. При ψ = 0,15 – 0,25 даже значительные размахи колебаний кузова ($z \le 100$ мм) уменьшатся до практически приемлемых пределов ($z \le 20$ мм) через один – полтора периода, т.е. достаточно быстро. При дальнейшем увеличении затухания отклонения при колебаниях уменьшаются медленнее (рисунок 1.2) [26].

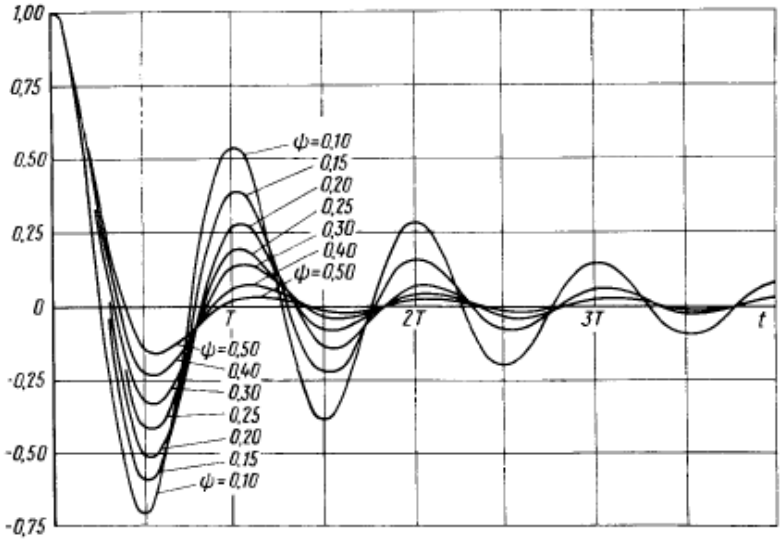


Рисунок 1.2 – Кривые свободных колебаний при различной величине затухания

Свободные колебания, затухающие при совместном действии сил жидкостного и сухого трения, описываются следующей системой уравнений [23, 26, 28, 33]:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + 2k(\dot{z} - \dot{\zeta}) + 2c_p(z - \zeta) \pm F = 0, \\ m\ddot{\zeta} - 2k(\dot{z} - \dot{\zeta}) - 2c_p(z - \zeta) + 2c_ш\zeta \mp F = 0, \end{cases} \quad (1.9)$$

где F – динамическая сила сухого трения подвески, Н.

Направление силы сухого трения в процессе колебаний различно и всегда противоположно направлению движения подрессоренной массы.

Если колебания передней и задней частей кузова связаны, то свободные затухающие колебания будут описываться более сложной системой дифференциальных уравнений.

В процессе движения по дорожным неровностям транспортное средство может совершать не только свободные, но и вынужденные колебания, происходящие под действием периодической возмущающей силы. Установившиеся вынужденные колебания происходят с частотой f, $с^{-1}$, возмущающей силы, которая не зависит от наличия амортизатора и его характеристик [23, 33]:

$$f = \frac{2\pi v}{3{,}6l}, \qquad (1.10)$$

где v – скорость автомобиля, м/с;

l – длина неровностей дороги, м.

Амплитуда установившихся колебаний подрессоренной массы зависит от соотношения между частотами ω_0 и f.

Масса перевозимого груза оказывает существенное влияние на плавность хода транспортного средства, так как при ее изменении меняются такие параметры, как нагрузка на оси, подрессоренная масса автомобиля и положение ее центра тяжести.

При эксплуатации грузовых автомобилей влияние переменной нагрузки на динамические характеристики подвесок проявляется особенно отчётливо. Поскольку нагрузка на заднюю ось варьируется в широких пределах, а на переднюю – остается практически стабильной, возникает значительный дисбаланс в парциальных частотах колебаний подвесок, который заметно ухудшает плавность хода грузового транспортного средства.

Основной причиной колебаний АТС являются дорожные неровности.

Вид и очертания неровностей зависят от типа дороги и состояния ее покрытия. При проезде автомобилем через одиночные неровности возникают

свободные колебания, а чередующиеся неровности вызывают вынужденные колебания транспортного средства. При продолжительном движении ТС по неровной дороге возникающие колебания заметно снижают плавность хода, эффект усиливается по мере роста скорости и частоты вибраций.

Рабочий процесс подвески автомобиля представляет собой случайные колебания, вызванные случайным характером воздействия дорожных неровностей [27].

Для исследования колебаний транспортного средства и расчета подвески обычно используют теорию стационарных случайных процессов. Хотя режим работы подвески не является стационарным из-за неоднородности микропрофиля различных участков дороги и изменений скорости движения автомобиля, при испытаниях можно выбрать участки требуемой протяженности, на которых процесс с достаточным приближением может считаться стационарным.

Согласно теории стационарных случайных функций статистические характеристики считаются известными, если известна корреляционная функция или спектральная плотность.

Вопросами исследования статистических свойств микропрофиля основных типов дорог в 60-70 годах прошлого века занимались Я. М. Певзнер, И. Г. Пархиловский, А. А. Тихонов, А. А. Силаев, Р. В. Ротенберг, А. А. Хачатуров [26, 27, 28, 29, 34, 35].

Анализ данных, полученных в ходе исследований дорожного микропрофиля, позволяет считать его случайной, стационарной, эргодической функцией $q(x)$ высот (ординат) q микронеровностей от путевой координаты x. Статистическое распределение ординат микропрофиля, как правило, описывается законом Гаусса [27, 36].

Методика реализации случайного микропрофиля дороги сводится к определению корреляционной функции или спектральной плотности.

Корреляционная функция дает представление об изменении микропрофиля по длине участка дороги. Чтобы охарактеризовать случайный микропрофиль дороги чаще всего используют следующие выражения корреляционных функций [31, 34]:

$$R(x)=\sigma^2 e^{-\alpha_1|x|}, \tag{1.11}$$

$$R(x)=\sigma^2 e^{-\alpha_2|x|}\cos\beta_1 x, \tag{1.12}$$

$$R(x)=\sigma^2(A_1 e^{-\alpha_3|x|}+A_2 e^{-\alpha_4|x|}\cos\beta_2 x), \tag{1.13}$$

где σ^2 – дисперсия $q(x)$, м^2;

$\alpha_1,\ldots,\alpha_4$, β_1, β_2 – параметры, м$^{-1}$;

A_1, A_2 – весовые коэффициенты, причем $A_1 + A_2 = 1$.

Числовые значения параметров для некоторых типов дорог представлены в таблице 1.1 [31].

Т а б л и ц а 1 . 1 – Параметры корреляционных функций микропрофилей автомобильных дорог

Дорожная поверхность	σ, м	A_1	A_2	$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3$, м$^{-1}$	α_4, м$^{-1}$	$\beta_1=\beta_2$, м$^{-1}$
Цементобетонная	0,005 -0,012	1	0	0,15	0	0
Асфальтированная	0,008 -0,012	0,85	0,15	0,20	0,05	0,60
Разбитая грунтовая дорога	0,100 -0,140	0,55	0,45	0,085	0,08	0,235

Спектральная плотность характеризует распределение дисперсий случайного процесса по частоте. Применительно к анализу микропрофиля дорожного покрытия она дает представление о частоте повторения длин неровностей. Спектральная плотность выражается зависимостью плотности дисперсии от путевой частоты θ, м$^{-1}$, определяемой формулой [36]:

$$\theta=\frac{2\pi}{l}, \tag{1.14}$$

где l –длина неровности, м.

Корреляционная функция и спектральная плотность взаимосвязаны преобразованием Фурье [36]:

$$R(x)=2\int_0^\infty S(\theta)\cos\theta x d\theta, \tag{1.15}$$

$$S(\theta)=\frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}R(x)\cos\theta x dx\,. \tag{1.16}$$

Формулы для вычисления спектральных плотностей, соответствующих корреляционным функциям (1.11) – (1.13), имеют вид [31, 34]:

$$S(\theta)=\frac{2\sigma^2\alpha_1}{\alpha_1^2+\theta^2}, \tag{1.17}$$

$$S(\theta)=2\sigma^2\alpha_2\frac{\alpha_2^2+\beta_1^2+\theta^2}{(\theta^2+\alpha_2^2-\beta_1^2)^2+4\alpha_2^2\theta^2}, \tag{1.18}$$

$$S(\theta)=2\sigma^2\left(\frac{A_1\alpha_3}{\alpha_3^2+\theta^2}+A_2\alpha_4\frac{\alpha_4^2+\beta_2^2+\theta^2}{(\theta^2+\alpha_4^2-\beta_2^2)^2+4\alpha_4^2\theta^2}\right). \tag{1.19}$$

Таким образом, анализ показал, что существенное влияние на плавность хода АТС оказывают колебания, вызванные случайным характером микропрофиля дороги, а также масса перевозимого груза, особенно у грузовых автомобилей.

Колебания, возникающие вследствие дорожных неровностей, ухудшают плавность хода автомобиля, кроме того, снижают среднюю скорость движения, межремонтный пробег, а также приводят к повышению расхода топлива и затрат на перевозки, техническое обслуживание и ремонт АТ.

Наилучшую оценку гашения колебаний в подвеске дает относительный коэффициент затухания ψ. При значениях ψ = 0,15 – 0,30 обеспечивается лучшая плавность хода.

1.2 Требования, предъявляемые к характеристикам амортизаторов автомобильной техники

Амортизаторы преобразуют механическую энергию колебаний в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающую среду. Они предназначены для демпфирования колебаний кузова и колес автомобиля и способствуют повышению безопасности движения транспортного средства.

В конструкции ходовой части большинства современных АТС используются гидравлические телескопические амортизаторы. Их функционирование обеспечивается за счет вязкого трения рабочей жидкости, перетекающей между камерами цилиндра через систему дроссельных отверстий и клапанов сжатия и отбоя. Рабочее давление гидравлических амортизаторов составляет 3 – 7,5 Мпа, скорость перетекания жидкости – 20 – 30 м/с. При работе они могут нагреваться до 160°С и выше [23]. Их конструкция и принцип действия подробно описаны в специальной литературе [23, 24, 37 – 41].

Телескопический амортизатор состоит из герметичного цилиндра, заполненного жидкостью, внутри которого перемещается поршень, соединенный со штоком. Эффективность действия амортизатора пропорциональна скорости движения поршня в цилиндре.

Двухтрубные амортизаторы применяются шире однотрубных из-за простоты конструкции и эксплуатации, низкой стоимости изготовления, небольшой длины, лучшей устойчивости к механическим повреждениям. К недостаткам данных амортизаторов следует отнести их сильный нагрев, обусловленный недостаточно эффективным охлаждением амортизаторной жидкости, а также высокую вероятность вспенивания масла при длительной работе. Указанные недостатки ухудшают работоспособность и срок службы двухтрубных амортизаторов.

Однотрубные амортизаторы позволяют в значительной мере устранить данные недостатки, допуская монтаж в любой пространственной ориентации. Газонаполненные амортизаторы высокого давления способствуют повышению плавности хода за счет оптимизации условий эксплуатации рабочей жидкости. Вместе с тем, к их конструктивным особенностям относятся увеличенные габариты, высокая стоимость, а также повышенные требования к точности производства и качеству уплотнительных элементов.

Наиболее частая неисправность гидравлического амортизатора – нарушение герметичности уплотнительного сальника штока. Это происходит в случае повреждения пыльника амортизатора, и, как следствие, попадания грязи на

поверхность штока. Повреждение сальника штока ведет к утечке газа и амортизаторной жидкости, из-за чего сам амортизатор утрачивает свои демпфирующие свойства [39, 40, 41].

Характеристика телескопического амортизатора выражает зависимость его силы сопротивления от скорости перемещения поршня относительно стенок цилиндра. Обычно эта зависимость нелинейная, она изображается графически в координатах $F_c - v_n$ (сила сопротивления амортизатора – скорость поршня).

Характеристики гидравлических амортизаторов подробно исследованы А. Д. Дербаремдикером [38]. Он выделяет начальный участок характеристики, соответствующий течению жидкости через дроссельные отверстия, и клапанный участок, который соответствует работе клапанов сжатия и отбоя.

Сила сопротивления амортизатора F_c, Н, определяется формулой [38]:

$$F_c = k v_n^m, \tag{1.20}$$

где k – коэффициент сопротивления амортизатора, Н·с/м;

v_n – скорость перемещения поршня, м/с;

m – показатель степени, зависящий от конструкции и режима работы дроссельной и клапанной систем амортизатора.

Прогрессивный характер амортизаторной характеристики, для которой $m>1$, как правило, достигается за счет дросселирования рабочей жидкости через отверстия с неизменным сечением, расположенными в поршне или корпусе, или через зазор между поршнем и стенками цилиндра. Этот режим работы амортизатора называется дроссельным.

Для получения регрессивной характеристики ($m<1$) используются клапаны, пропускная способность которых возрастает по мере увеличения давления жидкости. Это клапанный режим работы амортизатора [38, 39].

Амортизаторы, имеющие регрессивную характеристику, эффективно минимизируют продольные и поперечные крены кузова при маневрировании и экстренном торможении. Их преимущество заключается в защите узлов подвески и точек крепления от критических пиковых нагрузок за счет снижения демпфирующего усилия при высоких скоростях перемещения поршня. Однако

данные амортизаторы обладают низкой чувствительностью к незначительным дорожным дефектам.

В свою очередь, амортизаторы с прогрессивной характеристикой обеспечивают достаточно хорошую плавность хода на мелких дорожных неровностях и надежный контакт колес с покрытием при езде по пересеченной местности. Тем не менее, на высоких скоростях они склонны к чрезмерному сопротивлению, что может привести к «заклиниванию» устройства и повышенному износу опорных креплений. Также они менее эффективно противодействуют раскачке кузова [39, 40].

В современных амортизаторах часто используют комбинированный тип характеристик – прогрессивно-регрессивный, который достигается за счет комбинации методов перепуска рабочей жидкости. Это позволяет плавно переключаться между дроссельным и клапанным режимами. Можно получить и практически линейную (m=1) характеристику. Такой подход гарантирует стабильность амортизации в штатных условиях и исключает риск блокировки при интенсивных нагрузках [38, 39, 42].

Для инженерных расчетов характеристики амортизаторов удобно представлять в линеаризованном виде из четырех линейных участков [38, 39, 42] (рисунок 1.3).

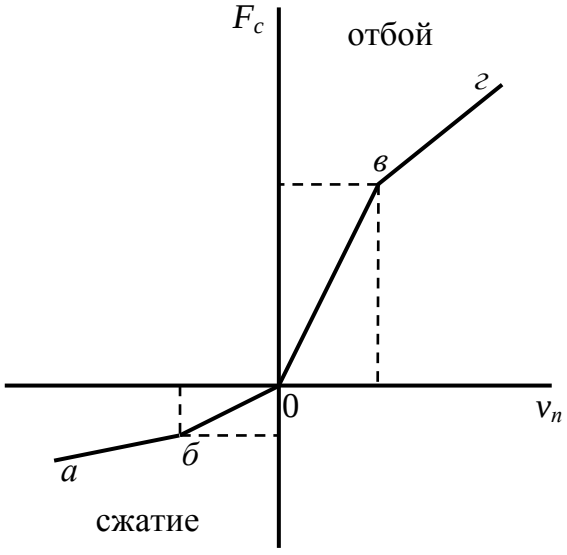


Рисунок 1.3 – Характеристика автомобильного амортизатора

Участки *0б* и *0в* соответствуют дроссельным режимам сжатия и отбоя, а участки *ба* и *вг* – клапанным режимам. Точки *б* и *в* соответствуют моментам открытия клапанов сжатия и отбоя. У современных амортизаторов открытие клапанов происходит при относительных скоростях перемещения поршня 0,3 – 0,5 м/с [23, 39, 40].

На практике рабочая характеристика амортизатора отклоняется от идеализированной модели. Она является нелинейной. Из-за конструктивных особенностей креплений, инерционности деталей и физико-химических процессов в рабочей жидкости кривые прямого и обратного хода не совпадают. В результате формируется петля гистерезиса, отражающая реальное поведение демпфирующего устройства.

Согласно ГОСТ 34339-2017 [43] характеристику амортизатора строят по рабочим диаграммам, записанным на ходах поршня.

Современная инженерная практика проектирования автомобильных амортизаторов базируется на принципе несимметричности характеристик сжатия и отбоя. Оптимальным считается соотношение усилий сопротивления, при котором отбой в 2–5 раз превышает сжатие. Для отечественных грузовых автомобилей коэффициенты сопротивления амортизаторов определяются следующими диапазонами: $k_{сж}$ = 1,8 – 2,9 кН·с/м, $k_{от}$ = 4,6 – 11,0 кН·с/м [39].

Степень этой несимметричности варьируется в зависимости от условий эксплуатации транспортного средства, массы неподрессоренных частей и уровня внутреннего трения в подвеске. Поэтому для легковых автомобилей рекомендуемая степень несимметричности ниже, чем для грузовых. Техническая реализация данных характеристик осуществляется за счет подбора геометрии дроссельных каналов и изменения упругих свойств клапанных механизмов.

Характеристики амортизаторов некоторых отечественных и зарубежных производителей показаны на рисунке 1.4 [44].

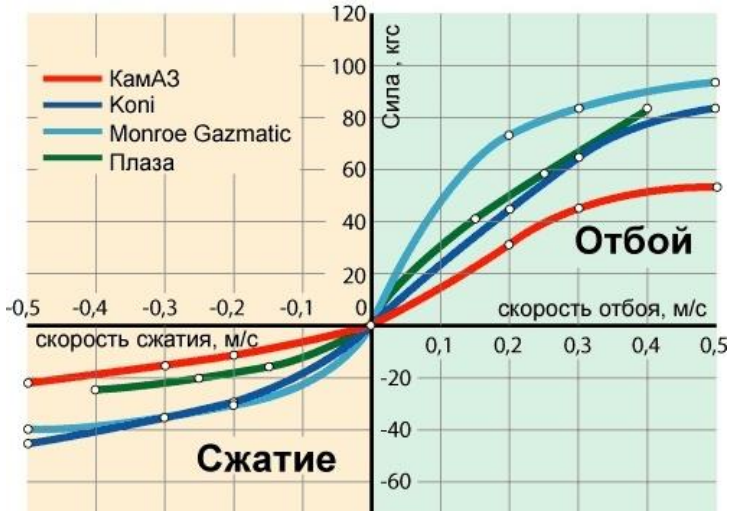


Рисунок 1.4 – Характеристики амортизаторов КамАЗ, Плаза, Koni, Monroe

Таким образом, из вышеизложенного следует, что реализация предъявляемых к амортизаторной характеристике требований без применения автоматического регулирования возможна только на основе компромиссных решений.

1.3 Современные подходы к разработке подвесок с электронным управлением и рекуперативных электромагнитных амортизаторов

Конструкторы автомобильных амортизаторов достаточно давно заинтересовались возможностью изменения характеристик амортизатора в зависимости от условий движения.

К началу 80-х годов XX века инженеры представили амортизаторы, снабженные выносной камерой. В такой конструкции рабочая полость сообщается с дополнительной камерой через специальный канал с клапаном, вращая его, водитель имеет возможность корректирования степени жесткости подвески.

Позже появились трехтрубные системы, где одна рабочая камера дополнялась двумя компенсационными. Регулировка в них также осуществлялась через клапан [45]. Несмотря на функциональность, они оказались неудобными для повседневного использования, так как чтобы изменить настройки, водителю приходилось останавливаться и вручную регулировать каждый амортизатор. Поэтому для серийных автомобилей такие амортизаторы не подошли.

Более совершенными стали байпасные системы. В них жидкость циркулирует по внешним магистралям, оснащенным клапанами, что позволяет независимо настраивать параметры сжатия и отбоя амортизатора.

В свою очередь, койловеры – это комплексные узлы, где пружина установлена непосредственно на амортизаторе. Такая компоновка дает возможность менять не только упругость подвески, но и дорожный просвет автомобиля [45].

Сегодня главная цель конструкторов – обеспечить возможность управления параметрами подвески непосредственно из салона автомобиля, без необходимости покидать водительское кресло.

Развитие электроники и микропроцессорной техники привело к широкому внедрению ее на автомобилях, к созданию электронных систем автоматического управления (ЭСАУ) агрегатами автомобилей. Электронные управляющие системы способствуют повышению надежности, эргономичности и безопасности автомобильной техники [46, 47, 48].

Электронное управление подвеской позволяет автоматически или с возможностью ручного выбора параметров подвески адаптировать её характеристики под дорожные условия, скорость движения, стиль вождения и другие факторы. Такие системы повышают управляемость, комфорт и безопасность движения. Внедрение ЭСАУ на АТ очень перспективно.

Основные компоненты системы электронного управления подвеской показаны на рисунке 1.5 [46].

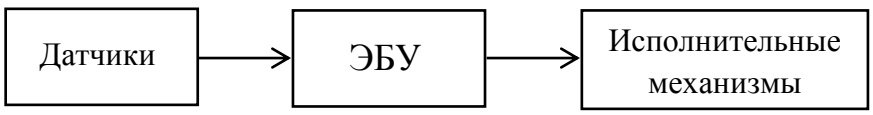


Рисунок 1.5 – Электронная система управления подвеской

Датчики измеряют скорость движения, продольные и вертикальные ускорения кузова, собирают информацию о положении рулевого колеса, интенсивности торможения, неровностях дороги, кренах и других показателях.

Электронный блок управления (ЭБУ) анализирует данные от датчиков, обрабатывает их и принимает решения о корректировке параметров подвески.

Исполнительные механизмы изменяют характеристики подвески в зависимости от сигналов от ЭБУ.

Таким образом, перспективным направлением в проектировании подвесок является разработка амортизаторов с изменяемыми характеристиками. Такие системы, оснащенные электронным управлением, позволяют оперативно корректировать параметры жесткости в зависимости от дорожных условий или выбранного стиля вождения. Изменение рабочих параметров происходит либо в автоматическом режиме на основе данных от ЭБУ, либо путем ручного выбора настроек пользователем.

На сегодняшний день в автомобилестроении лидируют два основных способа сделать амортизаторы регулируемыми: использование электромагнитных клапанов или применение особых магнитореологических жидкостей.

Ярким примером первого подхода являются трехтрубные амортизаторы Monroe. В их конструкции предусмотрен дополнительный контур, через который рабочая жидкость перемещается в отдельный резервуар, оснащенный электромагнитным клапаном. Регулировка демпфирующих свойств происходит за счет изменения силы тока в катушке клапана, что позволяет корректировать жесткость системы всего за 0,01 с [49]. Подобные системы могут функционировать в двух форматах: как ручные (выбор режима водителем) или как адаптивные, где коэффициент сопротивления амортизаторов меняется автоматически в режиме реального времени в зависимости от дорожной ситуации.

Инновационная система Magnetic Ride Control (MRC), разработанная компанией Delphi, базируется на применении «умной» магнитореологической жидкости внутри демпфирующих устройств. В состав этой жидкости входят магнитные наночастицы, а конструкция поршня дополнена электромагнитом. Управление процессом осуществляется через специальный блок, передающий сигнал по проводке, интегрированной в шток. При активации электромагнитного

поля вязкость рабочей среды мгновенно меняется, что позволяет скорректировать жесткость подвески всего за 10 миллисекунд [49, 50, 51].

Среди положительных сторон системы MRC следует отметить высокую скорость и достаточную плавность изменения характеристик амортизатора, а также низкую шумность работы. Основным недостатком является высокая стоимость системы. Также остаются проблемы, связанные со стабильностью свойств магнитореологической жидкости при разных температурах и сроком ее службы.

CDC (Continuous Damping Control) – система переменной жесткости компании Sachs, которая специализируется на производстве амортизаторов для грузовых транспортных средств. Амортизаторы CDC используют электромагнитный клапан для оперативного изменения проходного сечения масляных каналов. Электронный блок управления непрерывно анализирует сигналы, поступающие от комплекса датчиков. С интервалом в 0,02 секунды контроллер вычисляет оптимальные параметры демпфирования и подает на клапан электрический ток определенной силы. Благодаря такой схеме обеспечивается динамическое изменение коэффициента демпфирования амортизатора, и подвеска мгновенно подстраивается под текущие дорожные условия [52].

Toyota предложила технологию TEMS (Toyota Electronically Modulated Suspension) для плавной автоматической регулировки параметров подвески. Принцип работы системы заключается в использовании специального механизма на штоке амортизатора, который управляется контроллером. ЭБУ переключает потоки рабочей жидкости через внутренние каналы с разной пропускной способностью, тем самым меняя демпфирующие свойства подвески. Несмотря на комфорт, обеспечиваемый системой TEMS, она не лишена недостатков. Это ограниченный срок службы, высокая сложность устройства, необходимость частого и дорогостоящего обслуживания [49].

Инженеры компании Koni разработали адаптивную гидромеханическую систему, использующую частотно-зависимый клапан. При движении по

грунтовым и разбитым дорогам клапан открывается, снижая сопротивление амортизатора и повышая плавность хода. В штатных режимах система сохраняет высокую жесткость, эффективно подавляя крены кузова и обеспечивая стабильность автомобиля на качественном дорожном покрытии [49].

Регулировка рабочих параметров амортизаторов Rancho осуществляется путем изменения уровня давления в системе, которое обеспечивается внешним компрессором. Система работает за счет подачи сжатого воздуха от компрессора через пневмолинии к клапанам, установленным в нижней части каждого амортизатора. Амортизаторы Rancho позволяют водителю самостоятельно настраивать жесткость подвески прямо из салона [49, 52].

Среди отечественных разработок можно отметить адаптивный магнитореологический амортизатор с регулируемой жесткостью Круглова С. П., Заковырина И. А. [20], регулируемый однотрубный газонаполненный амортизатор Гусева Е. П. [53] (ЗАО "Плаза"), в котором за счет индуктивного датчика на байпасе при изменении режима движения меняется жесткость амортизатора. Похожий управляемый амортизатор запатентовали Дюсов В. В. и Павлов Г. А. [21]. Также следует упомянуть таких исследователей, как Новиков В. В., Рябов И. М., предложивших саморегулируемый гидравлический амортизатор [17, 18, 19].

В течение последних лет появилось много разработок рекуперативных подвесок, принцип действия которых заключается в рекуперации энергии от работы подвески с последующим ее возвращением в систему электроснабжения транспортного средства.

Внедрение подобных систем способствует существенному росту топливной эффективности. Согласно оценкам, использование рекуперативных амортизаторов позволит сократить потребление топлива на 10% [52, 54].

Рекуперативные подвески разделяют на два основных типа: механические и электромагнитные.

Механические подвески с рекуперативным эффектом представляют собой модифицированные гидравлические системы. Их широкое применение

ограничено из-за ряда недостатков: сложности и большого веса конструкции, а также уязвимости гидравлических шлангов к повреждениям.

Принцип действия электромагнитной рекуперативной подвески основан на преобразовании энергии колебательного процесса в электрическую энергию. Данный подход считается более перспективным, так как он обеспечивает компактность, высокую производительность и удобство интеграции в общую энергосистему транспортного средства. В последние годы к электромагнитной подвеске приковано всеобщее внимание, многие ученые и инженеры предлагают свои разработки и технические решения [4, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 54 – 58].

Основой электромагнитной рекуперативной подвески A. Bose является линейный электродвигатель (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Электромагнитная подвеска A. Bose

Ключевым элементом конструкции выступает шток, оснащенный магнитным сердечником, который взаимодействует с магнитным полем, генерируемым линейным электродвигателем. Регулировка характеристик подвески осуществляется путем изменения параметров этого поля. Управляет процессом электронный контроллер, обрабатывающий сигналы, поступающие с сети автомобильных датчиков [6].

Электромагнитная подвеска A. Bose обладает рядом преимуществ. Во-первых, за счет сокращения числа механических узлов достигается высокая долговечность и компактность системы. Во-вторых, быстродействие системы, поскольку из-за отсутствия трения перемещение штока происходит очень быстро.

В-третьих, в системе предусмотрена возможность автоматического регулирования характеристик подвески.

Из недостатков подвески Bose следует отметить ее сложность и высокую стоимость, а также недостаточную разработанность специального программного обеспечения для управления подвеской. Кроме этого, работа электромагнитов требует значительных затрат электроэнергии.

Группа исследователей из Университета Стони-Брук, возглавляемая профессором L. Zuo, предложила инновационный рекуперативный амортизатор [4, 55]. Конструкция представляет собой магнитный сердечник, состоящий из ряда колец, который перемещается внутри цилиндрической катушки (рисунок 1.7).

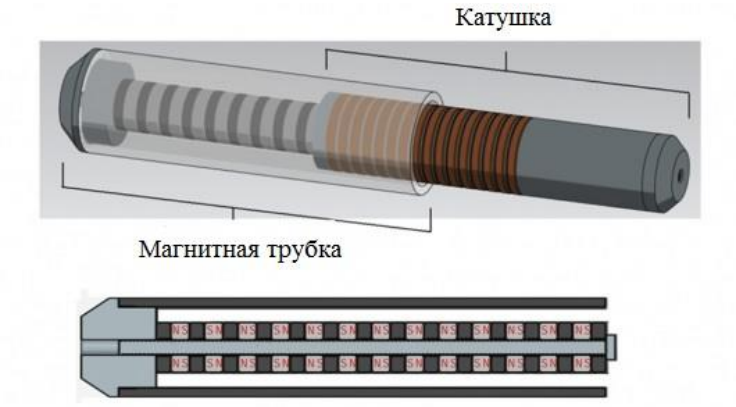


Рисунок 1.7 – Магнитный амортизатор-генератор

Выбранная геометрия позволяет максимизировать магнитный поток. В процессе эксплуатации транспортного средства колебания подвески преобразуются в относительное движение элементов амортизатора, что приводит к выработке электричества. Полученная энергия аккумулируется в батареях автомобиля. Амортизатор будет работать более эффективно при улучшении магнитной системы и модернизации схемы управления.

Специалисты Levant Power Corporation разработали инновационную подвеску GenShock, которая преобразует энергию колебаний в электричество. В ней используется комбинация гидравлической системы привода и электродвигателя. Система базируется на активных амортизаторах с регулируемым давлением, которые подстраиваются под дорожные условия с

помощью системы клапанов. В конструкцию каждого амортизатора интегрированы электронный контроллер, насос и электромотор (рисунок 1.8).

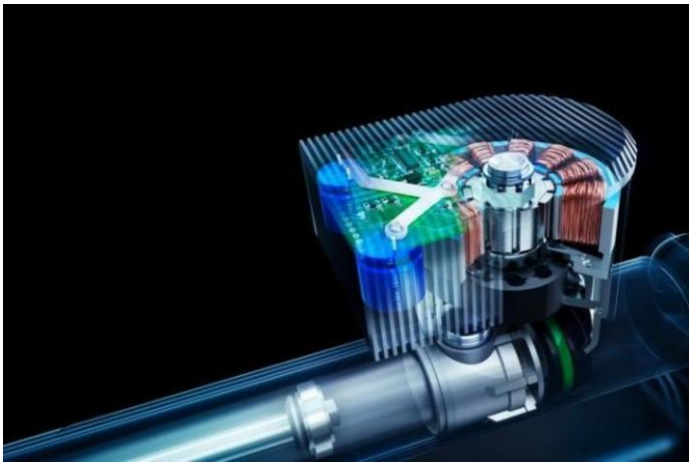


Рисунок 1.8 – Рекуперативная подвеска GenShock

При движении по неровностям или в моменты торможения избыточная кинетическая энергия заставляет жидкость циркулировать, вращая насос и сопряженный с ним электродвигатель. В результате вырабатывается электрический ток.

По данным разработчиков, внедрение системы GenShock повышает топливную эффективность специальной военной техники на 6% и делает ход ТС более плавным, способствуя комфортному передвижению [7, 54].

Электромагнитные амортизаторы различных конструкций, в том числе с рекуперативным эффектом, разрабатываются и в нашей стране, можно отметить разработки Е. П. Гусева [9], В. С. Григорчука [10], В. В. Миханошина [2], В. И. Посметьева [8, 59], А. Н. Сергиенко [3, 60] и других [61, 62, 63, 64].

Технологичность магнитных амортизаторов проявляется в их исключительной надежности, продолжительном сроке службы и способности динамически подстраиваться под текущие дорожные условия и режим движения автомобиля.

Одним из существенных недостатков рассмотренных электромагнитных амортизаторов является недостаточная разработка эффективных электронных управляющих систем.

1.4 Анализ проблем, возникающих при демпфировании колебаний радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на транспортных средствах

На современном этапе развития техники радиоэлектронная аппаратура является неотъемлемой частью систем связи, навигации, управления и других систем. При размещении на транспортных средствах такая аппаратура неизбежно испытывает влияние внешних механических факторов: вибрационных нагрузок, ударных воздействий, ускорений и акустических шумов. Данные нагрузки воздействуют на РЭА как в процессе функционирования на мобильных комплексах, так и во время ее перевозки.

Среди всего спектра механических воздействий наиболее критичными и часто встречающимися являются вибрация и удар.

Теоретические основы виброзащиты РЭА были заложены в трудах таких исследователей, как Ю. А. Суровцев, В. С. Ильинский, М. Ф. Токарев, Е. Н. Маквецов и др. [65, 66, 67, 68].

Вибрация РЭА представляет собой колебательные процессы в элементах конструкции, которые оцениваются по трем основным показателям: виброперемещению, виброскорости и виброускорению.

При гармонической вибрации виброперемещение определяется уравнением [65]:

$$z(t) = A\sin\omega t, \tag{1.21}$$

где A – амплитуда виброперемещения, м;

ω – частота вибраций, $с^{-1}$.

Виброскорость и виброускорение находятся как первая и вторая производные уравнения (1.21) соответственно:

$$\dot{z}(t) = \omega A\cos\omega t, \tag{1.22}$$

$$\ddot{z}(t) = -\omega^2 A\sin\omega t. \tag{1.23}$$

Бортовая РЭА, устанавливаемая на военной автомобильной технике, эксплуатируется в условиях постоянного действия вибраций и ударных нагрузок

(стрельба из бортового оружия, удары снарядов о броню, движение по пересеченной местности). Очевидно, что стабильность функционирования аппаратуры ухудшается под влиянием механических воздействий, поэтому необходимо применять меры по её вибро- и ударозащите.

В соответствии с ГОСТ 16962-71 [69] радиоэлектронная аппаратура должна удовлетворять определенным требованиям виброустойчивости, вибропрочности, удароустойчивости, ударопрочности.

Существуют три основных способа обеспечения виброустойчивости и вибропрочности РЭА [65, 66, 67, 68]: применение специальных материалов, поглощающих вибрации; использование демпферов для виброизоляции аппаратуры; придание конструкции необходимой жесткости.

Хотя многие радиодетали способны выдерживать высокочастотную вибрацию при условии жесткой фиксации конструкции, этого не всегда достаточно для обеспечения стабильной работы электроники. Для решения данной проблемы используют амортизаторы, которые выступают связующим звеном между прибором и вибрирующей поверхностью.

Суть виброизоляции заключается в минимизации воздействия внешних колебаний на блок аппаратуры. Ключевым компонентом такой виброзащитной системы выступает амортизатор, сочетающий в себе упругие и демпфирующие свойства. В качестве упругих элементов могут использоваться стальные пружины, полимерные или резиновые вставки, а также конструкции из металлорезины или тросовых материалов. При этом часть энергии вибрации поглощается и рассеивается в виде тепла. Данный процесс называют вибродемпфированием.

Современная инженерная практика предлагает широкий спектр конструкций амортизаторов РЭА, рассчитанных на самые разные эксплуатационные нагрузки.

Классификация этих амортизаторов основана на конструктивных особенностях упругого компонента и методе гашения колебаний. Выделяют несколько основных категорий демпфирующих устройств: амортизаторы на основе резинометаллических соединений, пружинные механизмы с

пневматическим или фрикционным демпфированием, цельнометаллические конструкции со структурным демпфированием, а также комбинированные пружинно-полимерные системы [65].

Резино-металлические амортизаторы являются наиболее ранними конструкциями, резиновый массив в них одновременно работает и как упругий элемент, и как демпфирующий. К их недостаткам следует отнести относительно узкий диапазон рабочих температур и ограниченный срок службы из-за старения резины и ослабления в процессе эксплуатации места привулканизации резины к металлу [65].

В пружинном амортизаторе с воздушным демпфированием типа АД в качестве упругого элемента выступает спиральная пружина *1*, заключенная в резиновый корпус *3* с калиброванным отверстием *2*, сквозь которое при работе амортизатора проходит воздух, возникающее при этом трение обеспечивает необходимое демпфирование (рисунок 1.9). Использование воздуха в демпфере ухудшает качество демпфирования при изменении климатических условий (температура, влажность, давление и т.д.) [65].



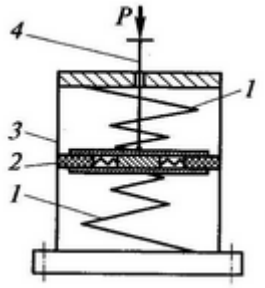
1 – пружина; 2 – калиброванное отверстие; 3 – резиновый корпус

Рисунок 1.9– Пружинный амортизатор с воздушным демпфированием типа АД

В пружинных амортизаторах с фрикционным демпфированием типа АФД, АПН, АПНМ (рисунок 1.10) упругий элемент состоит из двух конических пружин *1*.

Демпфирование осуществляется за счет сил сухого трения между корпусом *3* и подпружиненной пластмассовой диафрагмой *2*, связанной со штоком *4*, на который опирается защищаемое изделие.





1 – конические пружины; 2 – диафрагма; 3 – корпус; 4 – шток;

Рисунок 1.10 – Пружинный амортизатор с фрикционным демпфированием типа АПН

Амортизатор имеет хорошие эксплуатационные характеристики, однако для такого амортизатора существует критическая амплитуда возбуждения, при превышении которой быстро возникает резонанс, к тому же при малых амплитудах колебаний амортизатор не обеспечивает виброзащиты, так как для начала движения диафрагме необходимо преодолеть силу трения [65].

В цельнометаллических амортизаторах типа АЦП упругость обеспечивается плоскими стальными пружинами, тросами или структурными элементами из проволоки (рисунок 1.11). К достоинствам большинства металлических структур относится возможность их использования при больших нагрузках, а также в условиях высоких и низких температур. Недостатком является значительно меньший, чем у других амортизаторов, диапазон относительных упругих деформаций [65].



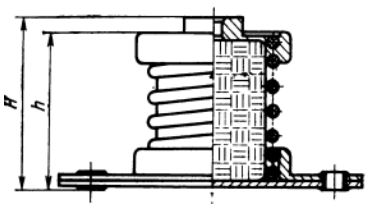


Рисунок 1.11– Цельнометаллический демпфер типа АЦП

Пружинно-полимерные амортизаторы типа АПП отличаются от амортизаторов типа АЦП материалом подушки, в качестве которого в них используют полимерные материалы.

Существенной проблемой при демпфировании колебаний РЭА является противоречивость требований к амортизаторам: для эффективной виброизоляции требуется низкая жесткость демпфирующего элемента, тогда как для предотвращения пробоя при ударных нагрузках необходима высокая жесткость. Разрешить данное конструктивное противоречие позволяет комбинированная схема из двух демпфирующих узлов в одном устройстве: мягкого, отвечающего за гашение вибраций, и жесткого, обеспечивающего защиту от интенсивных ударов.

Другим вариантом решения данной проблемы является применение систем активной виброзащиты [11, 70, 71]. В управляемом устройстве гашения колебаний [11] жесткость упругого элемента изменяется за счет подачи на соленоид тока различной силы, что позволяет при подключении устройства к системе управления обеспечить управляемое гашение колебаний внешнего устройства. В изобретении [70] предлагается устройство с электромагнитом, повышающее эффективность виброзащиты путем автоматического регулирования жесткости упругого элемента.

Одним из перспективных направлений развития систем активной виброзащиты является применение магнитных амортизаторов, которое позволит осуществлять активное демпфирование колебаний, способствуя тем самым повышению виброустойчивости РЭА.

1.5 Выводы по первой главе

1. Проведен анализ факторов, влияющих на плавность хода автомобиля, который показал, что колебания, вызванные случайным характером микропрофиля дороги, а также масса перевозимого груза, особенно у грузовых автомобилей, оказывают существенное влияние на плавность хода АТС. Наилучшую оценку гашения колебаний в подвеске дает относительный коэффициент затухания ψ.

2. Приведены требования, предъявляемые к характеристикам амортизаторов автомобильной техники. Показано, что для демпфирования колебаний в

подвесках современной АТ применяются, в основном, телескопические гидравлические амортизаторы, характеристики которых хорошо исследованы, имеют дроссельный и клапанный режимы работы и несимметричны при ходах сжатия и отбоя.

3. Рассмотрены конструкции амортизаторов, предназначенных для гашения колебаний радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на транспортных средствах, проанализированы проблемы, возникающие при демпфировании колебаний РЭА.

4. Выявлено, что и амортизаторы АТ, и амортизаторы РЭА являются нерегулируемыми и преобразуют механическую энергию колебаний в тепловую с последующим ее рассеиванием в окружающую среду. Недостатки амортизаторов могут быть устранены применением адаптивных систем демпфирования колебаний.

5. Проанализированы современные подходы к разработке электронно-управляемых подвесок, обладающих возможностью изменения характеристик амортизатора в зависимости от условий движения, и рекуперативных электромагнитных амортизаторов, принцип действия которых заключается в рекуперации энергии от работы подвески с последующим ее возвращением в систему электроснабжения транспортного средства.

6. Установлено, что применение электромагнитных амортизаторов позволяет осуществлять рекуперацию энергии и активное демпфирование колебаний. Указано, что значительным недостатком существующих электромагнитных амортизаторов является недостаточная разработка эффективных электронных управляющих систем.

7. На основании анализа современного состояния систем демпфирования колебаний определена цель дальнейшей работы – разработка адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, обладающей возможностью регулирования характеристик амортизатора в зависимости от условий эксплуатации с помощью средств современной электроники.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ

Целью настоящей главы является теоретическое обоснование построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески и разработка функциональных схем устройств, реализующих характеристики рекуперативного амортизатора с возможностью их автоматического регулирования.

2.1 Основы построения адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески

Как отмечалось в параграфе 1.1, автомобиль представляет собой колебательную систему, поведение которой определяется массами (подрессоренными и неподрессоренными), параметрами жесткости подвески и шин, коэффициентом демпфирования амортизаторов.

Быстрота гашения колебаний в автомобильной подвеске описывается через относительный коэффициент затухания ψ, известный также как коэффициент апериодичности и находящийся по формуле (1.3). Из выражения (1.3) следует, что на интенсивность затухания колебаний оказывает влияние не только сопротивление амортизаторов, но и соотношение жесткости подвески и подрессоренной массы ТС.

Коэффициент сопротивления амортизатора k рассчитывается при известных значениях жесткости упругого элемента подвески и подрессоренной массы, приходящейся на одно колесо. В параграфе 1.1 отмечено, что оптимальная величина относительного коэффициента затухания колебаний ψ должна быть в пределах от 0,15 до 0,30. При значениях ψ, лежащих в данном диапазоне, поглощение энергии за один период колебаний достигает 95%, что и соответствует требованиям к наилучшей плавности хода.

Сила сопротивления F_c на штоке амортизатора определяется формулой (1.20).

Типовая идеализированная характеристика автомобильного амортизатора представлена на рисунке 2.1.

Точка *C* пересечения прямых на графике соответствует моментам открытия перепускных клапанов при сжатии (отбое) амортизатора.

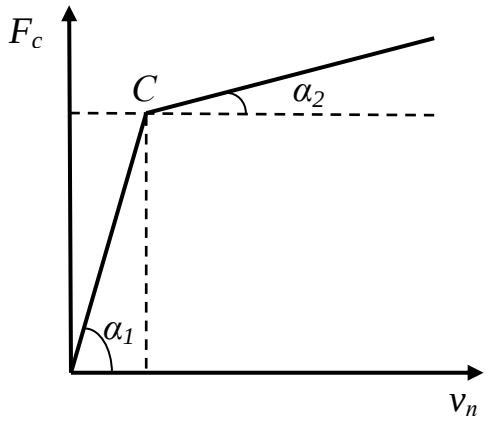


Рисунок 2.1 – Типовая характеристика амортизатора

Как отмечалось в параграфе 1.2, в современных амортизаторах срабатывание разгрузочных клапанов происходит при достижении поршнем скоростей 0,3 – 0,5 м/с. Кроме того, амортизаторные характеристики при сжатии и отбое должны быть разными: усилие на штоке при отбое закладывают в 2–5 раз больше, чем при сжатии, для эффективного поглощения кинетической энергии колебаний, выделяемой при отбое.

Коэффициент сопротивления амортизатора *k*, Н·с/м, определяет тангенс углов наклона α_1 и α_2 прямых на рисунке 2.1:

$$tg\alpha = k = \frac{F_c}{v_n}, \tag{2.1}$$

где F_c – сила сопротивления амортизатора, Н;

v_n – скорость движения поршня амортизатора, м/с.

Характеристики амортизатора при ходах сжатия и отбоя отличаются только углами α.

Из вышесказанного следует, что для того, чтобы рассчитать характеристику современного нерегулируемого амортизатора, нужно определить:

1) среднее значение коэффициента демпфирования на начальном участке;

2) скорость движения штока, при которой открываются клапаны сжатия и отбоя;

3) силы сопротивления, соответствующие срабатыванию разгрузочных клапанов.

Также необходимо заложить несимметричность характеристики на ходах отбоя и сжатия.

При разработке рекуперативного электромагнитного амортизатора с электронным управлением на первом этапе должны быть реализованы такие же требования к его характеристике.

Действие электромагнитного амортизатора-генератора основано на преобразовании механического линейного перемещения его поршня в электродвижущую силу, которая определяется конструкцией электромагнитного амортизатора, магнитным полем постоянного магнита и скоростью перемещения поршня. Таким преобразователем может служить генератор постоянного тока [6] или синхронный генератор [72]. Также можно использовать любое другое устройство, обеспечивающее данное преобразование, например магнитный амортизатор-генератор [73], за который автором совместно с коллективом ученых получен патент РФ на полезную модель.

Генератор вырабатывает ЭДС, прямо пропорциональную скорости движения штока амортизатора.

Механическая мощность амортизатора P, Вт:

$$P = F_c v_n . \tag{2.2}$$

Отбираемая от генератора электрическая мощность P, Вт рассчитывается по формуле:

$$P = \varepsilon I , \tag{2.3}$$

где ε – ЭДС индукции, В;

I – сила отдаваемого генератором в нагрузку электрического тока, А.

ЭДС индукции ε, возникающая в одном витке, прямо пропорциональна скорости перемещения поршня:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = k_1 v_n , \tag{2.4}$$

где Φ – магнитный поток, Вб;

k_1 – коэффициент пропорциональности.

Тогда выражение для электрической мощности можно записать в виде:

$$P = k_1 v_n I . \tag{2.5}$$

Из сравнения выражений для механической (2.2) и электрической (2.5) мощностей следует, что сила сопротивления F_c амортизатора пропорциональна силе тока [74]:

$$F_c \sim k_2 I , \tag{2.6}$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности.

Следовательно, регулируя силу тока, который отбирается от генератора-амортизатора, с помощью информационно-управляющей системы с использованием импульсных преобразователей параметров электрической энергии на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), можно изменять силу сопротивления амортизатора и получить автоматически управляемую адаптивную подвеску.

Отбираемый от электромагнитного амортизатора, содержащего поршень с постоянными магнитами, движущийся внутри секционной катушки из медной проволоки [73], электрический ток должен быть пропорционален величине ЭДС, т.е. скорости v_n движения поршня:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_н + R_к}\gamma = \frac{NSB\sigma}{(R_н + R_к)l}\gamma v_n , \tag{2.7}$$

где γ – коэффициент заполнения ШИМ-сигнала;

$R_н$ – сопротивление нагрузки, Ом;

$R_к$ – сопротивление катушки амортизатора, Ом;

N – число витков одной секции катушки амортизатора;

S – площадь поперечного сечения катушки, м^2;

B – индукция магнитного поля, Тл;

σ – коэффициент, учитывающий рассеяние магнитного потока;

l – длина одной секции катушки амортизатора, м.

Сила сопротивления электромагнитного амортизатора будет определяться выражением:

$$F_c = 2\pi rNIB = \frac{2\pi rN^2SB^2\sigma}{(R_н + R_к)l}\gamma v_п, \tag{2.8}$$

где r – радиус поперечного сечения катушки, м.

С учетом того, что $S = \pi r^2$ и $R_к << R_н$ выражение (2.8) примет вид:

$$F_c = \gamma \frac{2\pi^2 r^3 N^2 B^2 \sigma}{R_н l} v_п = \gamma D v_п, \tag{2.9}$$

где $D = \frac{2\pi^2 r^3 N^2 B^2 \sigma}{R_н l}$ – коэффициент, зависящий от конструкции управляемого электромагнитного амортизатора, Н·с/м.

Кинематическая схема автомобильной подвески, снабженной рекуперативным электромагнитным амортизатором с ИУС, показана на рисунке 2.2.

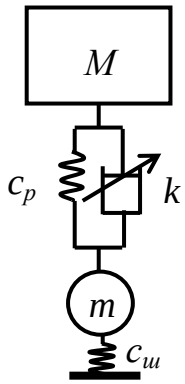


Рисунок 2.2 – Кинематическая схема автомобильной подвески с электромагнитным управляемым рекуперативным амортизатором

Здесь k – коэффициент демпфирования амортизатора, Н·с/м;

M и m – подрессоренная и неподрессоренная масса, кг;

$c_р$ и $c_ш$ – жесткость подвески и жесткость шины, Н/м.

Математическая модель затухающих колебаний подвески, снабженной амортизатором с адаптивной ИУС, описывается системой уравнений [75]:

$$\begin{cases} \ddot{z} + 2h_0\dot{z} + \omega_0^2 z - 2h_0\dot{\zeta} - \omega_0^2\zeta = 0, \\ \ddot{\zeta} + 2h_к\dot{\zeta} + \omega_к^2\zeta - 2h_к\dot{z} - \omega_к^2 z = 0, \end{cases} \quad (2.10)$$

где z и ζ – вертикальные перемещения подрессоренной M и неподрессоренной m масс соответственно, м;

$h_0 = \frac{k}{M} = \frac{\gamma D}{M}$, $h_к = \frac{k}{m} = \frac{\gamma D}{m}$ – коэффициенты сопротивления подвески, $с^{-1}$;

$\omega_0^2, \omega_к^2$ – парциальные частоты колебаний подрессоренной и неподрессоренной масс соответственно, определяемые соотношениями (1.6).

Регулируя коэффициент γ заполнения ШИМ-сигнала с помощью средств современной электроники, можно мгновенно, за время ~ 1 мс, изменять коэффициент сопротивления подвески h.

Таким образом, адаптивная электронная информационно-управляющая система демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной автомобильной подвески должна обладать следующими характерными свойствами.

Во-первых, ИУС должна обеспечивать получение требуемой амортизаторной характеристики путем регулирования отбираемого электрического тока в соответствии с выявленными закономерностями.

Во-вторых, в основе ИУС лежит принцип преобразования энергии механических колебаний в электроэнергию, с возможностью ее рекуперации. В ИУС планируется использование этой энергии, например, с целью заряда АКБ.

В-третьих, ИУС позволяет изменять характеристику амортизатора очень быстро (~ 1 мс) и, что немаловажно, автоматически.

Регулировать ток, отбираемый от обмотки электромагнитного амортизатора-генератора, планируется с помощью ИУС на основе импульсного преобразователя параметров электрической энергии.

Импульсные преобразователи являются согласующим звеном между нагрузкой и системой электроснабжения.

На рисунке 2.3 (а) представлена электрическая схема, описывающая принцип работы понижающего преобразователя [76, 77, 78, 79]. Когда устройство управления 2 открывает силовой ключ 1, электрический ток от входной цепи первичного источника электроэнергии заряжает катушку индуктивности L. При запирании ключа 1 энергия с катушки «сбрасывается» в конденсатор С.

Схема повышающего преобразователя напряжения [76, 78, 79] показана на рисунке 2.3 (б). Принцип его работы аналогичен понижающему преобразователю, но выходное напряжение оказывается выше входного. Выходное напряжение складывается из входного напряжения и напряжения, которое определяется переключением индуктивности.

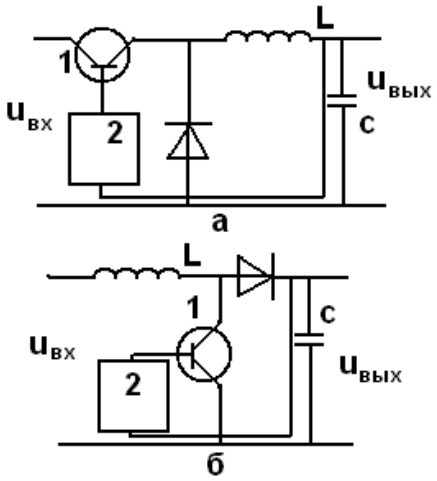


Рисунок 2.3 – Схемы понижающего (а) и повышающего (б)

импульсных преобразователей

КПД современных преобразователей параметров электрической энергии находится в пределах 85% – 95% [76, 77, 78].

В качестве схемы управления возможно использование ШИМ-контроллера [80, 81, 82, 83].

Следует отметить, что рассмотренные в первой главе рекуперативные системы гашения колебаний не в достаточной степени обеспечивают реализацию необходимой амортизаторной характеристики, показанной на рисунке 2.1, кроме того, уровень выходного напряжения преобразующего устройства плохо сопрягается с уровнем напряжения, требующимся для заряда аккумуляторных батарей, используемых в автомобильной технике.

Для улучшения эксплуатационных характеристик АТ и увеличения срока службы аккумуляторной батареи необходимо иметь близкую к 100% степень заряженности АКБ [46, 84, 85]. Чтобы поддерживать аккумулятор в состоянии полной заряженности, надо контролировать напряжение заряда АКБ. Этого можно достичь, если применить широтно-импульсную модуляцию. Также нужно учитывать температурный коэффициент напряжения (ТКН) заряженной батареи.

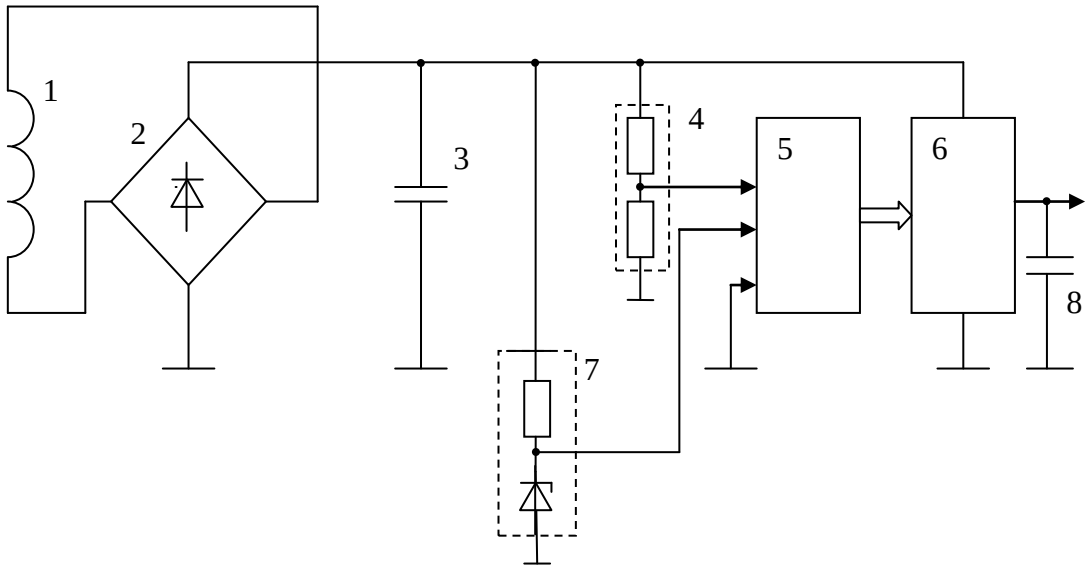
На основании необходимых эксплуатационных характеристик АТ, а также для повышения энергоэффективности системы электрооборудования должны выполняться определенные требования к адаптивному преобразователю параметров электрической энергии [76, 86]. Во-первых, должно осуществляться высокоточное регулирование выходного напряжения, поступающего для заряда АКБ. Во-вторых, преобразователь должен иметь максимально высокий КПД, в-третьих, необходимо учитывать температурную зависимость ЭДС аккумуляторной батареи.

Для точности регулирования напряжения заряда АКБ в пределах 13,9±0,1 В (для бортовой сети 12 В) и повышения КПД [87] необходимо использовать импульсное регулирование. Применение ШИМ-модуляторов [81, 82, 83], позволяет не только превзойти аналоговые системы по показателям точности управления, но и сократить потери мощности на силовых ключах на один-два порядка.

Далее рассматриваются возможные способы схемотехнической реализации адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

2.2 Способы реализации адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний

Функциональная схема устройства для реализации угла наклона характеристики амортизатора показана на рисунке 2.4. Генератор постоянного тока условно изображен в виде катушки индуктивности 1. Скорость изменения магнитного потока, прямо пропорциональная скорости движения амортизаторного штока, определяет величину ЭДС, возникающей в катушке 1.



1 – катушка индуктивности; 2 – диодный мост; 3 – конденсатор;
4 – делитель; 5 – блок компараторов; 6 – блок отбора мощности;
7 – источник опорного напряжения; 8 – накопительный конденсатор

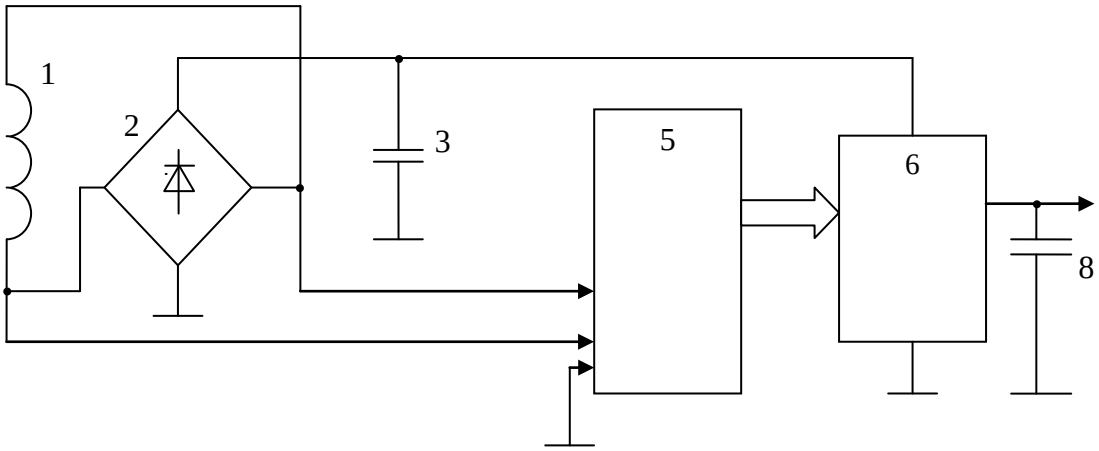
Рисунок 2.4 – Функциональная схема устройства для реализации угла наклона амортизаторной характеристики

Напряжение катушки 1 выпрямляется с помощью диодного моста 2 и используется для зарядки фильтрующего конденсатора 3, напряжение с которого подается на источник 7 опорного напряжения, делитель 4 и блок отбора мощности 6. С делителя 4 напряжение поступает на один из входов блока 5 компараторов. С выхода блока 5 управляется блок 6 отбора мощности. В устройство блока отбора мощности входит схема получения ШИМ-сигнала и силовой ключ на ее выходе [88].

Когда меняется выходной сигнал блока 5, происходит перенастройка скважности ШИМ-импульсов, генерируемых в блоке 6. При этом изменение длительности нахождения силового ключа в открытом состоянии регулирует величину электрического тока, поступающего на накопительный конденсатор 8. В результате реализуется динамическое управление сопротивлением амортизатора.

Когда скорость движения штока амортизатора достигает значений 0,3 – 0,5 м/с, срабатывает один из компараторов блока 5, коэффициент γ заполнения ШИМ-сигнала изменяется, обеспечивая показанный на рисунке 2.1 излом на амортизаторной характеристике.

Для реализации характеристики «отбой-сжатие» рассмотренное устройство должно быть дополнено схемой определения направления движения поршня, т.е. знака ЭДС катушки индуктивности 1 (рисунок 2.5).



1 – катушка индуктивности; 2 – диодный мост; 3 – конденсатор;
5 – блок компараторов; 6 – блок отбора мощности;
8 – накопительный конденсатор

Рисунок 2.5 – Функциональная схема устройства для реализации характеристики «отбой – сжатие»

Напряжение с катушки генератора поступает на входы блока 5 компараторов. Данный блок осуществляет сравнение этого напряжения с потенциалом земли, определяя знак входного напряжения.

Если в качестве генератора 1 использовать синхронный генератор, то направление движения поршня может быть определено по последовательности следования фаз генератора.

С выхода блока 5 компараторов управляется блок отбора мощности 6, который изменяет коэффициент γ заполнения ШИМ-сигнала, увеличивая отбираемую от катушки амортизатора мощность в соответствии с формулой:

$$F_{от} = (2 \div 5) F_{сж}. \qquad (2.11)$$

Как отмечалось в первой главе, масса автомобиля оказывает существенное влияние на плавность его хода. При изменении подрессоренной массы относительный коэффициент затухания колебаний ψ меняется в соответствии с

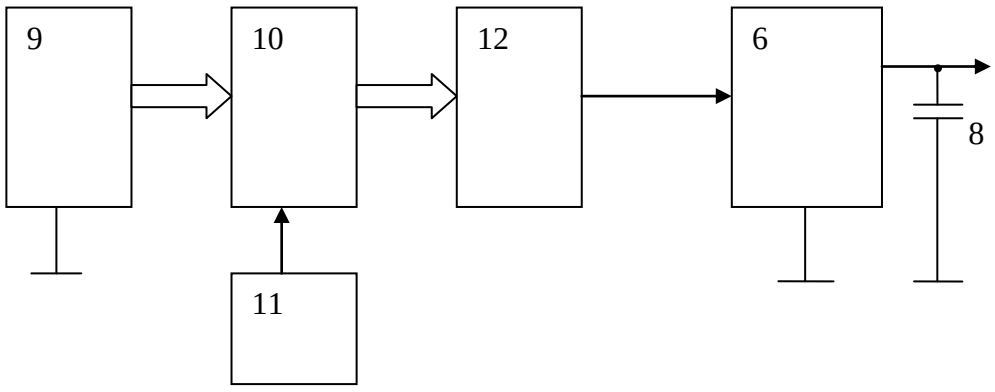
формулой (1.3), а для обеспечения наилучшей плавности хода требуется поддерживать его значения в диапазоне 0,15 – 0,30.

Типовые амортизаторы не позволяют решить эту задачу. Применение электронной ИУС демпфирования колебаний дает возможность корректировать коэффициент демпфирования в зависимости от нагрузки на подвеску.

Определение массы автомобиля осуществляется посредством энкодера – высокоточного цифрового датчика [89]. Он фиксируют вертикальное смещение кузова, возникающее при изменении массы ТС, и преобразует эти данные в цифровой код для дальнейшей обработки системой управления.

Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) осуществляет преобразование выходного кода энкодера в аналоговый сигнал, который подается на вход блока отбора мощности. Данный сигнал используется для динамического изменения коэффициента γ заполнения ШИМ-сигнала. Таким образом, система управляет мощностью, отбираемой от генератора амортизатора, и регулирует его демпфирующие свойства в соответствии с текущей нагрузкой на подвеску. В результате удается поддерживать значения относительного коэффициента затухания колебаний ψ в необходимых пределах.

Блок учета подрессоренной массы работает следующим образом (рисунок 2.6) [90, 91].

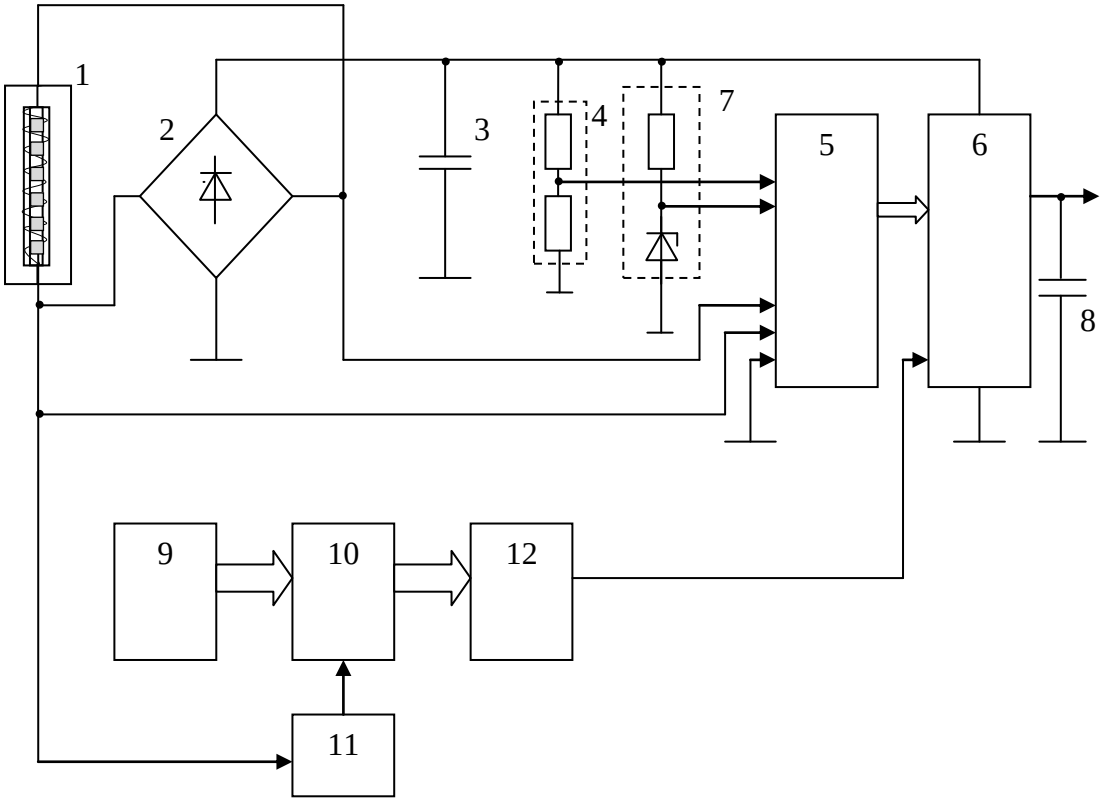


6 – блок отбора мощности; 8 – накопительный конденсатор;
9 – энкодер; 10 – ОЗУ; 11 – таймер; 12 – ЦАП

Рисунок 2.6 – Функциональная схема устройства для учета изменения подрессоренной массы автомобиля

Поступающий от энкодера 9 двоичный код сохраняется в оперативной памяти. За обновление данных в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) 10 отвечает таймер 11. Команда на перезапись подается при условии, что транспортное средство находится в неподвижном состоянии в течение заданного временного промежутка (~1 мин). Затем сигнал с ОЗУ 10 поступает на вход ЦАП 12, аналоговый сигнал с которого подается на вход блока 6 отбора мощности.

Объединяя схемы устройств, представленных на рисунках 2.4 – 2.6, можно построить результирующую схему адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, которая показана на рисунке 2.7.



1 – генератор; 2 – диодный мост; 3 – конденсатор; 4 – делитель напряжения; 5 – блок компараторов; 6 – блок отбора мощности; 7 – источник опорного напряжения; 8 – накопительный конденсатор; 9 – энкодер; 10 – ОЗУ; 11 – таймер; 12 – ЦАП

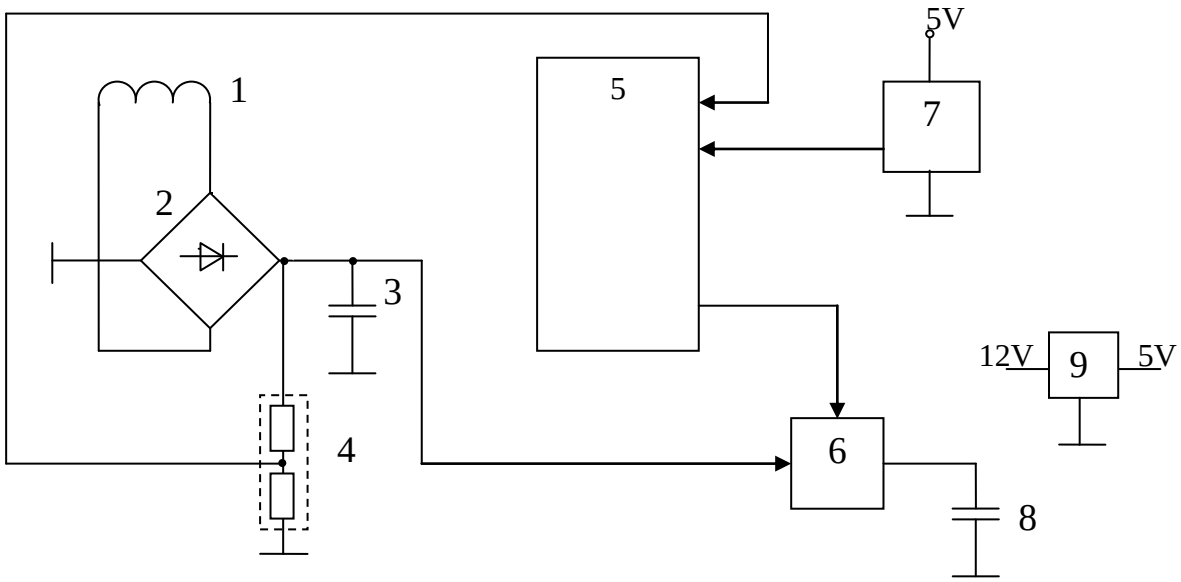
Рисунок 2.7 – Функциональная схема адаптивной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески

В ее состав входят три рассмотренных выше устройства: устройство для реализации угла наклона характеристики амортизатора, устройство для реализации характеристики «отбой – сжатие», устройство для учета изменения подрессоренной массы автомобиля.

Данная ИУС обеспечивает получение любой амортизаторной характеристики, вид которой может отличаться от типового, представленного на рисунке 2.1, а также позволяет регулировать демпфирующие свойства подвески с учетом нагрузки на транспортное средство и других возможных факторов.

Техническая реализация предложенной информационно-управляющей системы возможна на базе микроконтроллера, например, Atmega8.

Функциональная электрическая схема адаптивной ИУС на микроконтроллере показана на рисунке 2.8 [92].



1 – генератор; 2 – диодный мост; 3 – конденсатор; 4 – делитель напряжения; 5 – микроконтроллер; 6 – силовой ключ; 7 – датчик массы; 8 – накопительный конденсатор; 9 – блок питания микроконтроллера

Рисунок 2.8 – Функциональная схема адаптивной ИУС демпфирования колебаний на микроконтроллере

Генератор 1 вырабатывает ЭДС, прямо пропорциональную скорости перемещения амортизаторного штока. Сигнал ЭДС через диодный мост 2 и

делитель 4 напряжения поступает на вход микроконтроллера 5. Необходимый излом амортизаторной характеристики (рисунок 2.1) при скорости поршня, равной 0,3 – 0,5 м/с, задается прошивкой микроконтроллера.

Также микроконтроллер определяет знак ЭДС, от которого зависит переключение между характеристиками сжатия и отбоя. При отбое коэффициенты, определяющие отбираемый ток, необходимо изменить в соответствии с формулой (2.11).

Выше отмечалось, что наилучшая плавность хода достигается, если значения относительного коэффициента затухания колебаний ψ удовлетворяют диапазону 0,15 – 0,30. В связи с этим, при прошивке микроконтроллера устанавливается значение ψ = 0,25 и автоматически поддерживается ИУС на заданном уровне.

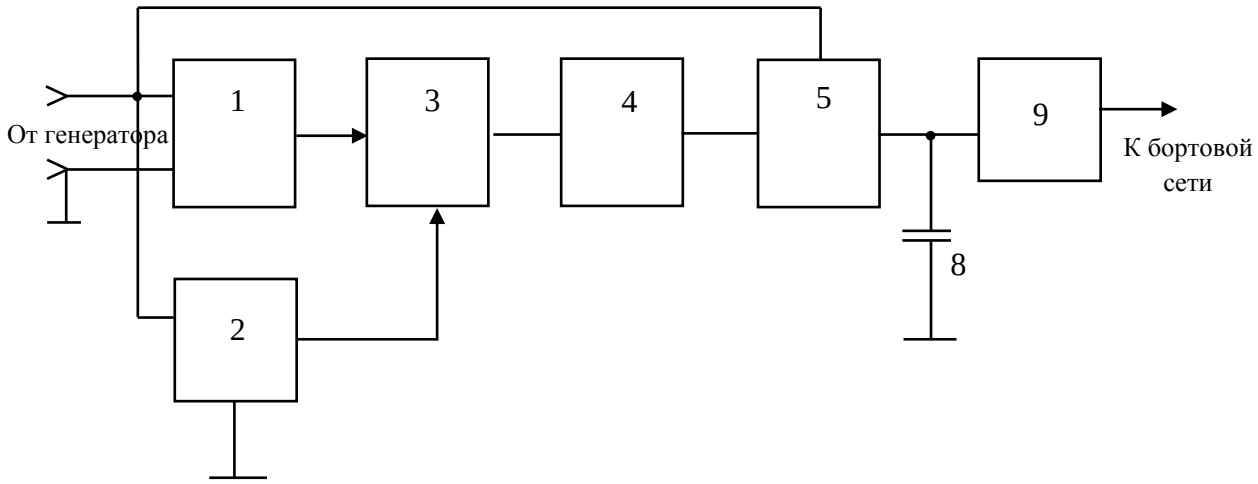
Подрессоренная масса, приходящаяся на одно колесо, измеряется с помощью датчика массы 7 на энкодере (данное устройство также может быть выполнено и на герконах [93]). Данные о величине массы записываются в оперативную память только после того, как ТС постоит неподвижно некоторое время (~1 мин). Это определяется модулем ЭДС, значения которого должны оставаться ниже порогового уровня (~100 мВ) на протяжении указанного временного интервала [90, 92, 94, 95, 96, 97].

При приближении штока амортизатора к ограничителям хода (определяется по показаниям энкодера) коэффициент γ заполнения ШИМ-сигнала приближается к 1 с целью увеличения силы сопротивления.

Для технической реализации ИУС демпфирования колебаний возможно использование элементной базы на основе аналоговых компонентов и интегральных микросхем (ИМС) с малой степенью интеграции (рисунок 2.9) [75].

Блок 1 выделения модуля сигнала базируется на паре «повторитель напряжения – инвертор», где выходы повторителя и инвертора объединены через диоды на общую нагрузку, что позволяет фиксировать максимальное значение потенциала.

Определение знака входного напряжения в блоке 2 выполняется компаратором, который выдает высокий или низкий уровень напряжения в зависимости от полярности входного сигнала.



1 – блок выделения модуля входного сигнала; 2 – блок определения знака ЭДС; 3 – формирователь характеристики амортизатора; 4 – схема ШИМ-драйвера; 5 – силовые ключи; 8 – накопительный конденсатор; 9 – устройство сопряжения уровней напряжения

Рисунок 2.9 – Функциональная схема ИУС демпфирования колебаний на аналоговых элементах и ИМС с малой степенью интеграции

Специальный блок – формирователь 3 предназначен для получения необходимой амортизаторной характеристики. Он работает следующим образом. Сигнал с выхода блока 1 выделения модуля поступает на вход управляемого усилителя, коэффициент усиления которого регулируется. При достижении входным напряжением уровня 3 В с помощью встроенного компаратора замыкается ключ на полевом транзисторе, в цепь обратной связи усилителя подключается дополнительный резистор, и коэффициент усиления снижается, обеспечивая излом на амортизаторной характеристике в соответствии с рисунком 2.1.

К выходу усилителя формирователя подключается управляемый делитель напряжения, содержащий второй ключ на полевом транзисторе. При изменении направления движения поршня амортизатора меняется знак напряжения на выходе компаратора 2, при этом сигнал с выхода усилителя формирователя,

поступающий на управляемый делитель напряжения, ослабляется примерно в два раза. Изменение знака напряжения на выходе компаратора 2 происходит при переходе работы амортизатора с отбоя на сжатие.

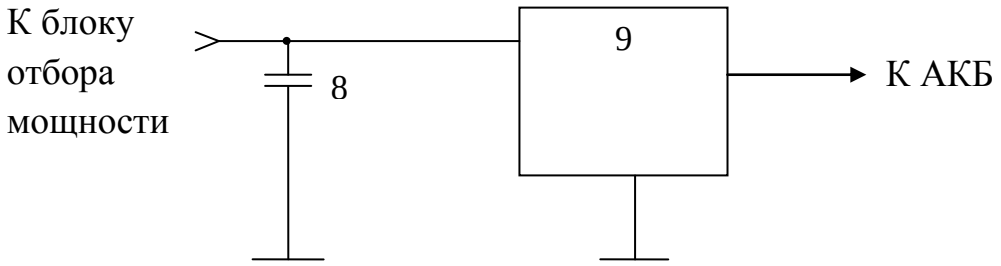
Сформированный в блоке 3 сигнал поступает на ШИМ-драйвер 4, где преобразуется в ШИМ-сигнал. ШИМ-драйвер может быть реализован разными способами. В данной ИУС он выполнен на базе специализированной микросхемы TL494. ШИМ-сигнал управляет работой силовых ключей 5, вход которых через выпрямительный мост соединен с генератором, а выход – с накопительным конденсатором 8.

В устройстве сопряжения уровней 9 осуществляется преобразование напряжения с конденсатора 8 к уровню, который требуется для заряда АКБ.

В ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески предусмотрен конденсатор 8 с большой емкостью, аккумулирующий энергию, вырабатываемую амортизатором-генератором. Однако, прямая зарядка АКБ от накопительного конденсатора невозможна из-за нестабильности напряжения, которое постоянно меняется под влиянием внешних условий (состояние дорожного полотна, скорости ТС, стиля вождения) и заданных характеристик демпфирования.

Из ряда работ [46, 84, 85] следует, что уровень напряжения для заряда свинцово-кислотных стартерных АКБ при 12 В бортовой сети должен составлять $13{,}9 \pm 0{,}1$ В, с учетом необходимого ТКН, следовательно, в ИУС должен быть включен преобразователь 9 электрической энергии (рисунок 2.10), который преобразует уровень напряжения с накопительного конденсатора 8 к уровню, необходимому для заряда аккумуляторной батареи ТС [98, 99].

Также следует отметить, что процесс заряда АКБ становится невозможным при достижении батареей максимального уровня заряда, а также при нагреве электролита свыше 45°С для свинцово-кислотных АКБ. Помимо этого, энергия возникающих механических колебаний может быть очень велика для заряда аккумуляторной батареи [100].

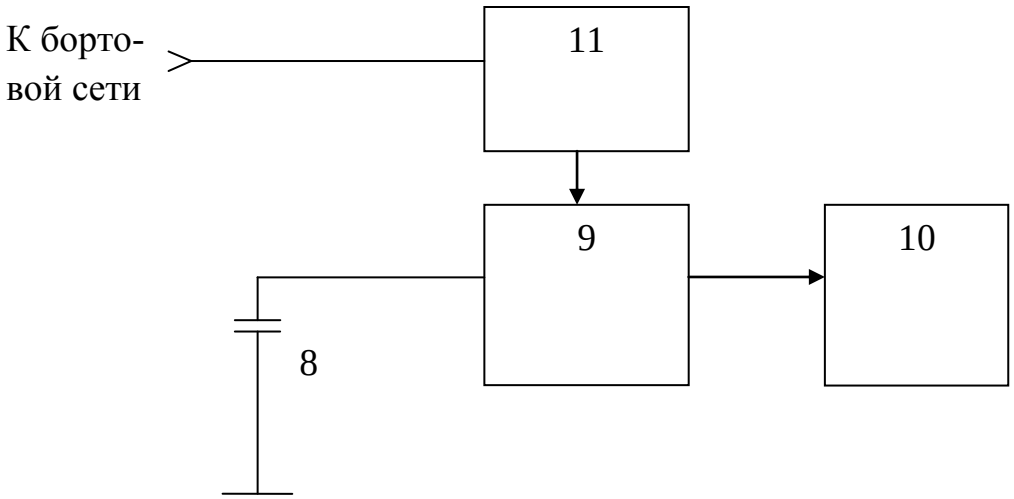


8 – накопительный конденсатор; 9 – преобразователь

Рисунок 2.10 – Функциональная схема устройства сопряжения уровней напряжения с бортовой сетью АТС

В таких случаях целесообразно использовать альтернативные способы накопления энергии. Одним из наиболее эффективных решений считаются емкостные накопители, интеграция которых в бортовую сеть ТС позволяет разгрузить штатные источники питания во время пиковых нагрузок. Особенно перспективно применение таких накопителей на электромобилях.

Другой способ накопления энергии заключается в применении аккумулятора-ресивера, который использует энергию сжатого воздуха. На транспортное средство устанавливается специальный баллон высокого давления и электромотонасос, закачивающий атмосферный воздух в этот баллон (рисунок 2.11).



8 – накопительный конденсатор; 9 – преобразователь;
10 – мотонасос; 11 – логический электронный блок

Рисунок 2.11 – Функциональная схема устройства накопления энергии

Питание мотонасоса 10 обеспечивается при помощи управляемого преобразователя 9 напряжения, поступающего от накопительного конденсатора 8 в случае, когда аккумуляторная батарея не способна воспринимать заряд. Данный режим рассчитывается логическим электронным блоком 11 [101, 102, 103].

Запасенная подобным образом энергия сжатого воздуха может быть использована, например, при запуске двигателя внутреннего сгорания. Особенно эффективно применение данной системы при реализации технологии «старт-стоп».

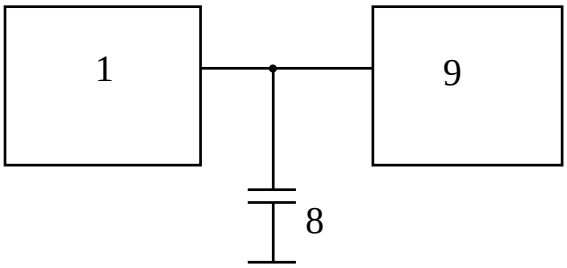
Как отмечалось в параграфе 1.4, бортовая РЭА, устанавливаемая на военной автомобильной технике, при ведении боевых действий эксплуатируется в условиях постоянного действия вибраций и ударных нагрузок. Для обеспечения работоспособности РЭА в ее конструкцию вводят амортизаторы, которые соединяют аппаратуру с вибрирующим основанием военной техники.

Применение регулируемых и, в частности, электромагнитных амортизаторов открывает новые возможности для повышения качества виброзащиты РЭА за счет автоматического управления демпфирующими свойствами упругих элементов. Данный способ активного гашения колебаний позволяет существенно улучшить показатели виброустойчивости радиоэлектронной аппаратуры.

Описанные выше основы построения электронной ИУС демпфирования колебаний могут быть использованы при разработке устройств гашения вибраций РЭА, устанавливаемой на транспортных средствах [104].

Функциональная схема информационно-управляющей системы гашения колебаний РЭА (рисунок 2.12) реализуется примерно таким же образом, как и рассмотренная ранее схема ИУС демпфирования колебаний подвески АТ.

Энергия механических колебаний РЭА, устанавливаемой на транспортных средствах, преобразуется в электрическую энергию, которая может быть использована для подзарядки аккумуляторов РЭА, либо АКБ транспортных средств, на которых установлена РЭА.



1 – устройство управления рекуперативным амортизатором РЭА;
8 – накопительный конденсатор; 9 – преобразователь напряжения

Рисунок 2.12 – Функциональная схема ИУС гашения колебаний РЭА

В современной РЭА наряду со свинцово-кислотными аккумуляторами используются аккумуляторы других типов (например, литий-ионные), для которых характерны другие значения ЭДС и ТКН. Следовательно, устройство, согласующее уровень напряжения на накопительном конденсаторе 8 с уровнем напряжения питания РЭА, должно обладать другими выходными параметрами в отличие от преобразователя, рассмотренного на рисунке 2.10, чтобы обеспечить оптимальный режим согласования [98, 99].

2.3 Выводы по второй главе

1. Проведено теоретическое обоснование построения адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, отличительными особенностями которой являются:

– получение необходимой амортизаторной характеристики за счет регулирования отбираемой мощности в соответствии с выявленными закономерностями;

– преобразование энергии механических колебаний в электрическую энергию с КПД порядка 90%, с возможностью ее последующего использования, например, для заряда аккумуляторной батареи, при сохранении демпфирующих характеристик амортизатора;

– возможность изменения амортизаторной характеристики за короткое время (~ 1 мс), в том числе и в автоматическом режиме.

Предложенные основы построения ИУС могут быть использованы как для демпфирования колебаний АТС, так и РЭА, устанавливаемой на транспортных средствах.

2. Предложен способ регулирования демпфирующих свойств подвески за счет управления электрическим током, отбираемым от электромагнитного амортизатора с помощью адаптивной ИУС на основе широтно-импульсной модуляции, позволяющий за счет регулирования отбираемой мощности изменять силу сопротивления демпфирующего устройства по любому закону, и получить автоматически управляемую адаптивную подвеску.

3. Разработаны функциональные схемы устройств, составляющих информационно-управляющую систему демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, позволяющие получить необходимую амортизаторную характеристику с возможностью ее регулирования электронным способом, а также автоматического учета подрессоренной массы.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ

Целью настоящей главы является моделирование в среде Simulink адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, предложенной во второй главе, а также ее экспериментальное исследование.

3.1 Моделирование адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески в среде Simulink

В настоящее время при проведении научных исследований широко используются методы моделирования. Компьютерное моделирование возникло как одно из направлений математического моделирования с развитием информационных технологий.

Особую роль компьютерное моделирование играет при решении естественнонаучных и технических задач. Компьютерный эксперимент, наряду с традиционным экспериментом, является одним из основных методов исследования сложных систем и физических процессов в современной науке, кроме того, он обладает целым рядом преимуществ по сравнению с реальным экспериментом, в частности, компьютерный эксперимент может быть выполнен в таких условиях, когда проведение натурного эксперимента затруднено или невозможно.

Одним из методов компьютерного моделирования является имитационное моделирование (от англ. simulation modeling), суть которого заключается в изучении реальных физических систем с помощью их виртуальных моделей. Данный метод объединяет принципы натурного эксперимента с возможностями

современных компьютерных технологий, позволяя с высокой степенью достоверности воспроизводить поведение исследуемой системы [105].

Интерактивная среда имитационного моделирования Simulink позволяет строить динамические модели различных систем с помощью блок-диаграмм в виде направленных графов. Программный комплекс Simulink предоставляет пользователям обширный набор специализированных библиотек, предназначенных для моделирования механических, гидравлических, электрических систем. Инструментарий программы дает возможность применять модельно-ориентированный подход при разработке устройств, работающих в реальном времени, управляющих систем, средств цифровой связи и др. Данная интерактивная среда позволяет выполнять симуляцию динамических свойств системы и сразу же анализировать результаты [106].

Система Simulink содержит дополнительные пакеты, позволяющие решать самые разные задачи: разработка модели, ее тестирование, проверка работоспособности, аппаратная реализация и др.

Среда Simulink является частью пакета MATLAB. Это позволят пользоваться встроенными в MATLAB математическими алгоритмами, средствами обработки данных и графикой [106].

Специфика моделирования с использованием пакета Simulink определяется его основным предназначением – моделирование динамических систем (Dynamic Systems). Simulink предлагает пользователям удобный визуальный интерфейс для создания моделей путем компоновки блоков из готовых библиотек. Такой подход существенно упрощает работу, так как от исследователя не требуется глубокое владение языками программирования или сложными математическими методами, а достаточно базовой компьютерной грамотности и профильных знаний в конкретной научной области [107].

Кроме того, Simulink позволяет в режиме реального времени отслеживать динамику протекающих процессов с помощью специализированных инструментов визуализации, интегрированных в библиотеку пакета, например, блок Scope – осциллограф, который строит осциллограммы исследуемых

сигналов и позволяет наблюдать за изменениями этих сигналов во времени в процессе моделирования.

Результаты моделирования могут быть представлены по-разному – в виде графиков или таблиц.

Интерактивная среда Simulink имеет обширную библиотеку блоков и удобный редактор блок-схем, с помощью которых можно построить функциональную блок-схему моделируемого устройства или системы. Для этого пользователь переносит нужные ему блоки с палитр компонентов на рабочий стол пакета Simulink, используя компьютерную мышь, а затем соединяет входы и выходы блоков линиями. Так создается блок-схема системы или устройства, т. е. имитационная модель [107, 108].

Среда Simulink позволяет автоматизировать наиболее трудоемкий этап моделирования – составление и решение сложных систем алгебраических или дифференциальных уравнений, описывающих заданную модель.

Также несомненное преимущество данного пакета – обеспечение удобного и наглядного визуального контроля за поведением созданного пользователем виртуального устройства.

3.1.1 Имитационное моделирование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний в среде Simulink

Основой имитационной модели ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески служит функциональная схема, предложенная в параграфе 2.2 (рисунок 2.9), включающая блок определения знака входного напряжения, блок выделения модуля входного сигнала, формирователь характеристики амортизатора, схему ШИМ-драйвера. Имитационная модель представлена на рисунке 3.1 [75, 109].

Формирование сигналов в среде Simulink осуществляется при помощи генераторов сигналов Sources. Для формирования пилообразного сигнала, имитирующего сигнал ЭДС, пропорциональной скорости движения штока

амортизатора, используется блок Repeating Sequence – генератор периодического сигнала по заданному вектору с линейной интерполяцией.

Блок Repeating Sequence вырабатывает пилообразный сигнал в диапазоне напряжений от –5 до +5 В с периодом повторения 2 с.

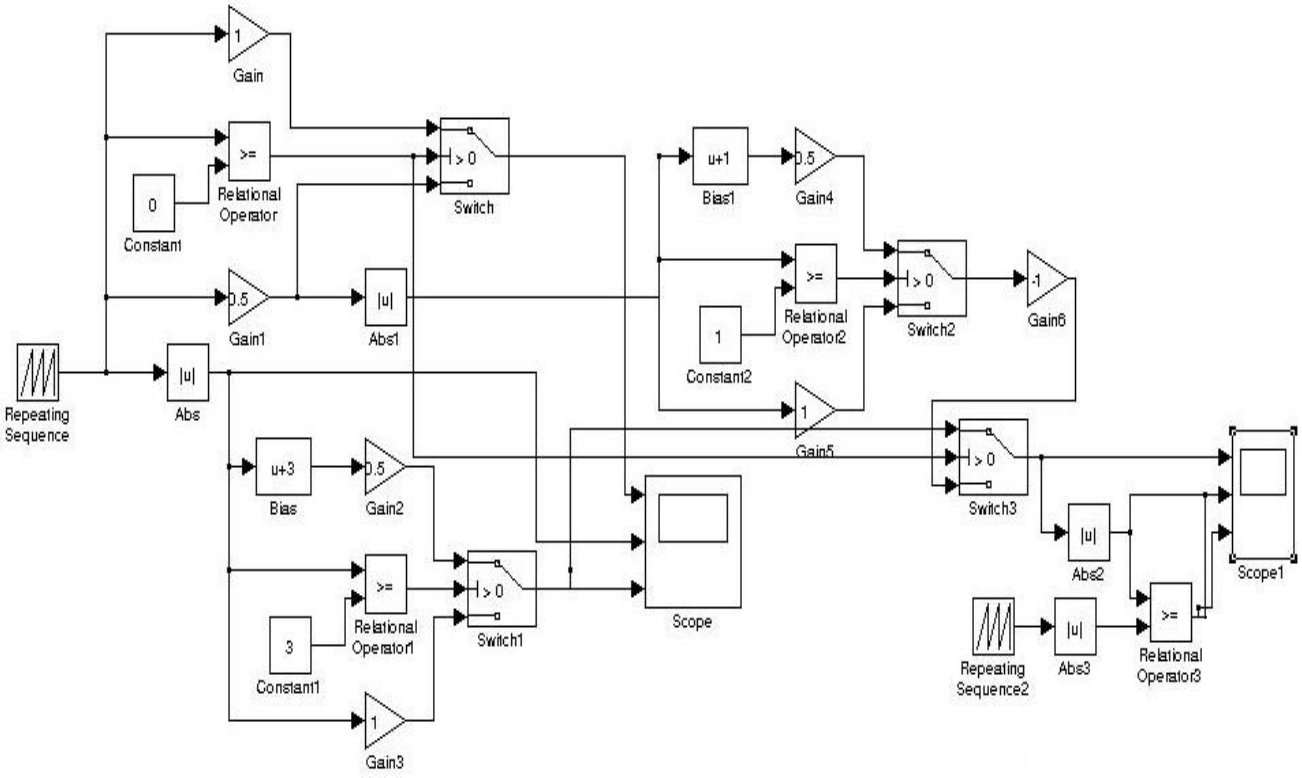


Рисунок 3.1 – Имитационная модель ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, выполненная в среде Simulink

Блок вычисления модуля Abs предназначен для вычисления абсолютного значения величины сигнала. Осциллограмма модуля пилообразного напряжения представлена на рисунке 3.2.

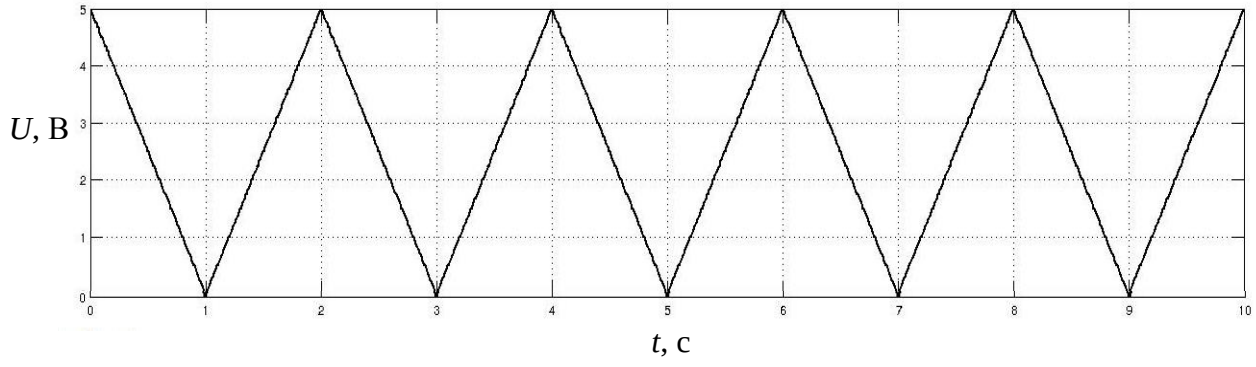


Рисунок 3.2 – Осциллограмма модуля пилообразного напряжения

Блок вычисления операции отношения Relational Operator выполняет сравнение величин поступающих сигналов. В качестве первого операнда в операции отношения >= выступает сигнал, приходящий на верхний вход, а в качестве второго – на нижний. Выходной параметр блока принимает значение логической единицы при истинности результата сравнения и нулевое значение при его ложности.

Положительный знак сигнала соответствует режиму отбоя амортизатора. Реализация необходимой амортизаторной характеристики, изображенной на рисунке 2.1, достигается путем уменьшения с помощью блока усилителя Gain коэффициента усиления вдвое (значение может варьироваться) в тех случаях, когда уровень сигнала превышает отметку в 3 В. Смоделированная для режима отбоя часть амортизаторной характеристики показана на рисунке 3.3. Излом характеристики соответствует изменению коэффициента усиления.

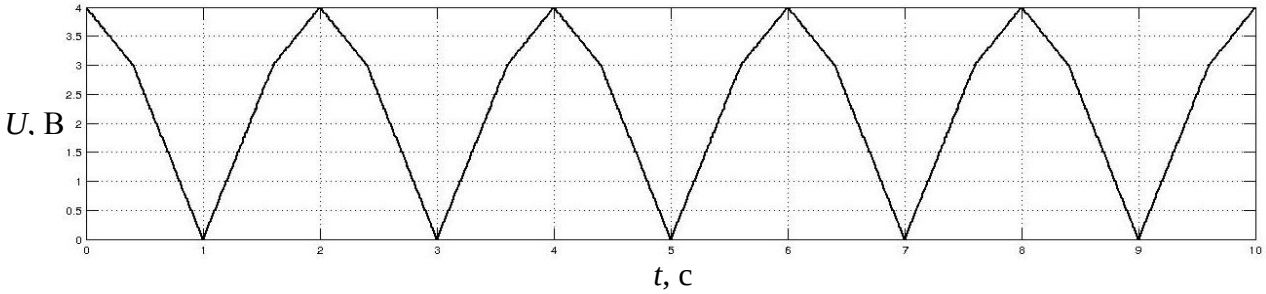


Рисунок 3.3 – Амортизаторная характеристика для режима отбоя

Для отрицательного знака сигнала, соответствующего режиму сжатия амортизатора, коэффициент усиления уменьшается, в данном случае – в 2 раза, в соответствии с формулой (2.11).

Смоделированная характеристика амортизатора показана на рисунке 3.4, а ее модуль – на рисунке 3.5.

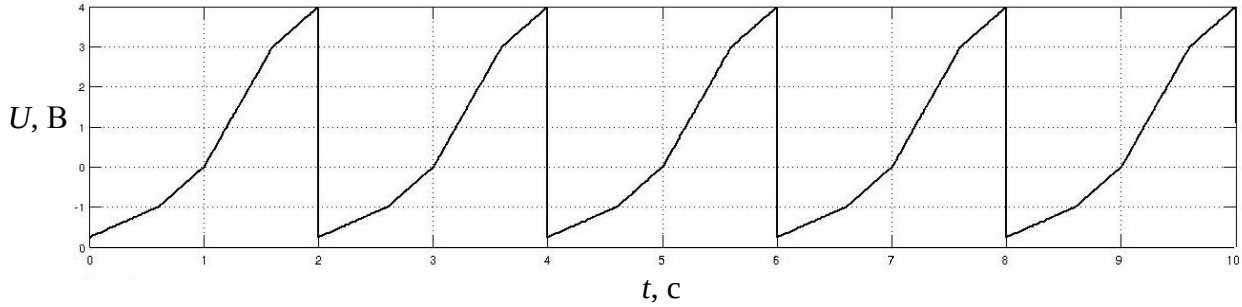


Рисунок 3.4 – Смоделированная амортизаторная характеристика

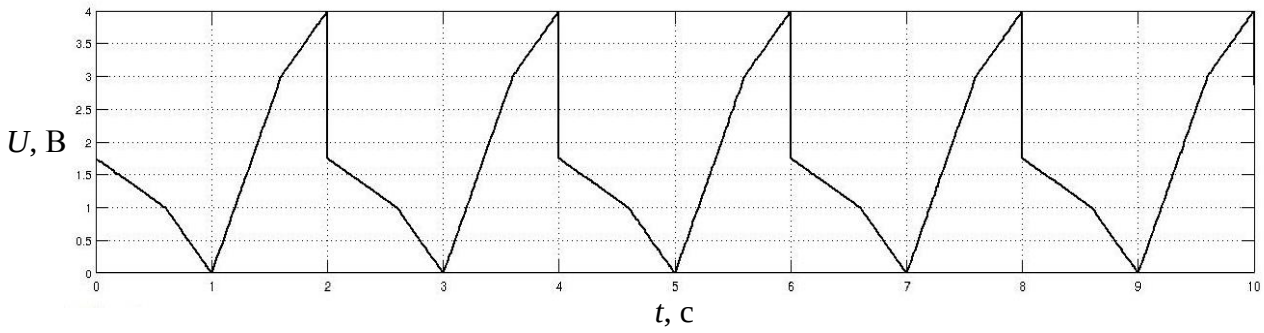


Рисунок 3.5 – Модуль амортизаторной характеристики

Для формирования ШИМ-сигнала, скважность которого определяется требуемой амортизаторной характеристикой, в качестве компаратора используется блок Relational Operator.

На его первый вход через блок выделения модуля поступает напряжение с высокочастотного генератора пилообразного напряжения Repeating Sequence 2 диапазоном от –5 до +5 В. На второй вход компаратора подается напряжение, соответствующее модулю амортизаторной характеристики (рисунок 3.5).

ШИМ-сигнал показан на рисунке 3.6 [75, 109].

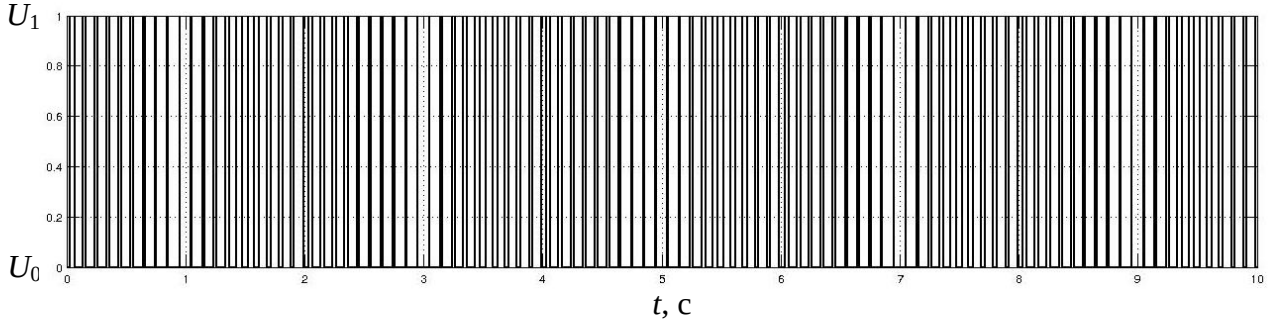


Рисунок 3.6 – ШИМ-сигнал для управления мощными силовыми ключами

Данный сигнал используется для управления мощными силовыми ключами 5 (рисунок 2.9). Это позволяет регулировать отбираемую от генератора амортизатора мощность, а значит, изменять его силу сопротивления по любому заданному закону.

3.1.2 Моделирование с учетом микропрофиля дороги

Исследования динамики колебательных систем транспортных средств при различных условиях движения предполагают моделирование возмущения микропрофиля дороги.

Как отмечалось в параграфе 1.1 первой главы, микропрофиль дороги представляется в виде стационарного эргодического случайного процесса с корреляционной функцией $R(x)$ (уравнения (1.11) – (1.13)).

Числовые значения параметров корреляционных функций для некоторых типов дорог (цементобетонной, асфальтированной, разбитой грунтовой) представлены в таблице 1.1 параграфа 1.1.

С помощью преобразования Фурье (1.15) можно получить формулы для вычисления соответствующих спектральных плотностей $S(\theta)$ (уравнения (1.17) – (1.19)).

Для моделирования стационарных случайных функций с заданными спектрально-корреляционными свойствами (корреляционной функцией или спектральной плотностью) используется большое количество методов, среди которых нельзя выделить универсальный [110, 111, 112].

Чтобы определить значения ординат микропрофиля в различные моменты времени, можно применить метод формирующего фильтра. Эта динамическая система преобразует входной сигнал типа «белый шум» в выходной случайный сигнал, вероятностные характеристики которого соответствуют заданным условиям.

Генерирование случайного возмущения микропрофиля дороги методом формирующего фильтра позволяет реализовать задачу формирования функции микропрофиля как случайного процесса по корреляционной функции или спектральной плотности его дисперсий с помощью различных программных комплексов: MATHCAD, MATLAB/Simulink и др. [113 – 117].

В данной работе моделирование микропрофиля дороги реализовано с помощью среды Simulink.

Имитационная модель получения случайного сигнала, соответствующего заданному микропрофилю дороги, представлена на рисунке 3.7.

В модели используется авторегрессионный фильтр (АР-фильтр).

АР-модель описывается разностным уравнением вида [111, 112, 118]:

$$y(n)=e(n)-\sum_{k=1}^{M-1}a_k y(n-k), \tag{3.1}$$

где a_k – коэффициенты авторегрессии;

(M-1) – порядок АР-модели;

$e(n)$ – входной сигнал;

$y(n)$ – выходной сигнал – моделируемая случайная последовательность.

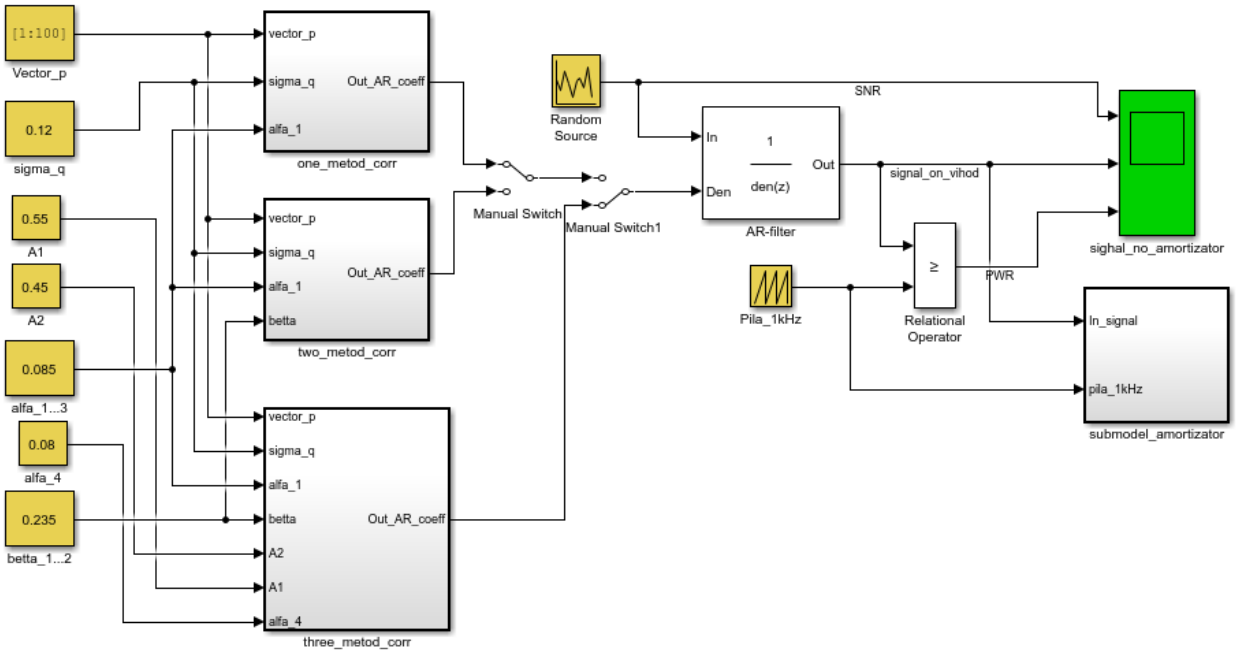


Рисунок 3.7 – Имитационная модель получения сигнала, соответствующего заданному микропрофилю дороги

Случайный входной сигнал формируется блоком Random Source.

Передаточная функция фильтра [111, 112, 118]:

$$H(z)=\frac{1}{1+\sum_{k=1}^{M-1}a_k z^{-k}}=\frac{1}{A(z)}. \tag{3.2}$$

Коэффициенты авторегрессии находятся из системы уравнений Юла-Уолкера с корреляционной матрицей Теплица [112, 118]:

$$\begin{bmatrix} r_x(0) & r_x(1) & \dots & r_x(M-1) \\ r_x(1) & r_x(0) & \dots & r_x(M-2) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ r_x(M-1) & r_x(M-2) & \dots & r_x(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x(1) \\ r_x(2) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_x(M) \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Блок Toeplitz из библиотеки Simulink генерирует матрицу Теплица. Решение системы линейных уравнений осуществляется с помощью нахождения обратной матрицы.

Числовые значения параметров для разных типов дорог (таблица 1.1) можно менять.

Имитационная модель ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, учитывающая микропрофиль дорожного покрытия, представлена на рисунке 3.8 [74, 119].

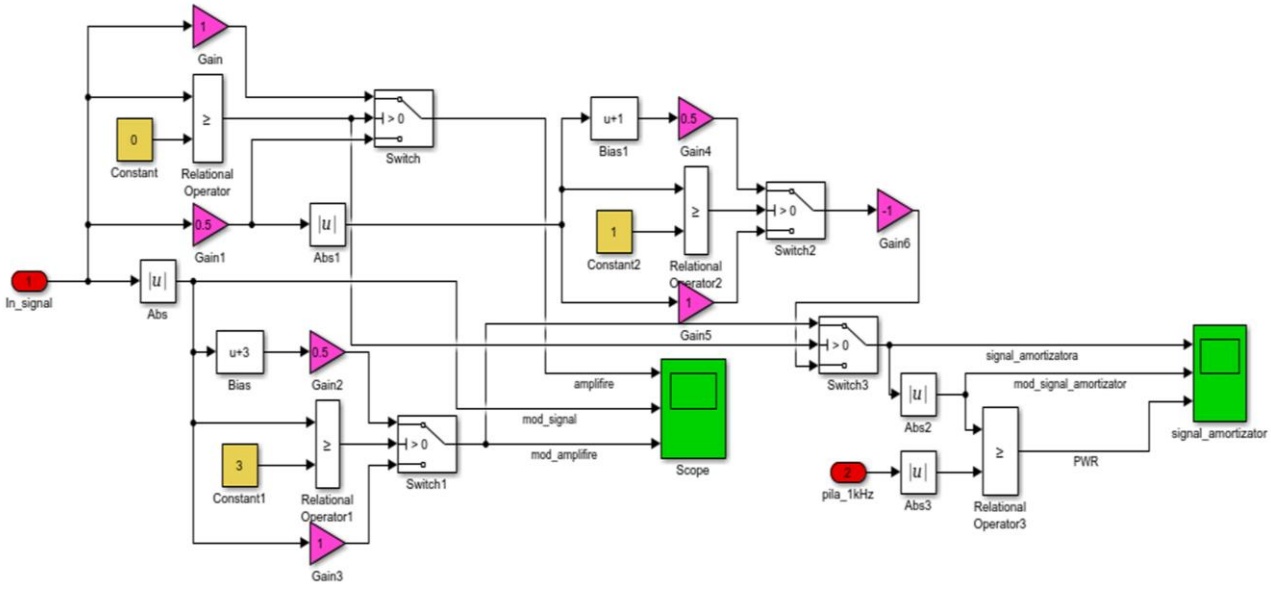
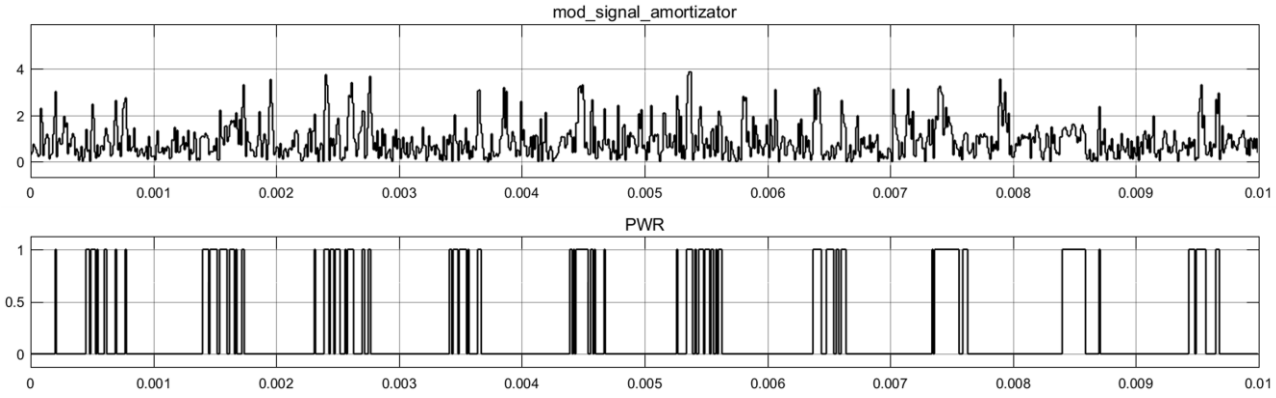


Рисунок 3.8 – Имитационная модель ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески с учетом микропрофиля дороги

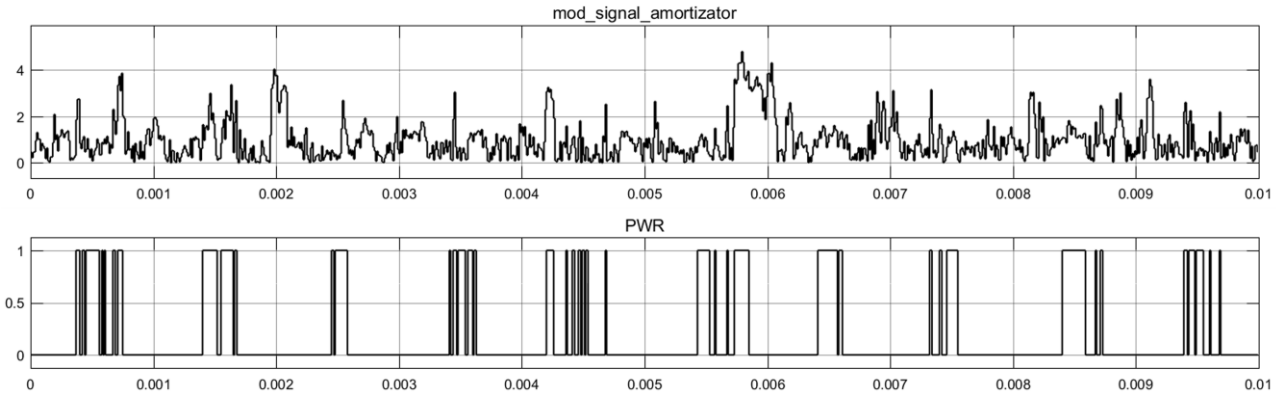
В отличие от модели, представленной на рисунке 3.1, на вход 1 подается случайный сигнал, имитирующий микропрофиль дороги.

ШИМ-сигнал для некоторых дорожных покрытий показан на рисунке 3.9 [74, 119].



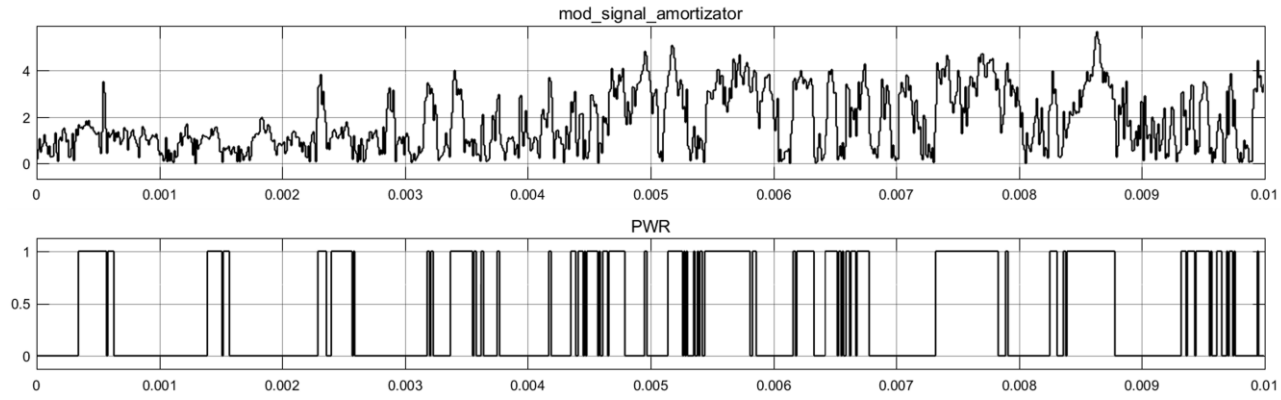
t, с

а)



t, с

б)



t, с

в)

Рисунок 3.9 – Выходной сигнал амортизатора и соответствующий ШИМ-сигнал для управления мощными силовыми ключами в случае асфальтированной (а), цементобетонной (б) и разбитой грунтовой дороги (в)

На рисунке виден изменяющийся коэффициент заполнения ШИМ-сигнала для различных дорожных покрытий. Следовательно, информационно-управляющая система демпфирования колебаний автоматически реагирует на микропрофиль дороги.

Моделирование в среде Simulink подтвердило возможность реализации основ построения ИУС, изложенных во второй главе, с целью получения автоматически управляемой электромагнитной подвески.

3.2 Экспериментальное исследование адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески

Целью экспериментального исследования являлось определение работоспособности предложенной во второй главе электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

Для достижения поставленной цели выбрана следующая методика проведения эксперимента:

1) постановка задач экспериментального исследования;

2) определение объекта исследования;

3) выбор измерительных приборов и оборудования;

4) разработка и выполнение программы исследований.

Задачи экспериментального исследования:

– подтверждение работоспособности электронной ИУС демпфирования колебаний на дискретной элементной базе, а также подтверждение результатов, полученных при моделировании работы ИУС в среде Simulink;

– подтверждение работоспособности электронной ИУС демпфирования колебаний на элементах с высокой степенью интеграции, а также подтверждение осуществления рекуперации энергии.

Объектом исследования являлась адаптивная электронная ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

Измерительные приборы и оборудование: генератор сигналов, блок питания, осциллограф, стереоусилитель, вибромодули, АКБ.

Программа исследований состояла из следующих этапов:

– разработка принципиальных схем ИУС;

– изготовление макетных образцов ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески;

– подготовка измерительных приборов и оборудования;

– сборка экспериментальных установок;

– проведение испытаний макетных образцов ИУС демпфирования колебаний;

– анализ результатов исследований и оценка целесообразности использования разработанной ИУС в системах гашения механических колебаний.

3.2.1 Экспериментальное исследование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний на дискретной элементной базе

Принципиальная электрическая схема информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, смоделированной в среде Simulink (рисунок 3.1), представлена на рисунке 3.10.

На вход ИУС поступает сигнал с амортизатора-генератора.

Микросхема DA1, содержащая счетверенный операционный усилитель, обеспечивает получение типовой амортизаторной характеристики в соответствии с рисунком 2.1.

Первый операционный усилитель DA1.1 представляет собой компаратор, с помощью которого определяется знак поступающего с генератора напряжения. Соотношение сопротивлений R_2 и R_1 характеризует глубину положительной обратной связи, что исключает ложные срабатывания по шумам и наводкам.

Выходное напряжение подается на ключ DA2.1, выполненный на полевом транзисторе. Переключение транзистора DA2.1 обеспечивает реализацию характеристики «отбой – сжатие»

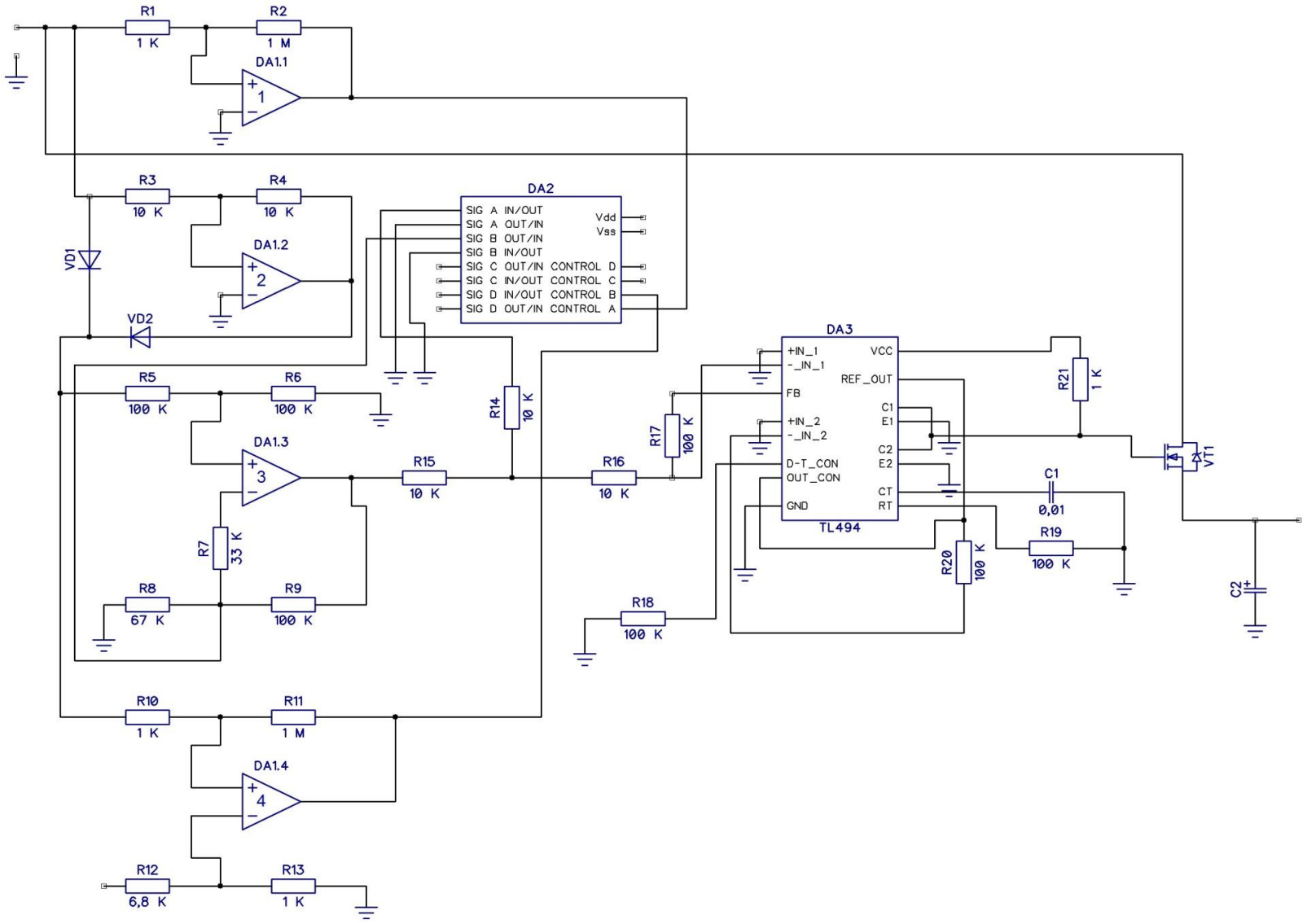


Рисунок 3.10 – Принципиальная схема ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески на дискретной элементной базе

Входной сигнал с амортизатора-генератора поступает через диод VD1 в точку суммирования напряжений, кроме того, этот сигнал инвертируется операционным усилителем DA1.2 и через диод VD2 подается в ту же точку суммирования. Таким образом, в точке суммирования получаем модуль входного сигнала.

Для того, чтобы получить излом на амортизаторной характеристике (рисунок 2.1), необходимо сравнить уровень модуля входного напряжения с напряжением, равным 3 В. Это осуществляет компаратор DA1.4.

Сигнал с уровнем напряжения в 3 В поступает на инвертирующий вход операционного усилителя DA1.4 с делителя R_{12}, R_{13}. Операционный усилитель DA1.4 включен в режиме компаратора, положительная обратная связь которого обеспечивается через сопротивление R_{11}.

Выходной сигнал с компаратора поступает на ключ, выполненный на полевом транзисторе DA2.2.

Ключ DA2.2 изменяет коэффициент усиления усилителя DA1.3, на вход которого поступает модуль входного сигнала. Коэффициент усиления изменяется, если значение модуля входного сигнала достигает уровня 3 В. Это позволяет реализовать амортизаторную характеристику с необходимым изломом.

С выхода DA1.3 напряжение поступает на управляемый делитель, состоящий из сопротивлений R_{14}, R_{15}. Переключением транзистора DA2.1 регулируется коэффициент деления делителя R_{14}, R_{15}.

С выхода делителя R_{14}, R_{15} сформированный сигнал поступает на вход операционного усилителя, который входит в состав микросхемы DA3.

Микросхема DA3 представляет собой ШИМ-контроллер, в качестве которого используется микросхема TL494. ШИМ-контроллер преобразует входной аналоговый сигнал в ШИМ-сигнал, коэффициент заполнения которого определяется входным сигналом.

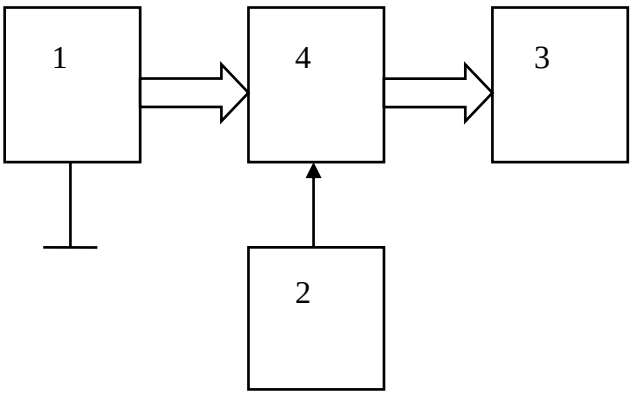
Описание микросхемы TL494 и ее типовое включение [78] приведены в приложении А.

Выходным напряжением ШИМ-контроллера управляется силовой ключ VT1, выполненный на мощном полевом транзисторе с каналом p-типа. Исток

транзистора подключен к входному напряжению, поступающему от амортизатора-генератора, а его сток – к накопительному конденсатору C_2.

Энергия, накопленная в конденсаторе C_2, после преобразования может быть использована в различных целях, как указано в параграфе 2.2.

Функциональная схема экспериментальной установки № 1 для исследования ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески на дискретной элементной базе показана на рисунке 3.11 [74].



1 – генератор пилообразного напряжения;
2 – источник постоянного напряжения; 3 – осциллограф;
4 – ИУС демпфирования колебаний

Рисунок 3.11 – Функциональная схема экспериментальной установки № 1

Работает установка следующим образом. Напряжение с катушки амортизатора имитируется напряжением, поступающим на ИУС от генератора 1 пилообразного напряжения. Уровень выходного напряжения генератора прямо пропорционален скорости движения штока амортизатора.

Источник 2 постоянного напряжения обеспечивает питание информационно-управляющей системы 4 демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

Для наблюдения электрических сигналов в различных точках схемы используется импульсный высокочастотный осциллограф 3.

Перечень измерительных приборов и оборудования, примененных при проведении экспериментальных исследований, представлен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Перечень измерительных приборов и оборудования для экспериментальной установки № 1

№ п/п	Наименование прибора	Марка прибора	Назначение прибора
1	Генератор сигналов функциональный	UDG 101/1	Генерация пилообразного напряжения
2	Источник постоянного напряжения	PS-305D	Питание разработанной системы постоянным напряжением
3	Осциллограф импульсный двухлучевой высоко-частотный	С1-114	Наблюдение параметров исследуемого сигнала

Внешний вид установки № 1 для проведения экспериментальных исследований с примером осциллограммы ШИМ-сигнала, полученной на выходе разработанной ИУС, показан на рисунке 3.12.

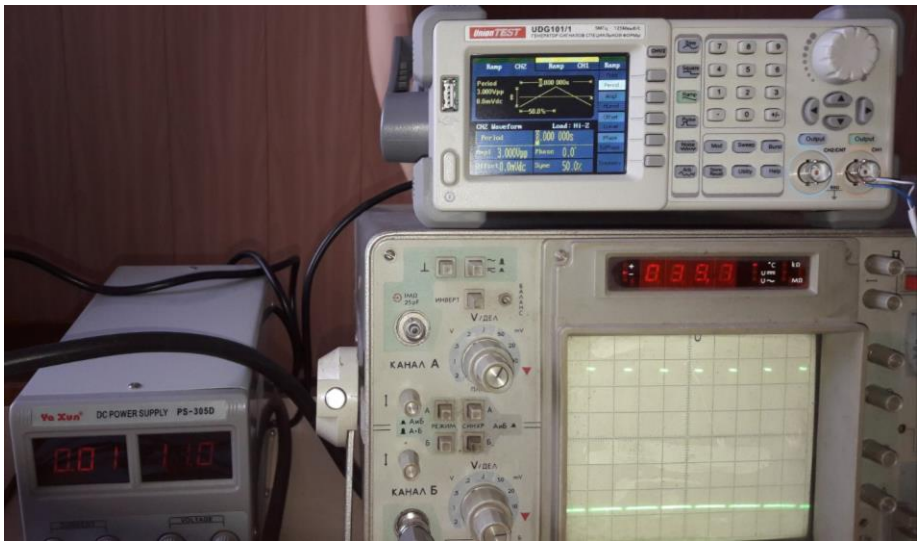


Рисунок 3.12 – Экспериментальная установка № 1 с примером осциллограммы ШИМ-сигнала, полученной на выходе разработанной ИУС

Экспериментально полученный ШИМ-сигнал соответствует смоделированному в системе Simulink ШИМ-сигналу, представленному на рисунке 3.6. Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил результаты, полученные в параграфе 3.1 при имитационном моделировании работы электронной ИУС демпфирования колебаний в среде Simulink.

3.2.2 Экспериментальное исследование информационно-управляющей системы демпфирования колебаний на элементах с высокой степенью интеграции

Для эффективного функционирования амортизатора-генератора требуется, чтобы устройство отбора энергии представляло собой активную нагрузку. Изменение сопротивления этой нагрузки должно осуществляться в соответствии с типовыми амортизаторными характеристиками, описанными ранее в главе 1.

В качестве такого устройства отбора энергии в данной ИУС предлагается использовать корректор коэффициента мощности (ККМ) с повышающим импульсным блоком питания. Выходное напряжение этого блока может быть использовано для подзарядки аккумулятора или, при его полной емкости, может переводиться в тепловую энергию и рассеиваться в окружающую среду.

Для реализации ИУС была выбрана микросхема IL6562, отличающаяся низкой стоимостью, распространенностью на рынке и широким выбором функциональных аналогов, например, микросхема IN6562 Интеграл, производимая в Республике Беларусь.

Микросхема IL6562 дает возможность строить на ее базе интегрированный блок питания, объединяющий функции корректора коэффициента мощности и обратноходового преобразователя с ШИМ, с одним переключающим элементом и трансформатором.

Данный интегрированный блок питания обладает некоторыми особенностями. Во-первых, коэффициент γ заполнения ШИМ-сигнала меняется в зависимости от нагрузки. Во-вторых, для переключения ключа используется контроль перехода через ноль электрического тока в первичной обмотке трансформатора, что позволяет получить минимальную нагрузку на транзистор и повысить надежность работы электронного устройства.

Описание микросхемы IL6562 и ее типовое включение [120] приведены в приложении Б.

Принципиальная электрическая схема информационно-управляющей системы

демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, выполненная на элементах с высокой степенью интеграции, представлена на рисунке 3.13.

В начальный момент времени емкость C_1 разряжена. Чтобы сгладить первоначальный импульс тока используется сопротивление R_1 с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, которое при нагревании уменьшает сопротивление, т.е. высокое сопротивление в начальный момент времени ограничивает ток заряда C_1 до приемлемых значений (5-10 А). В процессе работы сопротивление R_1 нагревается, его сопротивление уменьшается, и оно минимизирует влияние протекающего тока на работу устройства.

Двухполярный ограничитель напряжения VD1 (TVS-диод) ограничивает напряжение, поступающее с амортизатора, значением в 48 В. При нештатной работе амортизатора максимальное напряжение будет ограничено 48 В, что допустимо для данной схемы.

Напряжение 48 В является типовым для множества промышленных применений, поэтому для такого напряжения существует широкий выбор недорогой элементной базы.

Диодный выпрямительный мост VD2 осуществляет преобразование переменного напряжения, поступающего с амортизатора-генератора.

Емкость C_1 осуществляет предварительное накопление части энергии, поступающей от амортизатора-генератора. Емкость имеет небольшой номинал для обеспечения корректной работы ККМ с коэффициентом коррекции мощности, близким к 1. При увеличении этой емкости характеристики ККМ будут ухудшаться, соответственно, рабочая характеристика амортизатора может отличаться от рассмотренной в параграфе 1.2.

Сопротивление R_2 и DA1 образуют делитель, напряжение с которого поступает на вход MULT микросхемы DA3. Форма этого напряжения учитывается при формировании управляющих сигналов, поступающих на ключевой элемент VT1, для обеспечения максимального коэффициента мощности, а также величины отбираемой энергии от амортизатора.

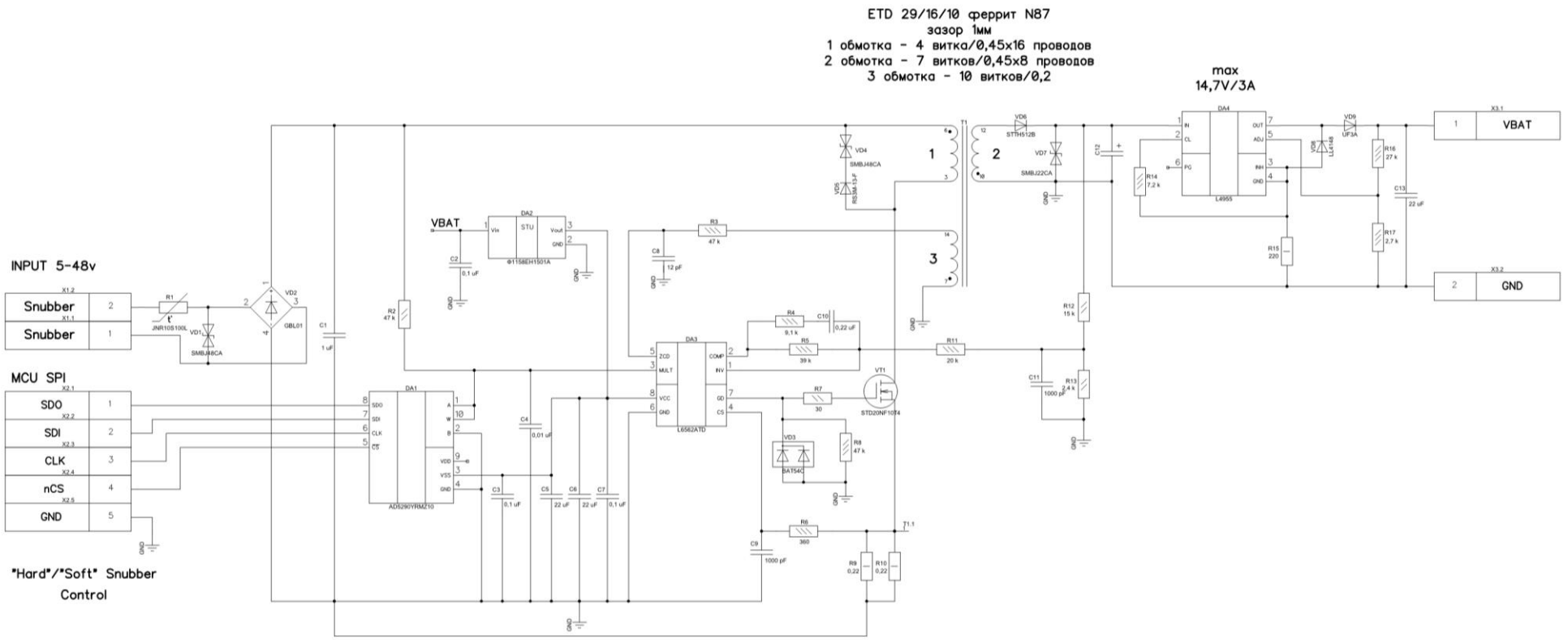


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески на элементах с высокой степенью интеграции

Микросхема DA1 представляет из себя цифровой потенциометр, который изменяет свое сопротивление в зависимости от командного слова, переданного на него микропроцессором. Изменяя сопротивление DA1, можно динамически менять характеристику амортизатора от мягкой до жесткой.

Емкость C_4 предназначена для снижения уровня электромагнитных помех по входу MULT.

Микросхема DA2 (интегральный линейный стабилизатор напряжения) стабилизирует питание микросхем DA1, DA3 при использовании бортовой сети автомобиля с верхним ограничением 15 В.

Емкости C_3, C_5, C_6, C_7 являются накопительными и фильтруют помехи, возникающие при работе микросхем DA1, DA3, а также проникающие из бортовой сети автомобиля. Номиналы элементов соответствуют типовым для надежной работы микросхемы DA2.

Цепочка из TVS-диода VD4 и диода VD5 ограничивает напряжение при обратном ходе (при закрывании транзисторного ключа VT1) уровнем 48 В.

Цепочка R_3, C_8 использует напряжение с обмотки 3 трансформатора для определения перехода тока, проходящего через его первичную обмотку 1, через ноль. В этот момент происходит переключение МОП-транзистора VT1 с минимальным уровнем помех и максимальным КПД.

Сопротивления R_9, R_{10} представляют собой датчики тока, напряжение на которых пропорционально токам, протекающим через первичную обмотку 1 трансформатора и ключевой транзистор VT1.

Сопротивление R_6 и емкость C_9 образуют делитель и сглаживающий фильтр, который подает сигнал с токовых шунтов (датчиков тока) на вывод CS микросхемы DA3 – токовый компаратор, который ограничивает максимальный ток в цикле работы обратноходового блока питания.

Цепочка $R_4C_{10}R_5R_{11}$ – петля обратной связи, обеспечивающая устойчивую работу микросхемы DA3.

Сопротивление R_7 ограничивает ток заряда паразитной емкости затвора транзистора VT1 на безопасном уровне в соответствии с документацией на микросхему DA3.

Сопротивление R_8 обеспечивает потенциал затвора VT1 равным потенциалу земли, следовательно, в случае выхода из строя микросхемы DA3 транзистор VT1 окажется в закрытом состоянии и не выйдет из строя.

Диод Шоттки VD3 ограничивает амплитуду паразитного выброса напряжения индуктивности токопроводящей дорожки от вывода 7 микросхемы DA3 до затвора транзистора VT1.

Через выпрямительный диод VD6 со вторичной обмотки 2 трансформатора напряжение поступает на TVS-диод VD7, предназначенный для ограничения максимального уровня выходного напряжения значением 22 В. Такой уровень напряжения является безопасным для микросхемы DA4 и конденсатора C_{12}. В случае значительного увеличения напряжения и тока выпрямительный диод VD6 выйдет из строя и разорвет цепь.

Делитель R_{12}, R_{13} устанавливает выходное напряжение преобразователя, емкость C_{11} фильтрует высокочастотные шумы и помехи с этого делителя.

Электролитический конденсатор C_{12} выполняет роль накопительного конденсатора.

Микросхема DA4 обеспечивает зарядный ток АКБ с ограничением ~6 А, что является безопасным для типовых АКБ емкостью от 50 А·ч и выше.

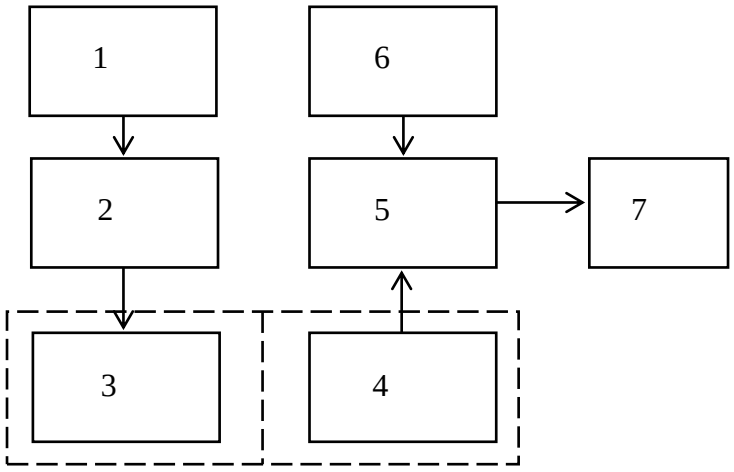
С помощью сопротивлений R_{16}, R_{17} ограничивают максимальное зарядное напряжение на уровне 14,4 В, а сопротивления R_{14}, R_{15} ограничивают выходной ток на уровне 6 А.

Диод VD9 защищает устройство от переполюсовки АКБ.

Конденсатор C_{13} обеспечивает стабильность работы микросхемы DA4 при отключенной АКБ и ограничивает помехи от проводов, подключенных к АКБ.

Печатная плата ИУС приведена в приложении В.

Функциональная схема экспериментальной установки № 2 для исследования ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески на элементах с высокой степенью интеграции показана на рисунке 3.14 [121].



1 – генератор сигналов специальной формы; 2 – усилитель;
3, 4 – вибромодули; 5 – ИУС демпфирования колебаний;
6 – блок питания; 7 – аккумуляторная батарея

Рисунок 3.14 – Функциональная схема экспериментальной установки № 2

Перечень измерительных приборов и оборудования, примененных при проведении экспериментальных исследований, представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Перечень измерительных приборов и оборудования для экспериментальной установки № 2

№ п/п	Наименование прибора	Марка прибора	Назначение прибора
1	Генератор сигналов специальной формы	АКИП-3409/5	Генерация сигнала, имитирущего микропрофиль дороги
2	Стереоусилитель	Cambridge Azur 351A	Усиление сигнала, поступающего с генератора
3	Блок питания	HY1803D	Питание разработанной системы постоянным напряжением
4	Осциллограф-мультиметр	АКИП-4125/2А	Наблюдение параметров исследуемого сигнала
5	Аккумуляторная батарея	POWERMAN CA1270/UPS	Накопление заряда

Работает установка следующим образом [121].

Генератор 1 сигналов специальной формы обеспечивает возможность генерации сложных сигналов. Параметры сигналов, которые имитируют микропрофиль дороги, задаются в пакете MATLAB/Simulink, как указано в параграфе 3.1. Выходной уровень сигнала напряжения – до ±5 В, тока – до 10 мА.

Стереоусилитель 2 усиливает сигнал с генератора 1.

Для имитации работы электромагнитного амортизатора используется связка из двух одинаковых вибромодулей 3, 4, соединенных между собой (рисунок 3.14).

При подаче усиленного сигнала на вибромодуль 3 его поверхность начинает вибрировать синхронно с поданным сигналом.

Вибромодуль конструктивно представляет собой замкнутую магнитную систему, включающую звуковую катушку, кольцевой постоянный магнит, а также керн Т-образной формы из мягкого магнитного материала и фланцевые элементы (рисунок 3.15).

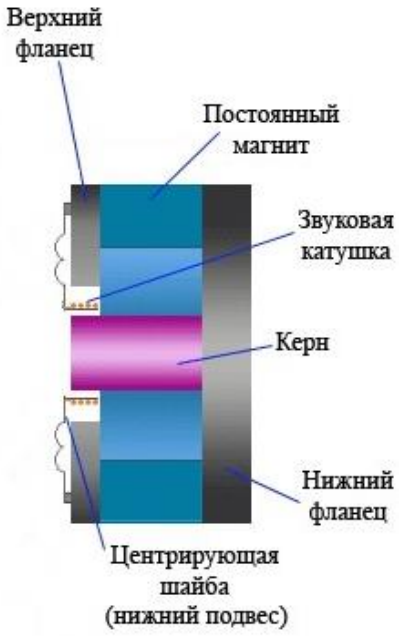


Рисунок 3.15 – Схема вибромодуля

Вибромодуль 4 функционирует как преобразователь, трансформирующий механические колебания обратно в электрический сигнал. Внешний вид вибромодулей показан на рисунке 3.16.

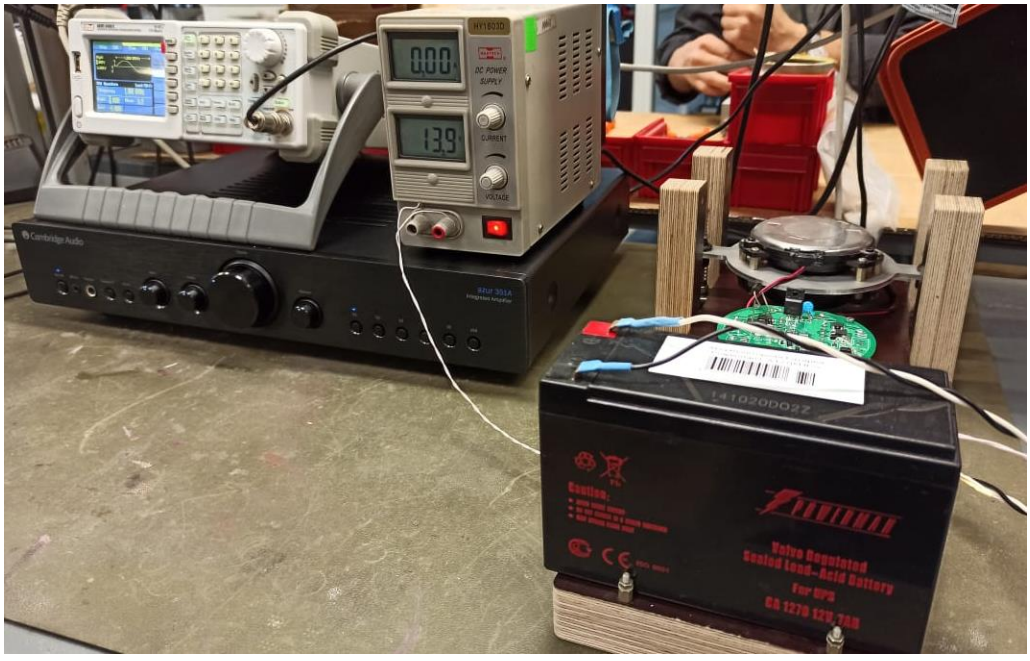


Рисунок 3.16 – Вибромодули

ИУС 5 демпфирования колебаний подвески осуществляет эффективный отбор энергии от амортизатора, благодаря чему достигается необходимая интенсивность затухания колебаний, как указано в параграфе 1.1.

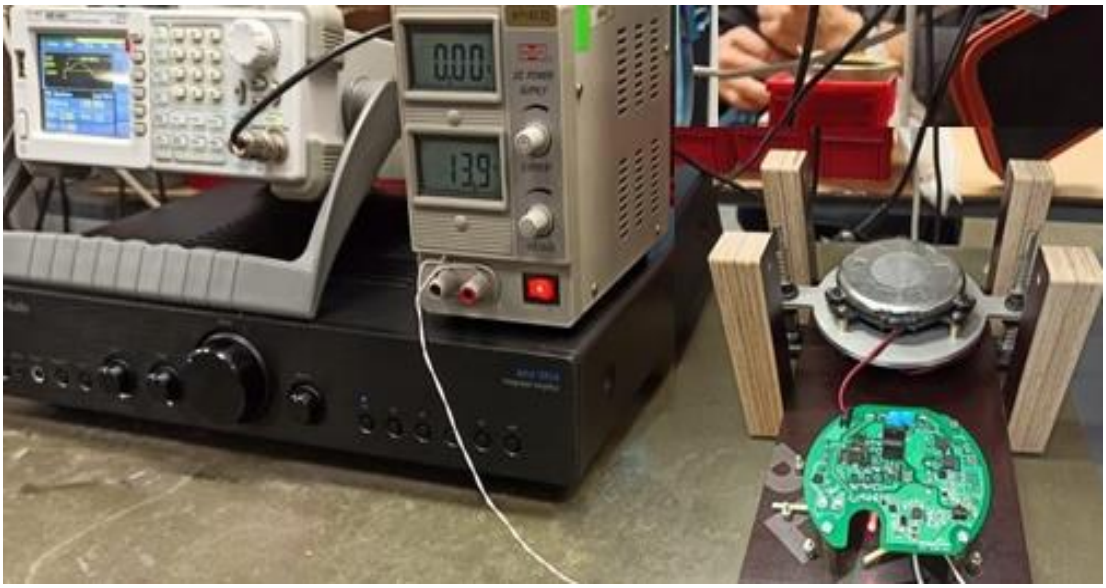
Энергия поступает для заряда аккумуляторной батареи 7.

Внешний вид установки № 2 для проведения экспериментальных исследований показан на рисунке 3.17 (а, б).



а)

Рисунок 3.17 – Экспериментальная установка № 2



б)

Рисунок 3.17 – Экспериментальная установка № 2

Для наблюдения электрических сигналов в различных точках схемы используется осциллограф-мультиметр.

С целью определения максимально возможных параметров преобразователя в установке вместо генератора сигналов специальной формы и усилителя на вход вибромодуля подавался сигнал от сети 50 Гц, 220 В через понижающий трансформатор.

Осциллограммы, полученные в результате эксперимента, приведены на рисунке 3.18.

На рисунке 3.18 (а) верхний график соответствует сигналу напряжения на затворе транзистора, нижний – току, протекающему через транзистор.

На рисунке 3.18 (б) график 1 показывает сигнал напряжения на затворе транзистора, график 2– напряжение на стоке транзистора.

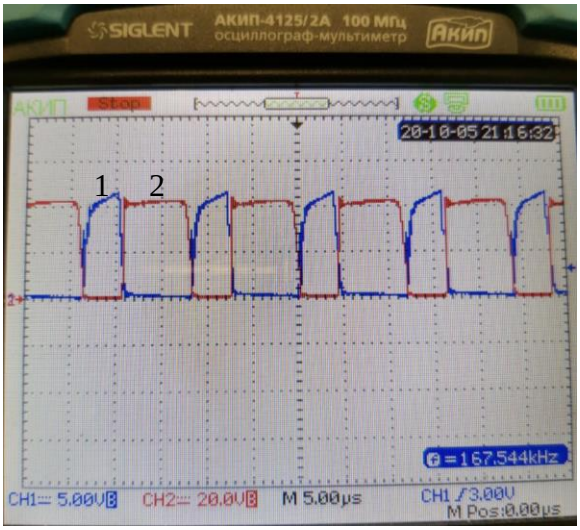
На рисунке 3.18 (в) верхний график соответствует сигналу напряжения после диодного моста на накопительном конденсаторе, нижний – току накачки через сопротивление – шунт транзистора.

Последняя осциллограмма показывает, что потребляемый электрический ток пропорционален входному напряжению. Таким образом, устройство отбора энергии в ИУС является квази-активной нагрузкой и имитирует обычное

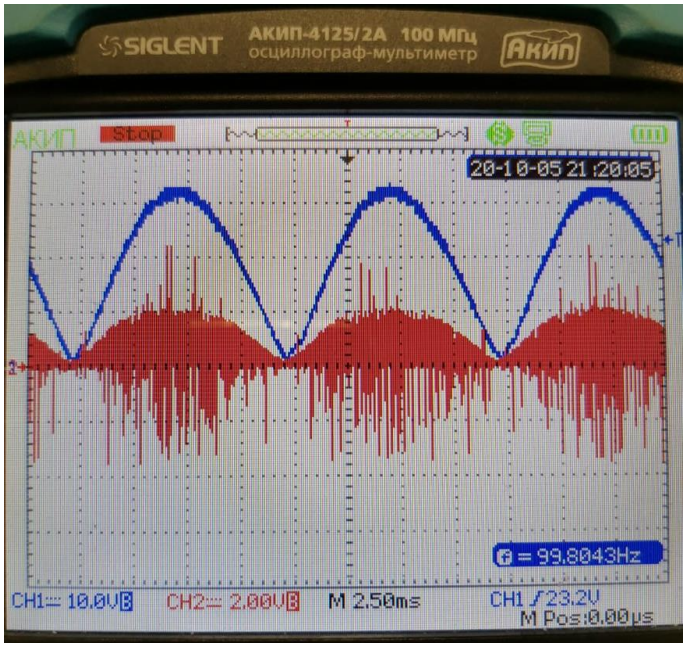
сопротивление, значение которого динамически изменяется микросхемой под контролем микропроцессора, что позволяет гибко настраивать характеристики амортизатора.



а)



б)



в)

Рисунок 3.18 – Осциллограммы, полученные при работе ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески на элементах с высокой степенью интеграции

Из осциллограмм видно, что коммутация силового ключа происходит в моменты времени, когда переключаемый ток равен нулю. Значит, разработанная

информационно-управляющая система демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески позволяет отбирать энергию колебаний эффективным образом.

3.3 Выводы по третьей главе

1. Разработана имитационная модель построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески в среде Simulink, отличительной особенностью которой является возможность моделирования разных условий эксплуатации при движении по дорогам различного профиля.

2. Предложены технические решения, реализующие способы построения электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, отличительной особенностью которых является возможность регулирования характеристики амортизатора, т.е. возможность адаптации амортизатора к условиям эксплуатации.

3. Проведено экспериментальное исследование, подтвердившее работоспособность электронной ИУС демпфирования колебаний, ее автоматическое реагирование на изменение микропрофиля дороги и способность осуществлять рекуперацию энергии.

4. Результаты моделирования работы электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески в среде Simulink соответствуют результатам эксперимента.

4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИСПЫТАНИЙ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПОДВЕСКИ

4.1 Анализ результатов исследования

В результате проведенного экспериментального исследования и имитационного моделирования электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески установлено, что экспериментальный результат полностью подтверждает имитационную модель.

Электронная ИУС демпфирования колебаний осуществляет эффективный отбор энергии от амортизатора, что обеспечивает функционирование адаптивной подвески с автоматическим регулированием характеристик.

Ток в цепи истока управляющего ключевого транзистора определяется по падению напряжения на сопротивлении шунта, $R_ш$=0,11 Ом, $U_ш$=2 В (нижний сигнал на рисунке 3.18 (в)).

При значениях коэффициента γ заполнения ШИМ-сигнала, близких к 1, рассчитывается максимальное действующее значение силы тока I, А:

$$I = \frac{U_ш}{R_ш\sqrt{2}} = \frac{2}{0{,}11\sqrt{2}} \approx \frac{18{,}2}{\sqrt{2}} \approx 12{,}9. \quad (4.1)$$

Действующее значение напряжения U, В рассчитывается при максимальном значении напряжения U_m=30 В (верхний сигнал на рисунке 3.18 (в)):

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx \frac{30}{\sqrt{2}} \approx 21{,}3. \quad (4.2)$$

При средних значениях γ действующее значение силы тока: $I\sqrt{\gamma} \approx 6$ А.

Следовательно, отбираемая от механической системы мощность P, Вт:

$$P = U \cdot I\sqrt{\gamma} \approx 21{,}3 \cdot 6 \approx 128. \quad (4.3)$$

С учетом КПД η преобразователя (η ~ 85% – 90%) выходная мощность $P_{вых}$, Вт:

$$P_{вых} = \eta \cdot P \approx 110. \quad (4.4)$$

Вырабатываемой мощности достаточно для подзарядки типовой АКБ.

Важно подчеркнуть, что величина отбираемой энергии не является постоянной, а зависит от дорожных условий и требуемой амортизаторной характеристики.

Таким образом, предложенная электронная информационно-управляющая система демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески позволяет осуществлять рекуперацию энергии с КПД порядка 90%, способствуя разгрузке автомобильного генератора и снижению общего потребления топлива двигателем. Полученную в результате рекуперации энергию можно использовать в разных целях: для подзарядки АКБ, для питания радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на транспортных средствах, для сигнализации о вибрации в системе охраны спецаппаратной и т.д.

Рекуперативный эффект разработанной ИУС особенно значим для транспортных средств, испытывающих недостаток электрической энергии, например, это очень актуально для электромобилей [122].

Итак, экспериментальные исследования подтвердили положенный в основу построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной подвески принцип, заключающийся в преобразовании энергии механических колебаний в электрическую энергию, с возможностью ее последующего использования, например, для заряда АКБ.

4.2 Эффективность применения адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески

Модель построения предложенной адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески может

быть использована при разработке и создании систем виброзащиты, востребованных как в гражданской промышленности, так и в оборонной сфере.

Внедрение магнитных демпферов позволяет реализовать инновационный подход к гашению колебаний, совмещая адаптивность управления с функцией регенерации энергии.

Электромагнитные амортизаторы повышают надежность техники и снижают вредное воздействие на окружающую среду. Отсутствие рабочей жидкости исключает зависимость характеристик устройства от температурных колебаний, что критически важно при эксплуатации в арктических широтах. Переход на данный тип амортизаторов позволяет снизить трудозатраты на обслуживание автомобильной техники и сократить общие расходы по ее содержанию.

4.2.1 Эффективность применения адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний на транспортных средствах

Наибольшую эффективность электромагнитные рекуперативные амортизаторы показывают при эксплуатации на тяжелых транспортных средствах. К примеру, каждый из шести амортизаторов, установленный на трехосном грузовике, мог генерировать, в среднем, до одного киловатта электроэнергии при движении по дороге со стандартным асфальтовым покрытием. Мощности, получаемой от всех амортизаторов, вполне достаточно, чтобы заменить энергию, вырабатываемую обычным генератором переменного тока автомобиля [7, 54]. Для транспортных средств, которые эксплуатируются преимущественно по дорогам с покрытием низкого качества или без покрытия, величина рекуперируемой энергии существенно выше.

Очевидно, что применение рекуперативных амортизаторов позволит снизить расход топлива, улучшить экологическую обстановку.

Анализ эффективности использования рекуперативных амортизаторов показывает снижение расхода топлива до 4 – 6% для тяжелых транспортных

средств, в частности военных автомобилей [7, 54, 72], что является очень неплохим экономическим показателем.

Разработанная ИУС демпфирования колебаний позволяет автоматически учитывать подрессоренную массу транспортного средства и соответствующим образом изменять коэффициент демпфирования подвески.

В соответствии с формулой (1.3) $\frac{\psi_1}{\psi_2} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}}$ с изменением подрессоренной массы от M_1 до M_2 коэффициент ψ изменяется, плавность хода ухудшается (рисунок 1.2). Использование адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний позволяет поддерживать относительный коэффициент затухания колебаний ψ в необходимых пределах.

Эффективность применения разработанной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески оценена для полноприводного двухосного автомобиля КамАЗ-4350 из серии «Мустанг», ориентированной на нужды армии. Следует отметить, что для других моделей данного семейства расчетные значения могут отличаться. КамАЗ-4350 (колесная формула 4х4) является многоцелевым транспортным средством, используемым для транспортировки военных грузов, перевозки личного состава, буксировки артиллерийских систем и монтажа спецвооружения.

Снаряженная масса КамАЗа-4350 – 7,7 т, предельная грузоподъемность – 4 т, а его полная масса – 11,9 т. Допустимые осевые нагрузки ограничены следующими значениями: 5,3 т для передней оси и 6,6 т для задней оси [123].

Масса КамАЗа-4350 при средней нагрузке составляет 9,8 тонн.

Средняя нагрузка на одно колесо M_0, т, равна:

$$M_0 = \frac{9{,}8}{4} = 2{,}45. \quad (4.5)$$

Минимальная нагрузка M_1, т:

$$M_1 = \frac{7{,}7}{4} = 1{,}925. \quad (4.6)$$

Максимальная нагрузка M_2, т:

$$M_2 = \frac{11{,}9}{4} = 2{,}975. \tag{4.7}$$

Приведенная масса на одно колесо m для случаев (4.5) – (4.7) определяется соответственно соотношениями (4.8) – (4.10):

$$m_0 = \frac{M_0}{M_0} = \frac{2{,}45}{2{,}45} = 1. \tag{4.8}$$

$$m_1 = \frac{M_1}{M_0} = \frac{1{,}925}{2{,}45} \approx 0{,}79. \tag{4.9}$$

$$m_2 = \frac{M_2}{M_0} = \frac{2{,}975}{2{,}45} = 1{,}21. \tag{4.10}$$

С учетом формулы (1.3) определяется приведенный относительный коэффициент затухания $\tilde{\psi}$:

$$\tilde{\psi} = \frac{\psi}{\psi_0} \sim \frac{1}{\sqrt{m}}. \tag{4.11}$$

Тогда

$$\tilde{\psi}_1 \sim \frac{1}{\sqrt{m_1}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}79}} \approx 1{,}13. \tag{4.12}$$

$$\tilde{\psi}_2 \sim \frac{1}{\sqrt{m_2}} = \frac{1}{\sqrt{1{,}21}} \approx 0{,}91. \tag{4.13}$$

$$\tilde{\psi}_0 \sim \frac{1}{\sqrt{m_0}} = 1. \tag{4.14}$$

Графики зависимости приведенного относительного коэффициента затухания $\tilde{\psi}$ от приведенной массы m показаны на рисунке 4.1 [124].

Изменение массы приводит к изменению коэффициента $\tilde{\psi}$ и, соответственно, снижению плавности хода. С адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески $\tilde{\psi}_0 = 1$.

Из графиков и расчетов следует, что

$\Delta\tilde{\psi}_1 = 1{,}13 - 1 = 0{,}13$, $\Delta\tilde{\psi}_2 = 1 - 0.91 = 0{,}09$.

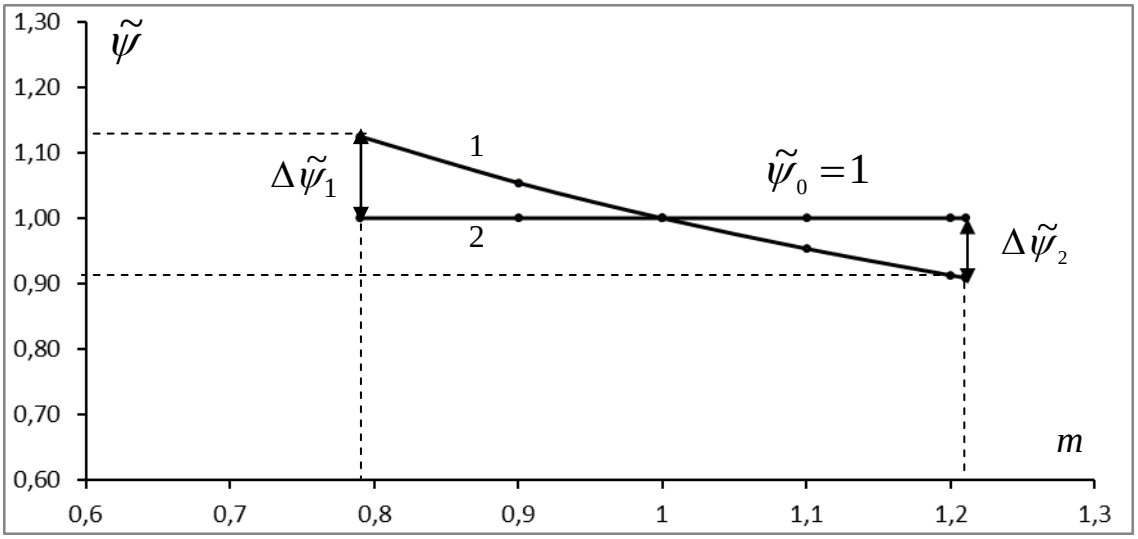


Рисунок 4.1 – Графики зависимости приведенного относительного коэффициента затухания $\tilde{\psi}$ от приведенной массы m без адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний (1) и с ней (2)

Таким образом, применение разработанной ИУС позволяет улучшить плавность хода на 9 – 13%.

Для расчета АЧХ колебательного процесса подрессоренной массы грузового автомобиля использовалась формула [33]:

$$\frac{z_a}{q_0} = \omega_0 \sqrt{\frac{4\psi_0^2 \nu^2 + \omega_0^2}{\left(\omega_0^2 - \nu^2\right)^2 + 4\psi_0^2 \nu^2 \omega_0^2}}, \qquad (4.15)$$

где $\frac{z_a}{q_0}$ – относительная амплитуда колебаний;

q_0 – амплитуда высот дорожных неровностей;

ω_0 – парциальная частота колебаний подрессоренной массы, $с^{-1}$;

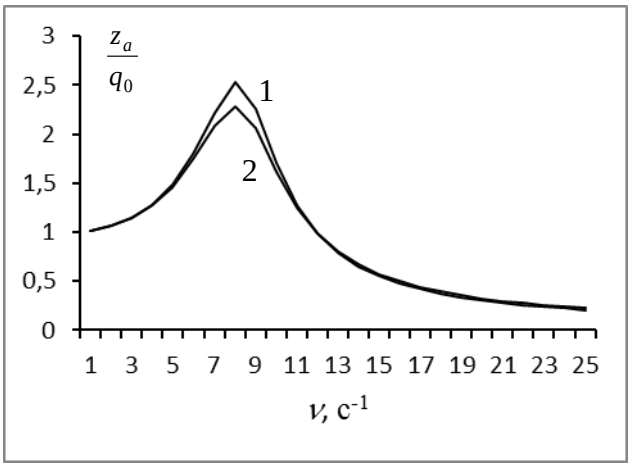
ψ_0 – относительный коэффициент затухания колебаний подрессоренной массы (параграф 1.1);

ν – частота возмущающей силы, $с^{-1}$, определяемая соотношением (1.10).

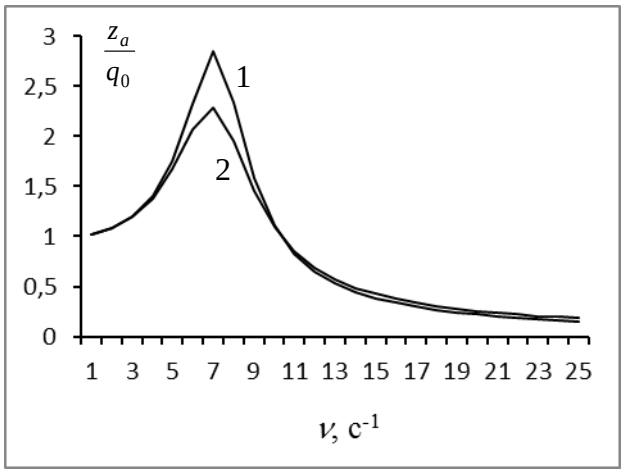
Расчеты проводились для передней и задней осей автомобиля КамАЗ-4350 при полной массе. Жесткость рессор: $c_р$=178182 Н/м (передняя), $c_р$=192231 Н/м (задняя). Средний коэффициент сопротивления амортизаторов: $\kappa_{ср}$=10000 Н·с/м [72].

Поскольку при использовании адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний удается поддерживать относительный коэффициент затухания колебаний ψ в необходимых пределах, для расчетов было выбрано значение ψ_0=0,25, как и в ИУС демпфирования колебаний на микроконтроллере, функциональная схема которой представлена на рисунке 2.8 параграфа 2.2.

На рисунке 4.2 показаны АЧХ колебательного процесса подрессоренной массы передней оси (а) и задней оси (б) без адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески (1) и с ней (2).



а)



б)

Рисунок 4.2 – АЧХ колебательного процесса подрессоренной массы передней оси (а) и задней оси (б) грузового автомобиля без адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний (1) и с ней (2)

Из графиков и расчетов следует, что применение адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески позволяет уменьшить амплитуду колебаний подрессоренной массы полностью нагруженного автомобиля в резонансной области.

Таким образом, адаптивная ИУС способствует улучшению демпфирующих свойств подвески и защищенности перевозимого оборудования в различных дорожных условиях.

4.2.2 Эффективность применения адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний для виброзащиты радиоэлектронной аппаратуры, устанавливаемой на транспортных средствах

В современных образцах техники, комплексах и системах гражданского и военного назначения широко используется РЭА. Применение электромагнитных систем демпфирования позволит повысить виброустойчивость РЭА. Предложенный способ регулирования демпфирующих свойств подвески путем регулировки электрического тока в катушке магнитного амортизатора обеспечивает эффективное гашение возникающих вибраций и надежную виброзащиту радиоэлектронной аппаратуры.

Это даст возможность выполнить требования по стойкости к воздействию внешних механических факторов, предъявляемые:

– ГОСТ 25467-82 [125] к изделиям электронной техники производственно-технического назначения по группам исполнения М3 (аппаратура и приборы, работающие на ходу, устанавливаемые на промышленных передвижных машинах и на неподвижном технологическом оборудовании), М4 (носимая аппаратура и приборы, работающие на ходу; аппаратура и приборы, устанавливаемые на сухопутном и водном транспорте), М5 (аппаратура, работающая на ходу, устанавливаемая на тракторах и гусеничных машинах и водном транспорте, а также на технологическом оборудовании и сухопутном транспорте, если частота вибрации превышает 80 Гц), М6 (аппаратура, устанавливаемая на объектах,

имеющих мощные источники вибрации, а также для общего применения в промышленности при условии, что частота вибрации превышает 200 Гц);

– ГОСТ РВ 20.39.414.1-97 [126] к изделиям военной техники по группам исполнения 2У (аппаратура, устанавливаемая на подвижных наземных объектах, вертолетах, в центральной зоне дозвуковых самолетов) и 3У (аппаратура дозвуковых самолетов, кроме размещаемой вблизи двигателей и непосредственно на двигателях; аппаратура управляемых и оперативно-тактических ракет, размещаемая в головной зоне).

Применение электронной ИУС демпфирования колебаний позволит модернизировать существующую аппаратуру, отвечающую более низким требованиям по стойкости к воздействию внешних механических факторов, до требований перечисленных групп исполнения.

При этом следует отметить, что подобный расчет для разработчика будет составлять 7-10% от трудоемкости полномасштабной НИОКР, что связано с доработкой по большей части уже действующей конструкторской документации и проведения испытаний только в части подтверждения стойкости к воздействию внешних механических факторов.

Для заказчика финансирование работ составит около 10% от стоимости разработки аппаратуры, отвечающей более высоким требованиям по стойкости к воздействию внешних факторов. Это определяется использованием при создании опытных образцов серийно изготавливаемой аппаратуры, сокращенным объемом разрабатываемой конструкторской документации и неполным объемом испытаний.

Такой подход будет эффективен в условиях дефицита трудовых ресурсов, ограниченного объема финансирования, сжатых сроках реализации проекта, сохранения и улучшения необходимых тактико-технических характеристик модернизируемой аппаратуры.

Результаты диссертационных исследований были использованы АО «НПО «Рязаньприбор» при испытаниях модернизированной АОТ ПД изделия 5Я67М, а также реализованы в Восьмом управлении Генерального штаба ВС РФ в ходе

работ по улучшению технических характеристик аппаратуры ПД-441-01, разработанной для передачи специальных данных и эксплуатируемой в воинских частях и организациях МО РФ (приложение Г).

Предложенные автором технические решения позволяют расширить классификационную группу эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры военного назначения с 1.1 (аппаратура стационарных помещений, сооружений) до 1.3 (аппаратура объектов на колесных и гусеничных шасси, не имеющих противопульного бронирования и артиллерийско-минометного вооружения) согласно ГОСТ РВ 20.39.304-98 [22] по сравнению со стандартными техническими решениями, а также повысить защищенность элементов РЭА, применяемых для обработки специальных данных, от несанкционированного доступа.

Подводя итог, следует подчеркнуть, что применение разработанной информационно-управляющей системы позволяет улучшить плавность хода на 9 – 13%, способствуя защищенности перевозимого оборудования в различных дорожных условиях, снизить расход топлива для тяжелых транспортных средств, в частности военных автомобилей, а также расширить классификационную группу эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры, отвечающей более низким требованиям по стойкости к воздействию внешних механических факторов, до требований более высоких групп исполнения.

4.2.3 Рекомендации по направлениям дальнейших исследований

Тема автоматически регулируемых рекуперативных подвесок становится все более актуальной, она обладает значительным исследовательским потенциалом.

Развитие демпфирующих систем в автомобилестроении сегодня ориентировано на внедрение инновационных электронных систем и поиск новых инженерных решений. Амортизаторы нового поколения представляют собой

высокотехнологичные устройства, которые являются основой «умных» подвесок, способных мгновенно адаптироваться к меняющимся дорожным условиям.

Использование подобных систем в автомобилях будет способствовать новому уровню комфорта, улучшенной управляемости и повышенной безопасности при эксплуатации транспортных средств.

Также широкие возможности открываются при использовании электромагнитных систем демпфирования при виброзащите РЭА, устанавливаемой на транспортных средствах.

Анализ эффективности применения адаптивной электронной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески показывает целесообразность ее использования на транспортных средствах (особенно на электрической тяге), а также при разработке активных систем гашения колебаний РЭА.

Вместе с тем остается много неисследованных вопросов.

Опытно-конструкторские работы (ОКР) должны быть направлены на согласование совместной работы адаптивной электронной информационно-управляющей системы и механической части магнитного рекуперативного амортизатора в условиях применения на образцах АТ, разработку магнитного амортизатора, обладающего высокой надежностью, эффективностью, экономически обоснованной себестоимостью.

Желательно также провести ОКР по согласованию уровней и температурных коэффициентов напряжений выходного преобразователя ИУС демпфирования колебаний и АКБ, используемых для питания бортовой сети или РЭА.

За рамками диссертационного исследования остались вопросы согласования работы ИУС демпфирования колебаний с другими управляющими системами автомобиля, а также согласование работы устанавливаемых на АТС амортизаторов между собой.

В перспективе в адаптивную информационно-управляющую систему демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески можно

ввести дополнительные датчики: датчик ускорения кузова, датчики угла поворота руля, скорости вращения колес, боковых ускорений, датчик торможения и др. Возможна установка датчика неровностей дороги, например, в виде камеры в передней части автомобиля. К моменту, когда колесо наедет на препятствие, подвеска будет готова к нему за счет опережающего изменения коэффициента демпфирования.

Следует исследовать вопросы установки дополнительных датчиков и использования встроенных автомобильных датчиков для совершенствования адаптивной ИУС демпфирования колебаний.

4.3 Выводы по четвертой главе

1. Предложенная информационно-управляющая системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески позволяет осуществлять рекуперацию энергии с КПД порядка 90%, тем самым снижая нагрузку на генератор и двигатель ТС. Преобразованная системой энергия может быть использована для подзарядки аккумуляторной батареи, для питания РЭА и т.д.

2. Применение разработанной ИУС демпфирования колебаний позволяет улучшить плавность хода ТС на 9 – 13% за счет поддерживания относительного коэффициента затухания колебаний ψ в необходимых пределах, способствуя тем самым защищенности перевозимого оборудования в различных дорожных условиях.

3. Предложенные автором технические решения позволяют расширить классификационную группу эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры военного назначения с 1.1 до 1.3 согласно ГОСТ РВ 20.39.304-98 по сравнению со стандартными техническими решениями, а также повысить защищенность элементов РЭА, применяемых для обработки специальных данных, от несанкционированного доступа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы разработана адаптивная электронная информационно-управляющая система демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески.

В ходе исследований получены следующие основные результаты и сформулированы выводы.

1. Проведенный анализ современного состояния систем демпфирования колебаний показал, что применение электромагнитных амортизаторов позволяет осуществлять рекуперацию энергии и активное демпфирование колебаний, но в настоящее время для электромагнитных подвесок недостаточно разработаны эффективные электронные управляющие системы.

2. Предложен способ регулирования демпфирующих свойств подвески за счет управления электрическим током, отбираемым от электромагнитного амортизатора с помощью адаптивной ИУС на основе широтно-импульсной модуляции, позволяющий за счет регулирования отбираемой мощности изменять силу сопротивления демпфирующего устройства по любому закону, и получить автоматически управляемую адаптивную подвеску.

3. Проведено теоретическое обоснование построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, отличительными особенностями которой являются:

– получение необходимой амортизаторной характеристики за счет регулирования отбираемой мощности в соответствии с выявленными закономерностями;

– преобразование энергии механических колебаний в электрическую энергию с КПД порядка 90%, с возможностью ее последующего использования, например, для заряда аккумуляторной батареи, при сохранении демпфирующих характеристик амортизатора;

– возможность изменения амортизаторной характеристики за короткое время (~ 1 мс), в том числе и в автоматическом режиме.

Предложенные основы построения ИУС могут быть использованы как для демпфирования колебаний АТС, так и РЭА, устанавливаемой на транспортных средствах.

4. Разработаны функциональные схемы устройств, составляющих ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, позволяющие получить необходимую амортизаторную характеристику; показаны возможности регулирования данной характеристики электронным способом, в частности для автоматического учета подрессоренной массы.

5. Разработана имитационная модель построения адаптивной электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески в среде Simulink, отличительной особенностью которой является возможность моделирования разных условий эксплуатации при движении по дорогам различного профиля.

6. Предложены технические решения построения электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, отличительной особенностью которых является возможность регулирования характеристики амортизатора, т.е. возможность адаптации амортизатора к условиям эксплуатации.

7. Проведено экспериментальное исследование, подтвердившее работоспособность электронной ИУС демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески, ее автоматическое реагирование на изменение микропрофиля дороги и способность осуществлять рекуперацию энергии.

8. Предложенная ИУС демпфирования колебаний позволяет осуществлять рекуперацию энергии с КПД порядка 90%, тем самым снижая нагрузку на генератор и двигатель АТС. Преобразованная системой энергия может быть использована для подзарядки аккумуляторной батареи, для питания РЭА и т.д.

9. Применение разработанной ИУС позволяет улучшить плавность хода ТС на 9 – 13%, способствуя тем самым защищенности перевозимого оборудования в различных дорожных условиях.

10. Предложенные автором технические решения позволяют расширить классификационную группу эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры военного назначения с 1.1 до 1.3 согласно ГОСТ РВ 20.39.304-98 по сравнению со стандартными техническими решениями, а также повысить защищенность элементов РЭА, применяемых для обработки специальных данных, от несанкционированного доступа.

Научная и практическая значимость результатов исследования подтверждается их реализацией в Восьмом управлении Генерального штаба ВС РФ, в АО «НПО «Рязаньприбор», учебном процессе РВВДКУ, бронзовой медалью на XXV Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед 2022».

Важнейшей решенной в диссертационной работе задачей является возможность быстрого изменения демпфирующих свойств электромагнитной подвески в зависимости от условий эксплуатации за счет применения электронной адаптивной ИУС, а также возможность рекуперации энергии. Разработанные автором научные положения, предложенные схемы и технические решения, позволяющие осуществлять активное гашение колебаний, могут быть использованы при совершенствовании существующих и создании новых перспективных информационно-измерительных и управляющих систем.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АД – амортизатор демпфированный

АКБ – аккумуляторная батарея

АО – акционерное общество

АОТ ПД – аппаратура образования тракта передачи данных

АР – авторегрессия

АПН – амортизатор пространственного нагружения

АПНМ – амортизатор пространственного нагружения повышенной механической прочности

АПП – амортизатор пружинно-полимерный

АТ – автомобильная техника

АТС – автотранспортное средство

АФД – амортизатор с фрикционным демпфированием

АЦП – амортизатор цельнометаллический пружинный

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

ВАК – Высшая аттестационная комиссия

ВДВ Воздушно-десантные войска

ВС – Вооруженные Силы

ИИУС – информационно-измерительные и управляющие системы

ИМС – интегральная микросхема

ИУС – информационно-управляющая система

ККМ – корректор коэффициента мощности

КПД – коэффициент полезного действия

МО – Министерство обороны

НИОКР – научно-исследовательская опытно-конструкторская работа

НПО – научно-производственное объединение

ОГУ – Орловский государственный университет

ОЗУ – оперативное запоминающее устройство

ОКР – опытно-конструкторская работа

РВВДКУ – Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище

РФ – Российская Федерация

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

СТУ – Современный технический университет

ТКН – температурный коэффициент напряжения

ТС – транспортное средство

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ШИМ – широтно-импульсная модуляция

ЭБУ – электронный блок управления

ЭДС – электродвижущая сила

ЭСАУ – электронная система автоматического управления

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2799872 C1 Российская Федерация, МПК F16F15/03, B60G13/14, H02K41/02. Рекуперативный амортизатор на основе линейного электродвигателя с постоянными магнитами: № 2023105791: заявл. 13.03.2023: опубл. 13.07.2023 / Миронов Д. В., Хамитов Р. Н., Посметьев В. И., Никонов В. О., Проговоров А. П., Матери И. В., Рослов С. В., Мирончик А. С. – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

2. Патент № 2668775 C2 Российская Федерация, МПК F16F6/00, F16F15/03, B60G13/14. Электромагнитный амортизатор: № 2015147900: заявл. 06.11.2015: опубл. 02.10.2018 / Миханошин В. В. – 10 с.: ил. – Текст: непосредственный.

3. Патент № 2529425 C1 Российская Федерация, МПК F16F6/00, B60G13/14. Система управления электроамортизатором-преобразователем подвески транспортного средства: № 2013124353/: заявл. 27.05.2013: опубл. 27.09.2014 / Сергиенко А. Н., Любарский Б. Г., Медведев Н. Г., Сергиенко Н. Е., Худолий А. И. – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.

4. Zuo, L. Energy Harvesting, Ride Comfort, and Road Handling of Regenerative Vehicle Suspensions / L. Zuo, P.-S. Zhang // Journal of Vibration and Acoustics. – February 2013. – Vol. 135. – Pp. 011002-1 – 011002-8.

5. Nam, K. H. Linear electric generation system to harvest vibration energy from a running vehicle / K. H. Nam, Y. D. Chun, Yu-Syn Ha, J. H. Kim // JVE International LTD. Journal of Vibroengineering. – September 2017. – Vol. 19, Issue 6. – Pp. 4009-4017.

6. Электромагнитная подвеска – как она устроена? – Текст: электронный // auto.today: [сайт]. – 2022.– URL: https://auto.today/bok/3108-elektromagnitnaya-podveska-kak-ona-ustroena.html (дата обращения: 25.01.22).

7. GenShock – система подвески, выполняющая функцию регенерации энергии. – Текст: электронный // drive2.ru: [сайт]. – 2024. – URL: https://www.drive2.ru/c/668092/ (дата обращения: 10.12.2024).

8. Набокин, А. В. Повышение эффективности автомобилей за счет рекуперации энергии их агрегатов и систем / А. В. Набокин, В. И. Посметьев, В. О. Никонов. – Текст: непосредственный // Воронежский научно-технический Вестник. – 2016. – Т. 4, № 4 (18). – С. 11-19.

9. Патент № 2286491 C2 Российская Федерация, МПК F16F6/00, F16F9/34. Магнитный амортизатор: № 2004111907/11: заявл. 19.04.2004: опубл. 27.10.2006 / Гусев Е. П., Ковалев В. В., Цыганов А. В. – 6 с.: ил. – Текст: непосредственный.

10. Патент № 2298118 C1 Российская Федерация, МПК F16F6/00. Магнитный амортизатор: № 2005135383/11: заявл. 14.11.2005: опубл. 27.04.2007 / Григорчук В. С. – 9 с.: ил. – Текст: непосредственный.

11. Патент № 2411404 C1 Российская Федерация, МПК F16F9/53, F16F15/03. Управляемое устройство гашения колебаний: № 2009137259/11: заявл. 09.10.2009: опубл. 10.02.2011 / Крамаренко Е. Ю., Хохлов А. Р., Степанов Г. В., Викуленков А. В., Сельков Д. А., Успенский Е. С., Подволоцкий А. Г., Чертович А. В. – 10 с.: ил. – Текст: непосредственный.

12. Patent US 6952060 B2, F16F15/03, B60G17/0157. Electromagnetic Linear Generator and Shock Absorber: Oct. 4, 2005 / Goldner, R. B., Zerigian, P. – 54 p.

13. Zhang, Z. Application of Linear Switched Reluctance Motor for Active Suspension System in Electric Vehicle / Z. Zhang, N. C. Cheung, K. W. E. Cheng // World Electric Vehicle Journal – 2010. – Vol. 4. – Pp. 14-21.

14. Gupta, A. Design of electromagnetic shock absorbers / A. Gupta, A. J. Jendrzejczyk, M. T. Mulcahy, R. J. Hull // Int. J. Mech. Mater. Design. – 2006. – No. 3, Vol. 3. – Pp. 285–291.

15. Sultoni, A. I. Prototyping, testing and control energy for active-regenerative electromagnetic shock absorber based quarter car model / A. I. Sultoni, I. N. Sutantra, A. S. Pramono // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 20th April 2015. – Vol. 74, No. 2. – Pp. 241-248.

16. Котиев, Г. О. Методика подбора характеристик управляемой подвески с двумя уровнями демпфирования многоосных колесных машин / М. М. Жилейкин,

Г. О. Котиев, Е. Б. Сарач. – Текст: электронный // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана.– 2012. – № 2. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-podbora-harakteristik-upravlyaemoy-podveski-s-dvumya-urovnyami-dempfirovaniya-mnogoosnyh-kolesnyh-mashin/viewer (дата обращения: 10.12.2024).

17. Новиков В. В. Математическое моделирование пространственной пневматической подвески автомобиля с комбинированной демпфирующей системой / В. В. Новиков, И. М. Рябов, А. В. Поздеев, К. В. Чернышов, Д. А. Чумаков. – Текст: непосредственный // Вестник машиностроения. – 2023. – Том 102, № 7. – С. 542-548.

18. Патент № 2750348 C1 Российская Федерация, МПК F16F9/48. Амортизатор: № 20201411246: заявл. 14.12.2020: опубл. 28.06.2021 / Новиков В. В., Чернышов К. В., Поздеев А. В., Подошвин Д. А. – 12 с.: ил. – Текст: непосредственный.

19. Новиков, В. В. Гидравлический амортизатор с переменным сопротивлением / В. В. Новиков, И. М. Рябов, К. В. Чернышов, А. В. Поздеев, Г. В. Марков. – Текст: непосредственный // Вестник науки и образования. – 2018. – № 6 (42), Том 1.– С. 7-12.

20. Круглов С. П. Адаптивный магнитореологический амортизатор в подвеске транспортного средства с регулируемой жесткостью / С. П. Круглов, И. А. Заковырин. – Текст: непосредственный // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – Том 76, № 9. – С. 419-427.

21. Патент № 2303180 C2 Российская Федерация, МПК F16F9/50, B60G17/015. Гидравлический амортизатор подвески автомобиля: № 2003132564/11: заявл. 06.11.2003: опубл. 20.07.2007 / Дюсов В. А., Павлов Г. А. – 6 с.: ил. – Текст: непосредственный.

22. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам: государственный военный стандарт: издание официальное: дата введения 1999-01-01 / Разработан Техническим комитетом по стандартизации ТК 319

"Надежность и стойкость ЭРИ и РЭА военного назначения". – Москва: Стандартинформ, 2015. – III, 54 с.; 29 см. – Текст: непосредственный.

23. Вахламов, В. К. Автомобили: Конструкция и эксплуатационные свойства: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. К. Вахламов. – Москва: Издательский центр «Академия», 2009. – 480 с. – Текст: непосредственный.

24. Иванов, А. М. Основы конструкции современного автомобиля / А. М. Иванов, А. Н. Солнцев. – Москва: За рулем, 2012. – 336 с. – Текст: непосредственный.

25. Назначение, устройство и виды подвесок автомобиля. – Текст: электронный // techautoport.ru: [сайт]. – 2024. – URL: https://techautoport.ru/hodovaya-chast/podveska/podveska-avtomobilya.html (дата обращения: 10.12.2024).

26. Ротенберг, Р. В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р. В. Ротенберг. – Москва: Машиностроение, 1972. – 392 с. – Текст: непосредственный.

27. Колебания автомобиля. Испытания и исследования / Под ред. Я. М. Певзнера. – Москва: Машиностроение, 1979. – 208 с. – Текст: непосредственный.

28. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / Под ред. А. А. Хачатурова. – Москва: Машиностроение, 1976. – 535 с. – Текст: непосредственный.

29. Силаев, А. А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин / А. А. Силаев. – Москва: Машиностроение, 1972. – 192 с. – Текст: непосредственный.

30. Гришкевич, А. И. Автомобили: Теория: Учебник для вузов / А. И. Гришкевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1986. – 208 с. – Текст: непосредственный.

31. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с. – Текст: непосредственный.

32. Васильченков, В. Ф. Военная автомобильная техника. Книга третья. Военные автомобили. Конструкция и расчет / В. Ф. Васильченков, В. А. Горячев,

А. Д. Жолнин [и др.]. – Воениздат МО РФ – ООО ПК «Тигель», Рязань, 2004. – 664 с. – Текст: непосредственный.

33. Хусаинов, А. Ш. Теория автомобиля / А. Ш. Хусаинов, В. В. Селифонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 121 с. – Текст: непосредственный.

34. Певзнер, Я. М. Исследование статистических свойств микропрофиля основных типов автомобильных дорог / Я. М. Певзнер, А. А. Тихонов. – Текст: непосредственный // Научно-технический журнал «Автомобильная промышленность». – 1964. – № 1. – С. 15-19.

35. Пархиловский, И. Г. Исследование вероятностных характеристик поверхностей распространенных типов дорог / И. Г. Пархиловский. – Текст: непосредственный // Научно-технический журнал «Автомобильная промышленность». – 1968. – № 8. – С. 18-22.

36. Вибрации в технике: справочник. В 6-ти томах / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). – Москва: Машиностроение, 1980. – Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф. М. Диментберга и К. С. Колесникова. – 544 с. – Текст: непосредственный.

37. Осепчугов, В. В. Автомобиль: Анализ конструкций, элементы расчета / В. В. Осепчугов, А. К. Фрумкин. – Москва: Машиностроение, 1989. – 304 с. – Текст: непосредственный.

38. Дербаремдикер, А. Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей / А. Д. Дербаремдикер. – Москва: Машиностроение, 1969. – 236 с. – Текст: непосредственный.

39. Добромиров, В. Н. Амортизаторы. Конструкция, расчёт, испытания / В. Н. Добромиров, Е. П. Гусев, М. А. Карунин, В. П. Хавханов; под общ. ред. В. Н. Добромирова. – Москва: МГТУ «МАМИ», 2006. – 184 с. – Текст: непосредственный.

40. Устройство и принцип работы амортизаторов. – Текст: электронный // techautoport.ru: [сайт]. – 2024. – URL: https://techautoport.ru/hodovaya-chast/podveska/amortizator.html (дата обращения: 24.12.2024).

41. Разница между однотрубными и двухтрубными амортизаторами. – Текст: электронный // drive2.ru: [сайт]. – 2024. – URL: https://www.drive2.ru/l/7847934/ (дата обращения: 24.12.2024).

42. Васильченков, В. Ф. Военная автомобильная техника. Книга вторая. Военные автомобили и гусеничные машины. Теория эксплуатационных свойств / В. Ф. Васильченков. – Воениздат МО РФ – ООО ПК «Тигель», Рязань, 2004. – 432 с. – Текст: непосредственный.

43. ГОСТ 34339-2017. Автомобильные транспортные средства. Амортизаторы гидравлические телескопические. Технические требования и методы испытаний: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 июля 2018 г. № 413-ст: введен впервые: дата введения 2019-04-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»). – Москва: Стандартинформ, 2018. – III, 22 с.; 29 см. – Текст: непосредственный.

44. Воскресенский, С. К. Тест – ноябрь 2000 года / С. К. Воскресенский. – Текст: непосредственный // Журнал «За рулем». – 2000. – № 11. – С. 46-48.

45. Щелоков, М. А. Противники колебаний: что представляют собой современные амортизаторы / М. А. Щелоков. – Текст: непосредственный // Автомобильный журнал «ДВИЖОК». – 2017. – Выпуск 50 – С. 34-37.

46. Ютт, В. Е. Электрооборудование автомобилей / В. Е. Ютт. – Москва: Горячая линия-Телеком. – 2009. – 440 с. – Текст: непосредственный.

47. Касай, С. А. Сравнительный анализ бортовых электронных систем управления грузовых автомобильных транспортных средств отечественного и иностранного производства / С. А. Касай, А. А. Третьяков. – Текст: непосредственный // Научно-технический журнал «Вестник гражданских инженеров». – 2019. – № 6 (77). – С. 299-304.

48. Щербин, А. М. Современные бортовые информационно-управляющие системы автомобильной техники / А. М. Щербин. – Текст: непосредственный // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 3(92). – С. 26-29.

49. Электронно-управляемые амортизаторы. – Текст: электронный // drive2.ru: [сайт]. – 2025. – URL: https://www.drive2.ru/b/1172192/ (дата обращения: 11.02.2025).

50. Wasnik, A. Concept of Electromagnetic Shock Absorber using Magnetorheological Fluid / A. R. Wasnik, V. P. Bhosale, S. K. Aswar, V. B. Birange, M. M. Bodhale // International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. – May 2015. – Vol. 2, Issue 5. – Pp. 82-84.

51. Sharma, K. Magnetic Shock Absorbers / K. Sharma, R. S. Chauhan, V. N. Bartaria // International Journal Of Engineering, Education And Technology (ARDIJEET). – 01/04/2014. – Vol. 2, Issue 2. – Pp. 1-8.

52. Совершенные амортизаторы – это то, к чему стремятся производители. – Текст: электронный // avtoamort.ru: [сайт]. – 2022. – URL: https://www.avtoamort.ru/article/ sovershennye-amortizatory-eto-k-chemu-stremyatsya/ (дата обращения: 25.01.22).

53. Патент № 2263238 C2 Российская Федерация, МПК F16F9/50, B60G11/26. Регулируемый однотрубный газонаполненный амортизатор: № 2003132026/11: заявл. 31.10.2003: опубл. 27.10.2005 / Гусев Е. П., Плотников А. М., Воеводов С. Ю. – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.

54. Zhang, J. Q. A Review on Energy-Regenerative Suspension Systems for Vehicles / J. Q. Zhang, , Z. Z. Peng, L. Zhang, Y. Zhang // Proceedings of the World Congress on Engineering 2013. – London, U.K. – Vol III, WCE 2013, July 3 - 5, 2013. – Pp. 1889-1892.

55. Zuo, L. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions / L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, Y. Zhou // Smart Materials and Structures. – 2010. – № 19. – Pp. 1–10.

56. Cannizzaro, L. Design of an Electromagnetic Regenerative Damper and Energy Harvesting Assessment / L. Cannizzaro, G. Virzi Mariotti, A. Giallanza, M. Porretto, G. Marannano // Journal of Electromagnetics. – 2016. – Vol. 1. – Pp. 5-11.

57. Demetgul, M. Design of the hybrid regenerative shock absorber and energy harvesting from linear movement / M. Demetgul, I. Guney // Journal of Clean Energy Technologies. – 2017. – Vol. 5, № 1. – Pp. 81-84.

58. Tavhare, P. Design of Regenerative Suspension for Vehicles / P. Tavhare, V. Vinchure, D. Bhoite, S. Velapure // International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences. – March 2015. – Volume 3, Issue 3. – Pp. 268-272.

59. Посметьев, В. И Оценка эффективности применения системы рекуперации энергии в подвеске автомобиля / В. И. Посметьев, М. В. Драпалюк, В. А. Зеликов. – Текст: непосредственный // Научный журнал КубГАУ. – 2012. – №76. – С. 559-573.

60. Сергиенко, А. Н. Математическая модель электромеханического преобразователя для электроамортизатора транспортного средства / А. Н. Сергиенко, Б. Г. Любарский, Н. Е. Сергиенко. – Текст: непосредственный // Электротехника и электромеханика. –2012. – № 6. – С. 61-65.

61. Патент № 169464 U1 Российская Федерация, МПК B60G13/14, F16F15/03, F03G7/08. Электромагнитный амортизатор с рекуперативным эффектом: № 2016121543: заявл. 31.05.2016: опубл. 21.03.2017 / Киреев А. В., Кожемяка Н. М., Бурдюгов А. С., Назаренко С. В., Климов А. В. – 2 с. – Текст: непосредственный.

62. Патент № 184575 U1 Российская Федерация, МПК F16F6/00. Магнитный амортизатор: № 2018121481: заявл.13.06.2018: опубл. 30.10.2018 / Невровский В. А. – 2 с.: ил. – Текст: непосредственный.

63. Маркова, С. В. Использование электромагнита в качестве регулируемого амортизатора / С. В. Маркова. – Текст: непосредственный // «Проблемы социального и научно-технического развития в современном мире»: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 28-29 апреля 2016 г., Рубцовский индустриальный

институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – Рубцовск. – 2016. – С. 114-116.

64. Доровских, Д. В. Уточнение математической модели электромагнитного амортизатора автомобиля / Д. В. Доровских, Ю. Е. Глазков. – Текст: непосредственный // Наука в центральной России. – 2019. – № 3 (39). – С. 73-78.

65. Суровцев, Ю. А. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры / Ю. А. Суровцев. – Москва: Советское радио, 1974.– 176 с. – Текст: непосредственный.

66. Ильинский, В. С. Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В. С. Ильинский. – Москва: Радио и связь, 1982. – 296 с. – Текст: непосредственный.

67. Токарев, М. Ф. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / М. Ф. Токарев, Е. Н. Талицкий, В. А. Фролов. – Москва: Радио и связь, 1984. –223 с. – Текст: непосредственный.

68. Маквецов, Е. Н. Механические воздействия и защита радиоэлектронной аппаратуры / Е. Н. Маквецов, А. М. Тартаковский. – Москва: Радио и связь, 1993. – 201 с. – Текст: непосредственный.

69. ГОСТ 16962-71. Изделия электронной техники и электротехники. Механические и климатические воздействия. Требования и методы испытаний: государственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 12 мая 1971 г. № 899: введен впервые: дата введения 1971-07-01. – Москва: Издательство стандартов, 1987. – 103 с. – Текст: непосредственный.

70. Патент № 97783 U1 Российская Федерация, МПК F16F6/00, F16F15/03. Виброизолятор с электромагнитным компенсатором жесткости: № 2010121808/11: заявл. 28.05.2010: опубл. 20.09.2010 / Гросс В. Ю., Гурова Е. Г. – 2 с.: ил. – Текст: непосредственный.

71. Патент № 2115844 C1 Российская Федерация, МПК F16F015/04. Система активной виброзащиты: № 95114219/28: заявл. 08.08.1995: опубл.

20.07.1998 / Абакумов А. М., Агеев В Е., Мятов Г. Н. – 8 с.: ил. – Текст: непосредственный.

72. Климов, А. В. Повышение энергоэффективности транспортных средств сельскохозяйственного назначения путем применения амортизаторов с рекуперативным эффектом: специальность 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Климов Александр Владимирович; Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). – Москва, 2019. – 206 с. – Текст: непосредственный.

73. Патент № 162488 U1 Российская Федерация, МПК F16F6/00, F16F15/03. Устройство магнитного амортизатора-генератора: №2015120185/11: заявл. 27.05.2015: опубл. 10.06.2016 / Сарбаев В. И., Гармаш Ю. В., Блинникова Л. Г., Усачев Ю. В. – 2 с.: ил. – Текст: непосредственный.

74. Гармаш, Ю. В. Адаптивная информационно-управляющая система демпфирования колебаний / Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова, В. И. Сарбаев. – Текст: непосредственный // Вопросы электротехнологии: научно-технический журнал. – 2025. – № 1 (46). – С. 56-65.

75. Блинникова, Л. Г. Модель построения адаптивной информационно-управляющей системы демпфирования колебаний рекуперативной электромагнитной подвески / Л. Г. Блинникова, Ю. В. Гармаш. – Текст: непосредственный // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2026. – Т. 24, № 1. – С. 5-10.

76. Гармаш, Ю. В. Совершенствование систем электрооборудования автомобилей на основе адаптивных преобразователей электрической энергии: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гармаш Юрий Владимирович, Московский политехнический университет (МАМИ). – Москва, 2017. – 302 с. – Текст: непосредственный.

77. Функциональные устройства систем электропитания наземной РЭА / Под редакцией В. Г. Костикова. – Москва: Радио и связь. – 1990. – 193 с. – Текст: непосредственный.

78. Интегральные микросхемы: Микросхемы для импульсных источников питания и их применение. – Москва: ДОДЭКА. – 2000. – 608 с. – Текст: непосредственный.

79. Jang, Y. A new soft switched PFC boost rectifier with integrated flyback converter for stand-by power / Y. Jang, D. L. Dillman, M. M. Jovanovic // IEEE Trans. Power Electron. – 2006. – V. 21, № 1. – Pp. 66-72.

80. Blaabjerg, F. The future of electronic power processing and conversion / F. Blaabjerg, A. Consoli, J. A. Ferreira, D. Van Wyk Jacabus / /IEEE Trans. Power Electron. – 2005. – V. 20, № 3. – Pp. 715-720.

81. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл. – Москва: Мир, 2003. – 704 с. – Текст: непосредственный.

82. Слепов, Н. Н. Широтно-импульсная модуляция / Н. Н. Слепов. – Москва: Энергия, 1978. – 191 с. – Текст: непосредственный.

83. Забродин, Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – Москва: Высшая школа, 1982. – 496 с. – Текст: непосредственный.

84. Волков, В. С. Электроника и электрооборудование транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования / В. С. Волков. – Москва: Издательский центр «Академия», 2013. – 384 с. – Текст: непосредственный.

85. Акимов, С. В. Электрическое и электронное оборудование автомобилей / С. В. Акимов, Ю. И. Боровских, Ю. П. Чижков. – Москва: Машиностроение, 1988. – 277 с. – Текст: непосредственный.

86. Сарбаев, В. И. Импульсные преобразователи энергии в электрооборудовании автомобиля / В. И. Сарбаев, Ю. В. Гармаш, И. И. Пономарева. – Текст: непосредственный // Транспорт: наука, техника, управление: научный информационный сборник. – Москва: ВИНИТИ. – 2012. – № 12. – С. 47-49.

87. Гармаш, Ю.В. Управление электроприводом постоянного тока / Ю. В. Гармаш, В. И. Сарбаев // Lambert academic publishing. – GmbH Saarbrücken, Germany, 2012. – ISBN: 978-3-659-15763-9. – Текст: непосредственный.

88. Сарбаев, В. И. Устройство управления магнитным амортизатором-генератором для автомобиля / В. И. Сарбаев, Г. И. Сидельников, Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2015. – № 1. – С. 7-9.

89. Линейный энкодер: типы и фунуции. – Текст: электронный // ru.ostbridge-tech.com: [сайт]. – 2025. – URL: https://ru.ostbridge-tech.com/news/linear-encoder-types-and-functions.html (дата обращения: 11.02.2025).

90. Гармаш, Ю. В. Информационно-измерительная система учета подрессоренной массы автомобиля для управления рекуперативной магнитной подвеской / Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // «Студенческий научный поиск – науке и образованию XXI века»: Материалы XIV Международной студенческой научно-практической конференции, 22 апреля 2022 г., СТУ – Рязань. – 2022. – С. 16-23.

91. Блинникова, Л. Г. Применение рекуперативного магнитного амортизатора с адаптивной электронной системой управления для эффективного гашения колебаний транспортных средств / Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Наука и образование XXI века: Материалы XVIII-й Международной научно-практической конференции, 25 октября 2024 г., СТУ. – Рязань. – 2024. – С. 178-182.

92. Сарбаев, В. И. Электронно-регулируемый амортизатор / В. И. Сарбаев, Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Научно-практический журнал «Электротехника». – 2019. – №4. – С. 63-66.

93. Гуревич, В. И. Электрические реле: Устройство, принцип действия и применения / В. И. Гуревич. – Москва: «Солон-Пресс», 2011. – 688 с. – Текст: непосредственный.

94. Сарбаев, В. И. Устройство управления магнитным рекуперативным амортизатором / В. И. Сарбаев, Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова, С. Г. Волков. –

Текст: непосредственный // Научно-технический журнал «Автомобильная промышленность». – 2017. – №3. – С. 8-10.

95. Sarbaev, V. An Electronically Adjustable Shock Absorber / V. I. Sarbaev, Y. V. Garmash., L. G. Blinnikova // «Russian Electrical Engineering». – 2019. – V. 90, № 4. – Pp. 353-355.

96. Патент № 205432 U1 Российская Федерация, МПК F16F6/00, F16F9/34. Устройство управления магнитным рекуперативным амортизатором: № 2020127938: заявл. 19.08.2020: опубл. 14.07.2021 / Гармаш Ю. В., Блинникова Л. Г., Шипякова А. А. – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.

97. Блинникова, Л. Г. Адаптивная информационно-управляющая система гашения колебаний электромагнитной подвески / Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2025: сборник трудов XXXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, 3-5 декабря 2025 г. – Рязань. – 2025. – С. 362-365.

98. Гармаш, Ю. В. Адаптация выходного напряжения устройства рекуперации энергии к напряжению бортовой сети / Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Научный журнал «Научный резерв». – 2020. – № 3 (11). – С. 26-32.

99. Sarbaev, V. Matching the output voltage level of the energy recovery device and the voltage of the on-board network / V. I. Sarbaev, Y. V. Garmash., L. G. Blinnikova // E3S Web. Of Conf. – Volume 402, 2023, International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia, 2023.

100. Данов, Б. А. Электрооборудование военной автомобильной техники: учеб. для воен. вузов / Б. А. Данов, В. Д. Рогачев, Н. П. Шевченко. – Рязань: Военный автомобильный институт. – 2005. – 598 с. – Текст: непосредственный.

101. Сарбаев, В. И. Рекуперативный амортизатор / В. И. Сарбаев, Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Научно-

технический и производственный журнал «Вестник машиностроения». – 2016. – №8. – С. 52-54.

102. Sarbaev, V. Recuperative Shock Absorber / V. I. Sarbaev, Y. V. Garmash., L. G. Blinnikova // «Russian Engineering Research». – 2016. – V. 36, № 11. – Pp. 920-922.

103. Сарбаев, В. И. Энергоэффективная система управления автомобильной подвеской / В. И. Сарбаев, Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции 17 – 18 мая 2016 года. – Орел. – 2016. – С. 197-204.

104. Блинникова, Л. Г. Демпфирование колебаний радиоэлектронной аппаратуры с помощью магнитных амортизаторов / Л. Г. Блинникова, Ю. В. Гармаш. – Текст: непосредственный // Научный журнал «Научный резерв». – 2020. – № 1 (9). – С. 2-7.

105. Садовникова, Н. П. Имитационное моделирование: учебное пособие / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Т.В. Ерещенко, Н. М. Рашевский. – Волгоград: ВолгГТУ, 2021. – 132 с. – Текст: непосредственный.

106. Simulink. – Текст: электронный // matlab.ru: [сайт]. – 2022. – URL: https://matlab.ru/products/Simulink (дата обращения: 25.01.2022).

107. Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Simulink / А. И. Солонина. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с. – Текст: непосредственный.

108. Черных, И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / Под общ. ред. В. Г. Потемкина. – Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с. – Текст: непосредственный.

109. Сарбаев, В. И. Моделирование работы электронного устройства управления рекуперативным магнитным амортизатором в системе Simulink / В. И. Сарбаев, Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова, А. Н. Крюков. – Текст: непосредственный // Научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта». – 2018. – № 4. – С. 2-5.

110. Бакалов, В. П. Цифровое моделирование случайных процессов / В. П. Бакалов. – Москва: Сайнс-Пресс, 2002. – 88 с. – Текст: непосредственный.

111. Быков, В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В. В. Быков.– Москва: Советское радио,1971. – 328 с. – Текст: непосредственный.

112. Марпл-мл, С. Л. – Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. – Москва: Мир, 1990. – 265 с. – Текст: непосредственный.

113. Огороднов, С. М. Моделирование возмущения микропрофиля дороги при исследовании колебательных процессов транспортных средств / С. М. Огороднов, С. И. Малев. – Текст: непосредственный // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – №5 (106). – С. 36-39.

114. Чабунин, И. С. Моделирование случайного микропрофиля дорожной поверхности методом формирующего фильтра / И. С. Чабунин. – Текст: непосредственный // Известия МГТУ «МАМИ». – 2013. – № 1 (15), Т. 1 – С. 218–225.

115. Чабунин, И. С. Применение метода спектральных представлений для решения задач статистической динамики автомобиля / И. С. Чабунин, В. И. Щербаков. – Текст: непосредственный // Журнал автомобильных инженеров. – 2013. – №4 (81). – С. 28-32.

116. Белецкий, А. В. Математическое и имитационное моделирование профиля дорожного покрытия / А. В. Белецкий, С. С. Рекунов. – Текст: электронный // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» – Выпуск 5 (24), сентябрь – октябрь 2014. – С. 1-13. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-i-imitatsionnoe-modelirovanie-profilya-dorozhnogo-pokrytiya/viewer (дата обращения 19.03.2025)

117. Рыков, С. П. Моделирование случайного микропрофиля автомобильных дорог / С. П. Рыков, Р. С. Бекирова, В. С. Коваль. – Текст: непосредственный // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – №4(8). – С. 33-37.

118. Солонина, А. И. Цифровая обработка сигналов и MATLAB / А. И. Солонина, Д. М. Клионский, Т. В. Меркучева, С. Н. Перов. – Санкт-петербург: БХВ-Петербург, 2013. – 512 с. – Текст: непосредственный.

119. Гармаш, Ю. В. Моделирование работы устройства управления рекуперативным магнитным амортизатором в системе Simulink с учетом случайного микропрофиля дорожного покрытия / Ю. В. Гармаш, Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Научный журнал «Научный резерв». – 2024. – № 2 (26). – С. 8-14.

120. Корректор фактора мощности IL6562. – Текст: электронный // integral.by: [сайт]. – 2025. – URL: https://integral.by/sites/default/files/IL6562-TSr.pdf (дата обращения: 19.03.2025).

121. Блинникова, Л. Г. Информационно-управляющая система демпфирования колебаний электромагнитной подвески с рекуперативным эффектом / Л. Г. Блинникова. – Текст: непосредственный // Вопросы электротехнологии: научно-технический журнал. – 2026. – № 1 (50). – С. 97-102.

122. Мошков, В. Б. Предпосылки и тенденции развития электромобилей / В. Б. Мошков, В. В. Овчинников, А. Ю. Баранник [и др.]. – Текст: непосредственный // Технологии гражданской безопасности: научно-технический журнал. – 2021. – Т. 18, № 2 (68). – С. 14-19.

123. КамАЗ-4350: технические характеристики. – Текст: электронный // gruzovo.com: [сайт]. – 2024. – URL: https://gruzovo.com/kamaz-4350.html (дата обращения: 10.10.2024).

124. Блинникова, Л. Г. Эффективность применения адаптивной электронной системы управления рекуперативным магнитным амортизатором на транспортно-технологических средствах и их комплексах / Л. Г. Блинникова, Ю. В. Гармаш. – Текст: непосредственный // «Наука и образование XXI века»: Материалы XVII-й Международной научно-практической конференции, 27 октября 2023 г., Современный технический университет, г. Рязань. – 2023. – С. 8-11.

125. ГОСТ 25467-82. Изделия электронной техники. Классификация по условиям применения и требования по стойкости к внешним воздействующим факторам: государственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от

30 сентября 1982 г. № 3861: введен впервые: дата введения 1984-01-01. – Москва: Издательство стандартов, 1982. – 10 с. – Текст: непосредственный.

126. ГОСТ РВ 20.39.414.1-97. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Классификация по условиям применения и требования стойкости к внешним воздействующим факторам: государственный военный стандарт: издание официальное: дата введения 1998-07-01 / Разработан Техническим комитетом по стандартизации № 319 "Надежность и стойкость ЭРИ и РЭА военного назначения". – Москва: Стандартинформ, 2015. – III, 11 с.; 29 см. – Текст: непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Описание микросхемы TL494

TL494.

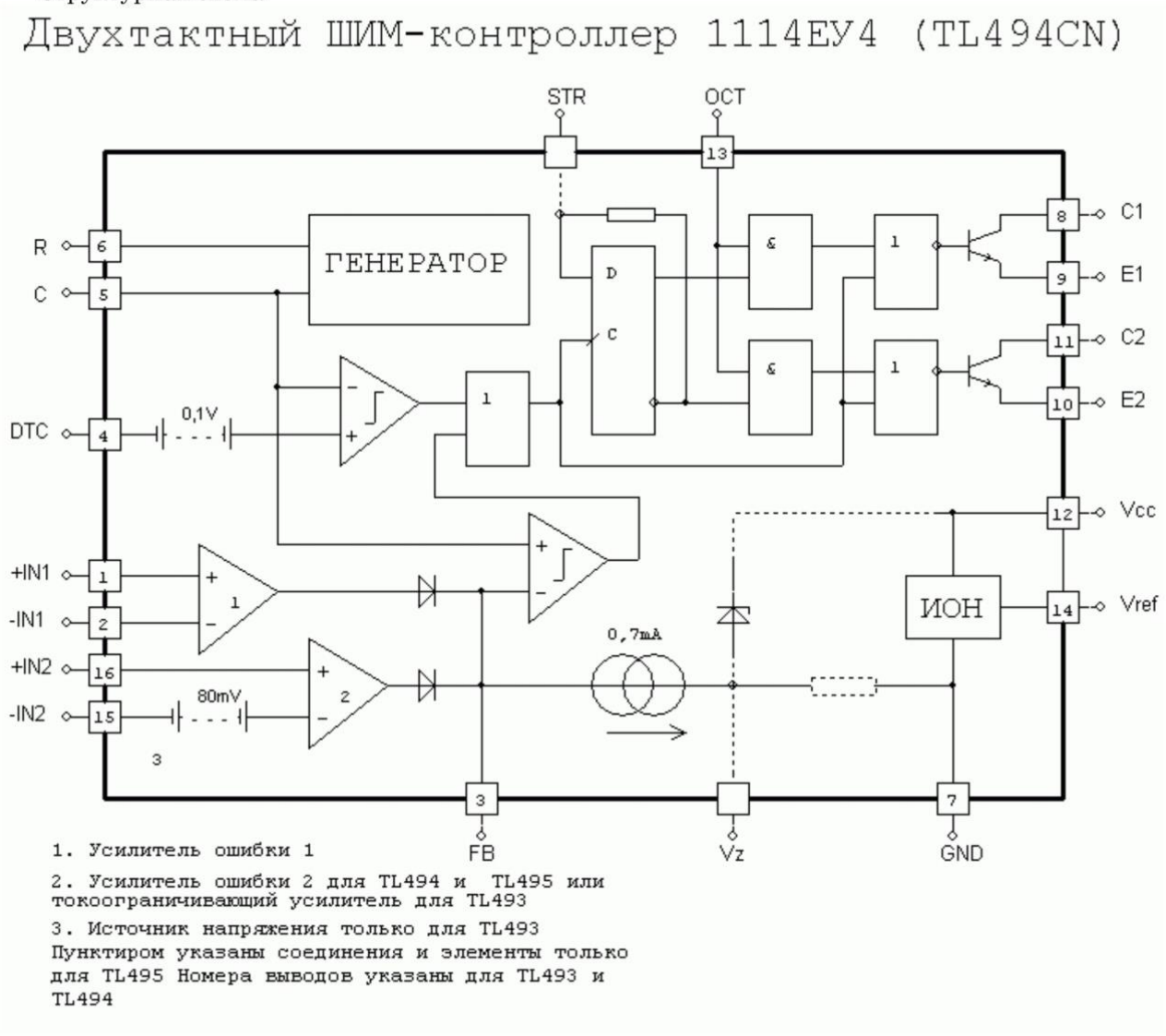
Данная техническая спецификация является ознакомительной и не может заменить собой учтенный экземпляр технических условий или этикетку на изделие.

ОСОБЕННОСТИ ШИМ – КОНТРОЛЛЕРА TL494:
Полный набор функций ШИМ-управления
Выходной втекающий или вытекающий ток каждого выхода 200мА
Возможна работа в двухтактном или однотактном режиме
Встроенная схема подавления сдвоенных импульсов
Широкий диапазон регулировки
Выходное опорное напряжение.....5V +-05%
Просто организуемая синхронизация

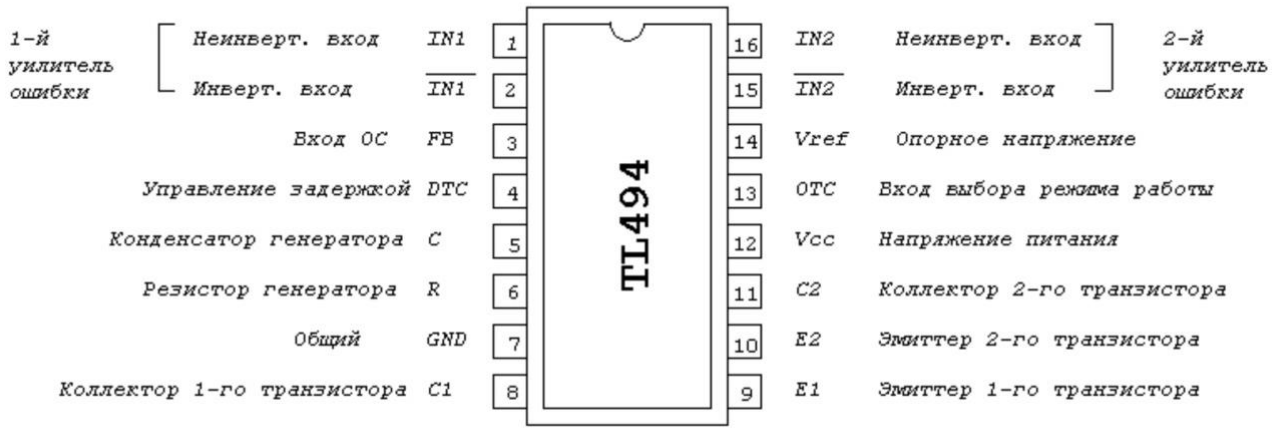
Предельные значения параметров:
Напряжение питания.....41V
Входное напряжение усилителя.....(Vcc+0.3)V
Выходное напряжение коллектора.....41V
Выходной ток коллектора.....250мА
Общая мощность рассеивания в непрерывном режиме.....1Вт
Рабочий диапазон температур окружающей среды:
-с суффиксом L.....-25..85C
-с суффиксом C.....0..70C
Диапазон температур хранения .....-65…+150C

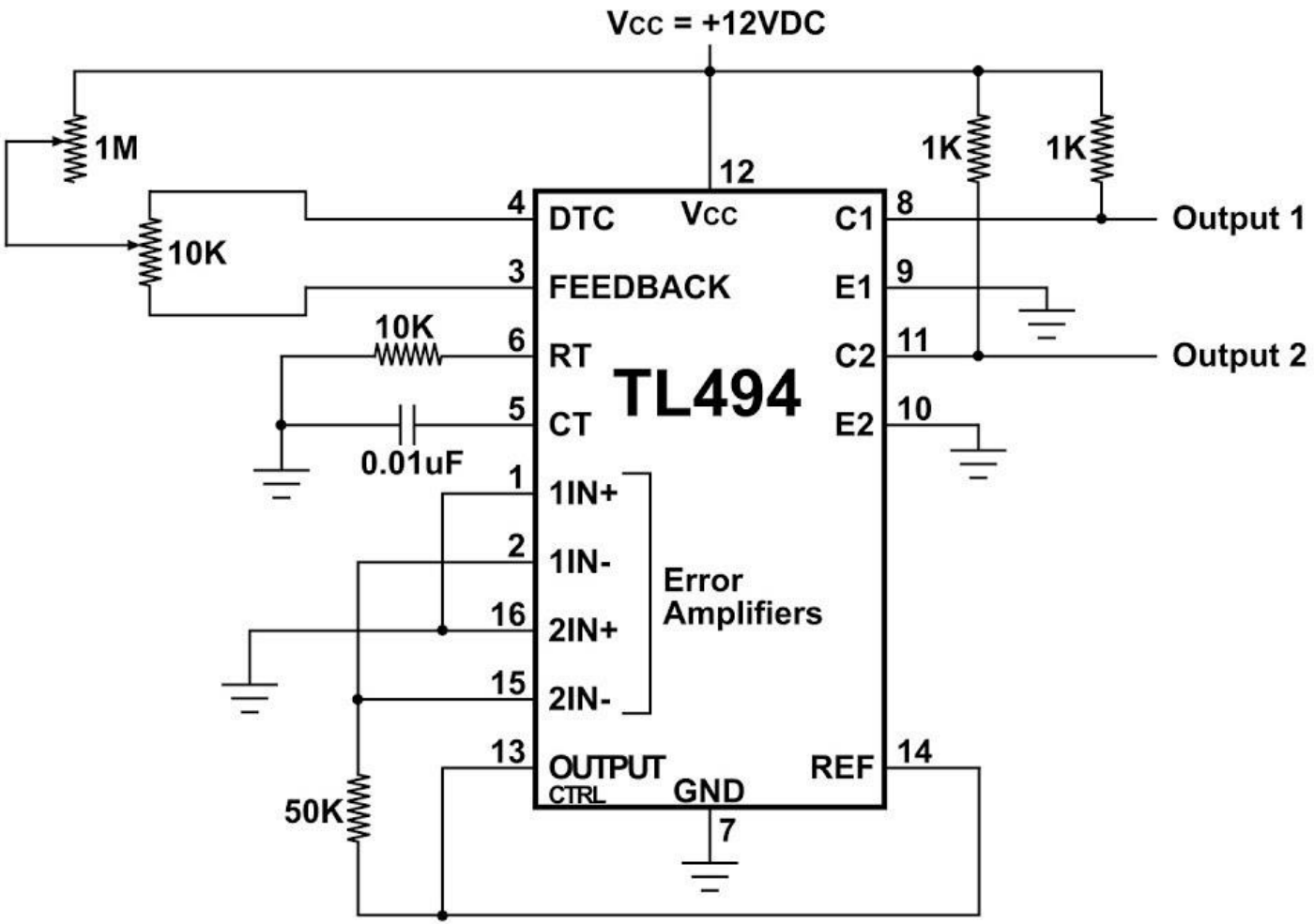
ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ:
1114ЕУ3/4 – TL494 Специально созданные для построение ИВП, микросхемы TL493/4/5 обеспечивают разработчику расширенные возможности при конструировании схем управления ИВП. Приборы TL493/4/5 включают в себя усилитель ошибки, встроенный регулируемый генератор, компаратор регулировки мертвого времени, триггер управления, прецизионный ИОН на 5V и схему управления выходным каскадом. Усилитель ошибки выдает синфазное напряжение в диапазоне от –0,3…(Vcc-2) V. Компаратор регулировки мертвого времени имеет постоянное смещение, которое ограничивает минимальную длительность мертвого времени величиной порядка 5%.
Допускается синхронизация встроенного генератора, при помощи подключения вывода R к выходу опорного напряжения и подачи входного пилообразного напряжения на вывод C, что используется при синхронной работе нескольких схем ИВП.
Независимые выходные формирователи на транзисторах обеспечивают возможность работы выходного каскада по схеме с общим эмиттером либо по схеме эмиттерного повторителя.
Выходной каскад микросхем TL493/4/5 работает в однотактном или двухтактном режиме с возможностью выбора режима с помощью специального входа. Встроенная схема контролирует каждый выход и запрещает выдачу сдвоенного импульса в двухтактном режиме.
Приборы, имеющие суффикс L, гарантируют нормальную работу в диапазоне температур -–5…85C, с суффиксом C гарантируют нормальную работу в диапазоне температур 0…70C.

Структурная схема:



ЦОКОЛЕВКА КОРПУСА:




Vcc = +12VDC
1M
10K
1K
1K
12
4
DTC
Vcc
C1
8
Output 1
3
FEEDBACK
E1
9
10K
6
RT
C2
11
Output 2
TL494
5
CT
E2
10
0.01uF
1
1IN+
2
1IN-
Error
Amplifiers
16
2IN+
15
2IN-
13
OUTPUT
CTRL
GND
REF
14
50K
7

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ:
Микросхема TL494 представляет из себя ШИМ-контролер импульсного источника питания, работающий на фиксированной частоте, и включает в себя все необходимые для этого блоки. Встроенный генератор пилообразного напряжения требует для установки частоты только два внешних компонента R и C. Частота генератора определяется по формуле:

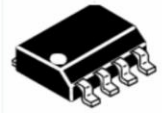
$$f_{osc} = \frac{1.1}{R * C}$$

Модуляция ширины выходных импульсов достигается сравнением положительного пилообразного напряжения, получаемого на конденсаторе C, с двумя управляющими сигналами (см временную диаграмму). Логический элемент ИЛИ-НЕ возбуждает выходные транзисторы Q1 и Q2 только тогда, когда линия тактирования встроенного триггера находится в НИЗКОМ логическом состоянии. Это происходит только в течение того времени, когда амплитуда пилообразного напряжения выше амплитуды управляющих сигналов. Следовательно, повышение амплитуды управляющих сигналов вызывает соответствующее линейное уменьшение ширины выходных импульсов. Под управляющими сигналами понимаются напряжения производимые схемой регулировки мёртвого времени (вывод 4), усилители ошибки (выводы 1, 2, 15, 16) и цепью обратной связи (вывод 3).
Вход компаратора регулировки мертвого времени имеет смещение 120мВ, что ограничивает минимальное мертвое время на выходе первыми 4% длительности цикла пилообразно напряжения.
В результате максимальная длительность рабочего цикла составляет 96% в том случае, если вывод 13 заземлен, и 48% в том случае, если на вывод 13 подано опорное напряжение. Увеличит длительность мертвого времени на выходе, можно подавая на вход регулировки мертвого времени (вывод 4) постоянное напряжение в диапазоне 0..3,3V. ШИМ-компаратор регулирует ширину выходных импульсов от максимального значения, определяемого входом регулировки мертвого времени, до нуля, когда напряжение обратной связи изменяется от 0,5 до 3,5V. Оба усилителя ошибки имеют входной диапазон синфазного сигнала от –0,3 до (Vcc-2,0)V и могут использоваться для считывания значений напряжения или тока с выхода источника питания. Выходы усилителей ошибки имеют активный ВЫСОКИЙ уровень напряжения и объединены функцией ИЛИ на неинвертирующем входе ШИМ-компаратора. В такой конфигурации усилитель, требующий минимального времени для включения выхода, является доминирующим в петле управления. Во время разряда конденсатора C на выходе компаратора регулировки мертвого времени генерируется положительный импульс, который тактирует триггер и блокирует выходные транзисторы Q1 и Q2. Если на вход выбора режима работы подается опорное напряжение (вывод 13), триггер непосредственно управляет двумя выходными транзисторами в противофазе (двухтактный режим), а выходная частота равна половине частоты генератора. Выходной формирователь может также работать в однотактном режиме, когда оба транзистора открываются и закрываются одновременно, и когда требуется максимальный рабочий цикл не превышающий 50%. Это желательно, когда трансформатор имеет звенящую обмотку с ограничительным диодом, используемым для подавления переходных процессов. Если в однотактном режиме требуются большие токи, выходные транзисторы могут работать параллельно. Для этого требуется замкнуть на землю вход выбора режима работы OTC, что блокирует выходной сигнал от триггера. Выходная частота в этом случае будет равна частоте генератора.
Микросхема TL494 имеет встроенный источник опорного напряжения на 5,0V, способный обеспечить вытекающий ток до 10мА для смещения внешних компонентов схемы. Опорное напряжение имеет погрешность 5% в диапазоне рабочих температур от 0 до 70C.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Описание микросхемы IL6562

IL6562D

КОРРЕКТР ФАКТОРА МОЩНОСТИ IL6562
(функциональный аналог L6562
ф.STMicroelectronics)



Пластмассовый корпус
MS-012AA (SO-8)

Рисунок 1 – Микросхема в корпусе

Микросхема корректора фактора мощности разработана для использования в качестве первичного преобразователя в системах электронного баланса, в системах автономных преобразователей мощности, в AC-DC адаптерах, зарядных устройствах и др.

Микросхема предназначена для компенсации суммарного фазового сдвига между током и напряжением путём внесения опережения по фазе в узлах сети. Это приводит к снижению паразитных активных потерь в проводниках электрических сетей и распределительном оборудовании.

Особенности микросхемы:

- коррекция коэффициента мощности в переключающем режиме;
- оригинальная конструкция умножителя, разработанного для минимизации суммарного значения коэффициента нелинейных искажений входного переменного тока;
- точная регулируемая защита от перенапряжения на выходе микросхемы;
- низкий ток запуска;
- низкий (не более 70 мкА) ток потребления в режиме покоя;
- ток потребления в рабочем режиме не более 5 мА;
- расширенный диапазон напряжения питания до 22 В;
- встроенный фильтр в блоке контроля тока;
- функция блокировки;
- точный внутренний источник опорного напряжения;
- двухтранзисторный выходной каскад вентиля управления с блокировкой пониженного напряжения и стабилизатором напряжения.

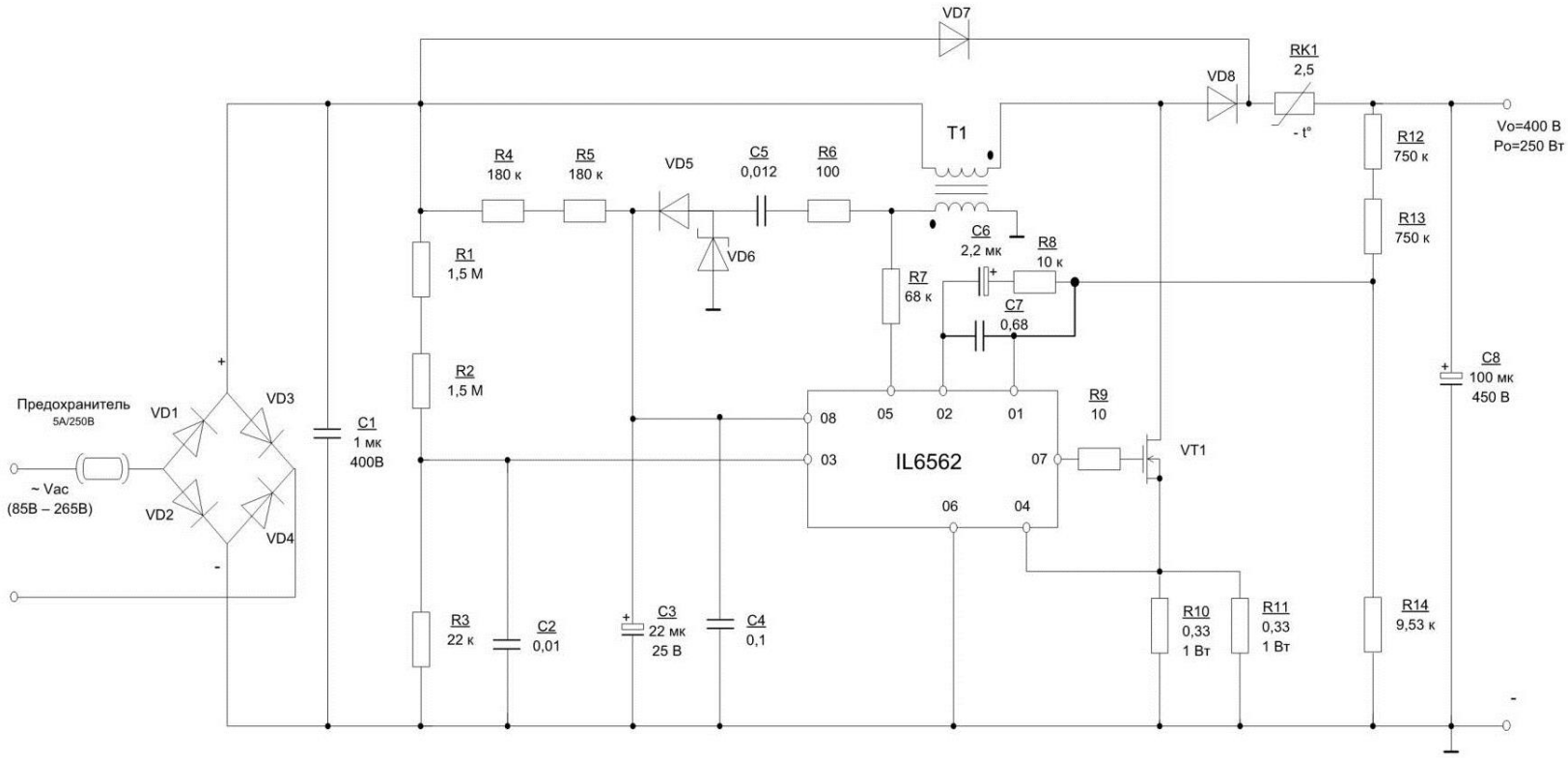
Микросхема выполнена в 8 - выводном пластмассовом SO-8 корпусе типа MS-012AA.

Масса микросхемы составляет не более 0,15 г

Типовая схема включения микросхемы при применении приведена на рисунке 2.

Таблица 1 – Назначение выводов микросхемы

Номер вывода корпуса	Обозначение	Назначение
01	INV	Вход инвертирующий усилителя ошибки
02	COMP	Выход усилителя ошибки
03	MULT	Вход умножителя
04	CS	Вход ШИМ компаратора
05	ZCD	Вход контролирующий
06	GND	Общий вывод
07	GD	Выход управляющего вентиля
08	V_{CC}	Вывод питания от источника напряжения



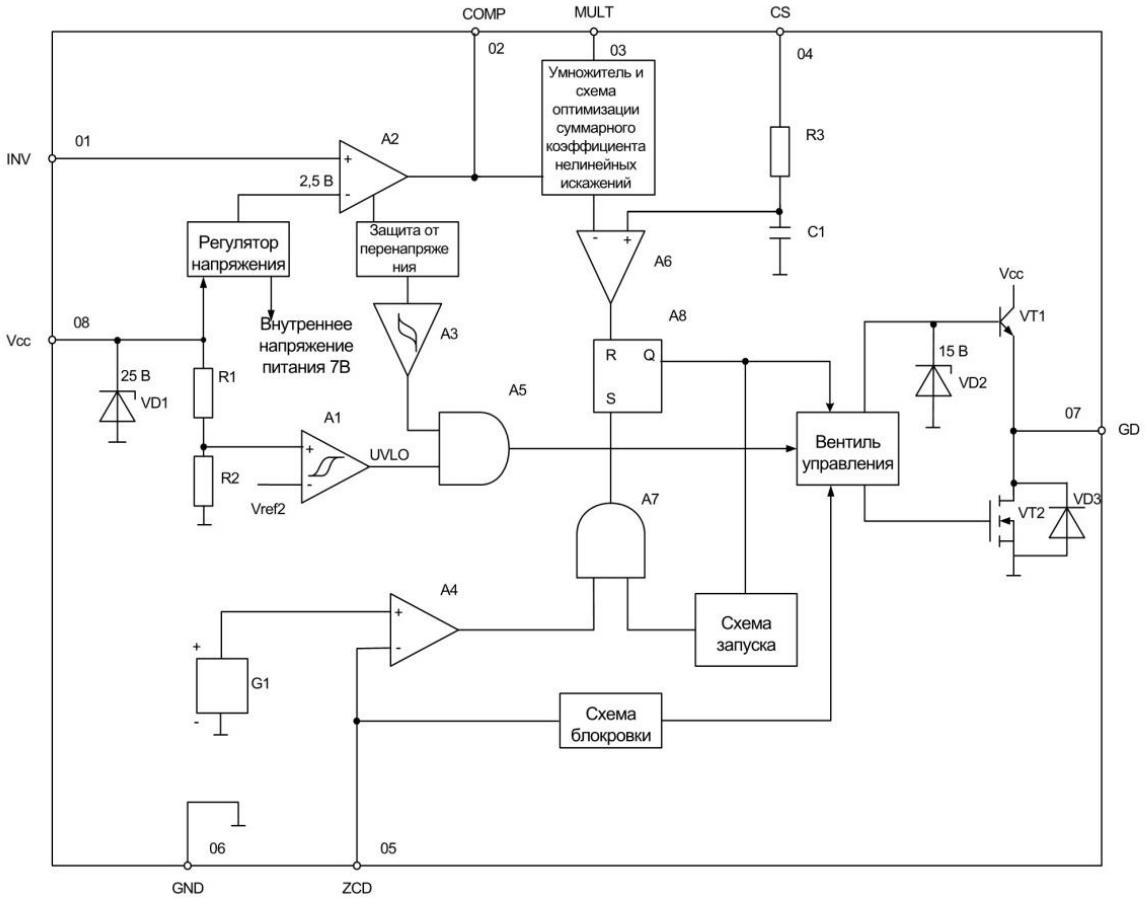
T1 – трансформатор

VD1 – VD5, VD7, VD8 – диоды

VD6 – диод Шотки

VT1 – транзистор

Рисунок 2 – Типовая схема включения микросхем при применении



A1, A6 – компараторы
A2 – усилитель ошибки
A3 – триггер Шмитта
A4 – детектор нулевого тока
A5, A7 – логические элементы «И»
A8 – триггер
C1 – конденсатор емкостью 5 пФ
G1- источник опорного напряжения от 1,6 до 2,1 В
R1, R2, R3 – резисторы
VD1, VD2 – стабилитроны
VD3 - защитный диод
VT1, VT2 – транзисторы

Рисунок 3 – Схема электрическая структурная

Функциональное описание

Микросхема состоит из следующих блоков:
– умножитель;
– регулятор напряжения;
– блок защиты от повышенного напряжения;
– детектор нулевого тока;
– вентиль управления;
– схема запуска;
– схема блокировки.

Микросхема I6562D является контроллером коррекции коэффициента мощности. Функционирование микросхемы осуществляется в переключающем режиме.

Коэффициент мощности λ является комплексным показателем, характеризующим эффективность использования ресурсов источника питания, и определяется как отношение между активной (полезной) и полной (активной и реактивной) потребляемой мощностью преобразователя напряжения

$$\lambda = \frac{P_{вх.акт.}}{P_{вх.полн.}},$$

где $P_{вх.\ акт.}$ – полезная потребляемая мощность преобразователя напряжения, Вт;
$P_{вх.\ полн.}$ – полная потребляемая мощность, Вт.

Коэффициент мощности показывает, какая часть потребляемой из первичной сети энергии идет на преобразование, а какая часть энергии не совершает полезной работы (реактивная составляющая), вынуждая разработчика аппаратуры применять провода с увеличенным сечением во избежание перегрева.

На практике отсутствие корректора коэффициента мощности приводит к следующему. При традиционном построении источника питания, когда его входная цепь содержит выпрямительный мост и сглаживающий конденсатор (реактивная нагрузка), ток из сети потребляется кратковременно в виде коротких импульсов, совпадающих с пиковым значением входного напряжения, в сети появляются высшие гармоники тока и искажается форма напряжения сети. Основную опасность представляют все кратные третьей гармоники тока. Эти гармоники из каждой фазы суммируются в нулевом проводнике трехфазной сети, что может привести к его перегреву и возгоранию изоляции. Задача корректора коэффициента мощности состоит в том, чтобы сформировать входной ток источника питания синусоидальной формы, по фазе совпадающий с входным напряжением, т. е. сделать источник питания по отношению к первичной сети активной нагрузкой.

Микросхема IL6562D является однокаскадным ШИМ-контроллером со встроенным корректором коэффициента мощности. На основе данного драйвера возможно построение как гальванически развязанного, так и гальванически связанного с первичной сетью источника питания со стабилизацией по току. Мощность источника питания может варьироваться от нескольких десятков до сотни ватт и даже более (до 250 Вт). Значение максимальной мощности зависит от параметров внешнего ключевого транзистора и габаритной мощности трансформатора.

Микросхема IL6562D разработана для управления преобразователями, работающими в режиме критической проводимости, где схема ШИМ находится в автоколебательном режиме, включение которого обеспечивается детектором нулевой энергии трансформатора, а выключение осуществляется компаратором, чувствительным к току. Детектор нулевой мощности позволяет отключать выход контроллера при малой нагрузке без возникновения опасных перенапряжений.

Через вход MULT с резистивного делителя на микросхему поступает сигнал входного напряжения, полученного после входного выпрямителя. Форма входного напряжения для ШИМ-преобразователя является опорным сигналом, и ток через силовой ключ задается в соответствии с полученной формой входного напряжения, поэтому потребляемый преобразователем ток имеет синусоидальную форму и совпадает по фазе с питающим напряжением. На выходе преобразователя получается стабилизированное напряжение.Высоколинейный умножитель включает специальную схему, способную снижать искажения входного переменного тока, что позволяет расширить диапазон функционирования с предельно низким суммарным значением коэффициента нелинейных искажений даже с широким нагрузочным диапазоном.

Выходное напряжение контролируется усилителем ошибки и точным (1 % при T_A = 25 °C) внутренним источником опорного напряжения.

Выходной каскад вентиля управления с двумя устойчивыми состояниями, с большим выходным вытекающим и втекающим током, применим для управления мощным MOSFET или IGBT транзисторами, что в сочетании с другими параметрами делает микросхему отличным недорогим решением для импульсных блоков питания.

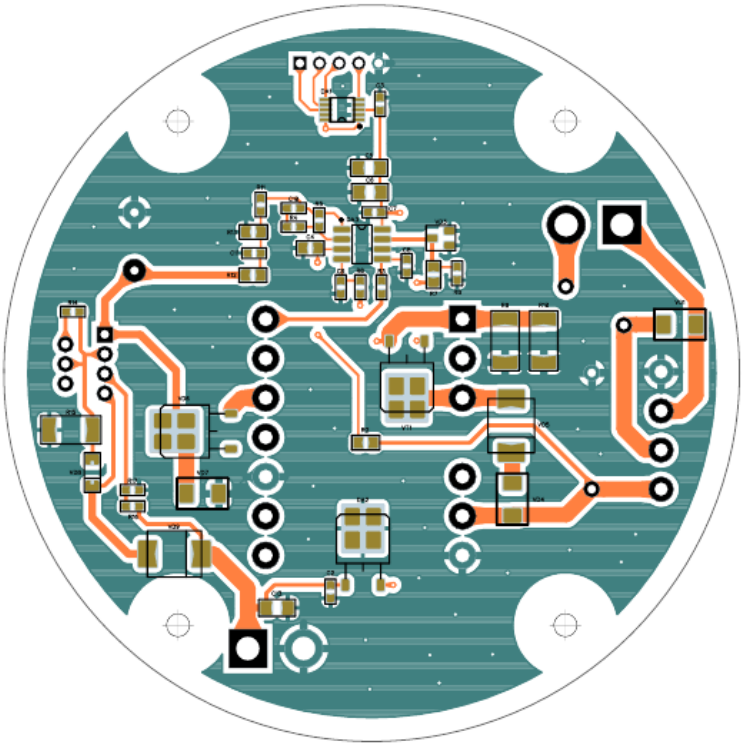
Микросхема IL6562D характеризуется предельно низким током потребления (не более 70 мкА до включения и не более 5 мА в рабочем режиме) и включает функцию блокировки.

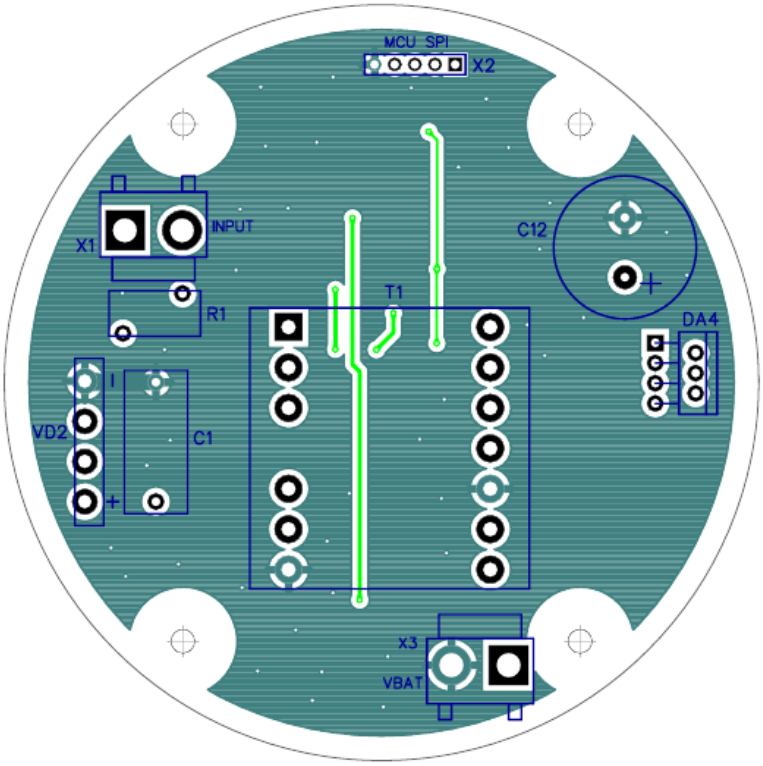
Эффективна двухступенчатая защита от перенапряжения, включающая безопасное управление скачками напряжения, которые могут происходить либо при запуске, либо при обрыве нагрузки.

Назначение выводов микросхемы:

- INV (01) - Вход инвертирующий усилителя ошибки. Значение выходного напряжения с предрегулятора коррекции фактора мощности передается на вывод через резистивный делитель;
- COMP (02) - Выход усилителя ошибки. Компенсирующая цепь располагается между этим выводом и INV (вывод 01) для достижения стабильности в цепи контроля напряжения и гарантии высокого коэффициента мощности и низкого THD (суммарное значение коэффициента нелинейных искажений);
- MULT (03) - Вход умножителя. Этот вывод связан с выпрямленным напряжением сети через резистивный делитель и обеспечивает синусоидальный опорный сигнал для цепи обратной связи;
- CS (04) - Вход ШИМ компаратора. Ток, протекающий через MOSFET, контролируется с помощью резистора. Результирующее напряжение, направленное к этому выводу, сравнивается с внутренним синусоидальным опорным сигналом, генерируемым умножителем, и управляет выключением MOSFET;
- ZCD (05) – Вход контролирующий. Этот вход контролирует повышение размагничивания катушки в переключающем режиме. Отрицательный уровень включает MOSFET;
- GND (06)- Общий вывод;
- GD (07) - Выход управляющего вентиля. Выходной каскад может управлять транзисторами MOSFET и IGBT с максимальным пиковым выходным вытекающим током 600 мА и выходным пиковым втекающим током 800 мА. Высокий уровень напряжения на этом выходе ограничивается на уровне 12 В, чтобы избежать недопустимых значений напряжения на затворе транзисторов в случае, когда U_{CC} более 12 В;
- Vcc (08) - Вывод питания. Для расширения диапазона по напряжению питания верхний предел увеличен до 22 В.

ПРИЛОЖЕНИЕ В Печатная плата информационно-управляющей системы





ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты реализации

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
Главный конструктор
АО «НПО «Рязаньприбор»
_____ Григоренко Д.В.
«27» апреля 2026 г.

АКТ
реализации результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Блинниковой Ларисы Геннадьевны

Настоящим актом удостоверяется, что результаты исследований, полученные в кандидатской диссертации Блинниковой Л.Г., представленные в виде:

– адаптивного способа компенсации вибраций критичных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА),

– системы обнаружения несанкционированного доступа (НСД) к элементам РЭА, использованы АО «НПО «Рязаньприбор» при испытаниях модернизированной аппаратуры образования тракта передачи данных (АОТ ПД) изделия 5Я67М.

Предложенные Блинниковой Л.Г. решения позволяют расширить классификационную группу эксплуатации аппаратуры АОТ ПД с 1.1 до 1.3 (ГОСТ РВ 20.39.304-98) по сравнению со стандартными техническими решениями, реализовать в системе защиты от НСД изделия 5Я67М дополнительные каналы обнаружения НСД к элементам РЭА АОТ ПД.

Заместитель главного конструктора
АО «НПО «Рязаньприбор» Лурин А.А.

Начальник научно-исследовательского отдела
АО «НПО «Рязаньприбор» Коршунов А.А.

Научный консультант
доктор технических наук, профессор Ручкин В.Н.

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель начальника
Рязанского гвардейского высшего
воздушно-десантного командного училища
по учебной и научной работе
гвардии полковник А. Кулешов
«10» февраля 2026 г.
М.П.

АКТ
о внедрении в учебный процесс результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Блинниковой Ларисы Геннадьевны

Комиссия в составе председателя – начальника кафедры организации связи и автоматизированных систем управления гвардии полковника Федюшкина А.В., членов комиссии: профессора кафедры организации связи и автоматизированных систем управления, кандидата военных наук, профессора Будкина Е.Г. и доцента кафедры организации связи и автоматизированных систем управления, кандидата технических наук Нестерова К.М. свидетельствует о том, что результаты исследований, полученные в кандидатской диссертации Блинниковой Л.Г., внедрены в учебный процесс на кафедре организации связи и автоматизированных систем управления в учебной дисциплине « Техническое обеспечение связи и автоматизации» в модуле 3 «Основы технологии ремонта и обслуживания средств связи и автоматизации» и в ходе разработки выпускных квалификационных работ по специальности 11.05.04 «Инфокоммуникационные технологии и системы специальной связи».

Председатель комиссии:
Начальник кафедры организации связи
и автоматизированных систем управления
гвардии полковник А. Федюшкин

Члены комиссии:
Профессор кафедры организации связи
и автоматизированных систем управления
кандидат военных наук, профессор Е. Будкин

Доцент кафедры организации связи
и автоматизированных систем управления
кандидат технических наук К. Нестеров

«10» февраля 2026 г.

УТВЕРЖДАЮ
Начальник 8 Управления Генерального штаба
Вооруженных Сил Российской Федерации,
кандидат технических наук
Ю.Кузнецов
«27» декабря 2018 г.

АКТ
реализации в Восьмом управлении ГШ ВС РФ результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата технических наук Блинниковой Ларисы Геннадьевны

«27» декабря 2018 г. г. Москва

Комиссия в составе: председателя – к.т.н., Марейченко И.В., членов комиссии: к.т.н. Кондакова С.Е. и к.т.н. Туринцева В.Н. составила настоящий акт в том, что результаты диссертационных исследований Блинниковой Л.Г., представленные в виде адаптивного метода компенсации вибраций критичных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и системных решений по обнаружению несанкционированного доступа (НСД) к элементам РЭА, были реализованы в ходе работ по улучшению технических характеристик аппаратуры ПД-441-01, разработанной для передачи специальных данных и эксплуатируемой в воинских частях и организациях Министерства обороны Российской Федерации.

Предложенные Блинниковой Л.Г. результаты диссертационных исследований позволили расширить возможности по условиям эксплуатации и хранения аппаратуры ПД-441-01, удовлетворяющие требованиям групп 1.1, 1.3 ГОСТ РВ 20.39.304-98, и повысить защищенность от НСД к элементам РЭА, применяемым для обработки специальных данных, по сравнению с ранее реализованными техническими решениями.

Председатель комиссии:
кандидат технических наук И.Марейченко

Члены комиссии:
кандидат технических наук С.Кондаков

кандидат технических наук И.Туринцев

ПРИЛОЖЕНИЕ Д Патенты

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 205432

УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ РЕКУПЕРАТИВНЫМ АМОРТИЗАТОРОМ

Патентообладатель: ***Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования "Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище" Министерства обороны Российской Федерации (RU)***

Авторы: ***Гармаш Юрий Владимирович (RU), Блинникова Лариса Геннадьевна (RU), Шипякова Алла Александровна (RU)***



Заявка № **2020127938**
Приоритет полезной модели **19 августа 2020 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **14 июля 2021 г.**
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **19 августа 2030 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 162488

УСТРОЙСТВО МАГНИТНОГО АМОРТИЗАТОРА-ГЕНЕРАТОРА

Патентообладатель(ли): ***Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище (военный институт) имени генерала армии В.Ф. Маргелова МО РФ (RU), Российская Федерация, в лице которой выступает Министерство обороны Российской Федерации (RU)***

Автор(ы): ***см. на обороте***

Заявка № **2015120185**

Приоритет полезной модели **27 мая 2015 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации ***24 мая 2016 г.***

Срок действия патента истекает **27 мая 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) 162 488 (13) **U1**

(51) МПК
F16F 6/00 (2006.01)
F16F 15/03 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015120185/11, 27.05.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.05.2015

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 27.05.2015

(45) Опубликовано: 10.06.2016 Бюл. № 16

Адрес для переписки:
390007, г. Рязань, ул. Военных автомобилистов, 12, Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище (военный институт) имени генерала армии В.Ф. Маргелова, ООНР, Герасимову А.Д.

(72) Автор(ы):
Сарбаев Владимир Иванович (RU),
Гармаш Юрий Владимирович (RU),
Блинникова Лариса Геннадиевна (RU),
Усачев Юрий Владимирович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище (военный институт) имени генерала армии В.Ф. Маргелова МО РФ (RU),
Российская Федерация, в лице которой выступает Министерство обороны Российской Федерации (RU)

(54) УСТРОЙСТВО МАГНИТНОГО АМОРТИЗАТОРА-ГЕНЕРАТОРА

(57) Формула полезной модели

Устройство амортизатора-генератора, содержащее две трубки, причем тонкая магнитная трубка, сделанная из магнитных колечек, разделенных магнитопроницаемыми прокладками, скользит внутри большей полой трубки-катушки, представляющей собой медную катушку, намотанную вокруг пластиковой трубки, отличающееся тем, что в устройство дополнительно введены диодный мост, первый конденсатор, термокомпенсированный источник опорного напряжения, делитель напряжения, компаратор, усилитель на биполярном транзисторе, мощный силовой ключ, выполненный на полевом транзисторе, катушка индуктивности, второй конденсатор, первый и второй диоды, причем входы переменного напряжения диодного моста подключены к выводам медной катушки, плюс диодного моста связан с первым выводом первого конденсатора, плюсом питания усилителя на биполярном транзисторе и истоком мощного силового ключа, сток которого соединен с катодом второго диода и через катушку индуктивности связан с первым выводом второго конденсатора и анодом первого диода, катод которого соединен с плюсовой шиной бортовой сети, которая соединена с первым выводом делителя напряжения, плюсовыми выводами питания компаратора и термокомпенсированного источника опорного напряжения, выход которого связан с неинвертирующим входом компаратора, инвертирующий вход компаратора соединен с выходом делителя напряжения, а его выход связан с входом усилителя на биполярном транзисторе, а его выход - с входом управления мощного силового ключа, минусовая шина питания бортовой сети соединена с

RU 162488 U1