

На правах рукописи

ЮНЕСС САРЕМ

**АЛГОРИТМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ СЕТЬ  
СИСТЕМОЙ ПОДВЕСКИ АВТОМАШИНЫ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации  
(в технических системах)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель: **Лобусов Евгений Сергеевич**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Официальные оппоненты: **Магомедов Магомед Хабибович**  
Доктор физико-математических наук, ст. научный сотрудник каф. «Прикладная механика и управление» МГУ им. Ломоносова М.В.  
**Серов Владимир Александрович**  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладные информационные технологии» МИРЭА-Российский технологический университет.

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"

Защита состоится «2» марта 2021 г. в 16 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, д. 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы и замечания на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, ул 2-я Бауманская., д.5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.02.

Автореферат разослан «\_\_\_» 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета **И.В. Муратов**  
кандидат технических наук, доцент

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Управление современными автомобилями реализуется с использованием средств электроники, обеспечивающих безопасность, помочь водителю и информационно-развлекательных устройств становится стандартом для новых образцов автомобилей. В современных транспортных средствах обычно используется ряд различных сетевых протоколов для интеграции вышеперечисленных систем и средств. Внедрение большого количества датчиков для обеспечения функционирования систем помощи водителю и появившиеся связанные с этими датчиками требования к высокой пропускной способности, ускорили начало разработок более быстродействующих и адаптируемых технологий автомобильной сетевой связи. Одной из подсистем такого сетевого транспортного средства является подсистема подвески. Системы управления подвеской представляют собой классический пример распределённых архитектур встроенных систем управления. Управление активной или полуактивной системой подвески требует наличия информации о состоянии, которая может быть получена с помощью набора датчиков, расположенных в разных частях транспортного средства. Эта информация далее обрабатывается контроллером для того, чтобы рассчитать управляющие силы от различных исполнительных устройств, приводов, управляемых демпферов. Таким образом, реализуется система управления через сеть (СУС).

Определяющей особенностью СУС является то, что она соединяет киберпространство с физической средой, позволяя выполнять несколько различных задач, удалённых на значительном расстоянии.

Усложнение процесса проектирования и анализа характеристик СУС вызвано включением коммуникационной сети в контур управления с обратной связью, поскольку это приводит к возникновению дополнительных задержек в контурах управления, а также повышению вероятности потери пакетов данных. Необходимо учитывать, что в зависимости от приложения задержки могут значительным образом сказываться на снижении показателей производительности и качества функционирования системы. Кроме того, наиболее критичной и важной проблемой, связанной с проектированием СУС, является соблюдение требований, предъявляемых к надежности и безотказности системы.

Анализ и синтез сетевой системы управления требуют интеграции и координации связи, вычислений и управления. Следовательно, при проектировании СУС может возникнуть ряд затруднений, которые не могут быть надлежащим образом решены с помощью традиционных подходов и / или существующих распределённых парадигм управления. К таким затруднениям можно отнести: коммуникационные проблемы, проблемы выбора соответствующего математического аппарата, проблемы синтеза законов управления, топологии и производительности сетевых соединений.

Фактически, на данный момент существует не так много исследований, в которых делается акцент на выбор таких параметров сети как скорость, время

передачи, используемые протокол передачи данных и топология сети, а также выбора регулятора, который наиболее подходит для сетевой системы управления; чаще всего в большинстве работ рассматриваются только некоторые из перечисленных выше моментов. Решением этих проблем занимались Магомедов М.М., Воронов Е.М., Лобусов Е.С., Сейдж , Эйкхоф П., Дейч А.М., Гудсон Р.Е. , Жилейкин М.М. и др.

Наличие в составе систем управления сетевых соединений приводит к необходимости использовать способы описания, отличные от традиционных, т.е. возникает необходимость описывать функционирование такой сетевой системы управления единым математическим аппаратом, объединяющим существенно разнородные явления.

Таким аппаратом, позволяющим рассматривать сетевую систему управления, может выступать аппарат сетей Петри. Сети Петри и, особенно, их модификации обладают большими потенциальными возможностями. С помощью данного аппарата оказывается возможным моделировать динамику процессов, вводя понятие состояние сети, решать задачи достижимости заданного состояния, проверять свойство элементов сети; возможность моделирования таких процессов, как синхронизация, последовательность, взаимное исключение, параллелизм и т.д. Все это позволяет считать сети Петри в их модифицированном варианте одним из предпочтительных способов описания, исследования и моделирования систем управления, содержащих сети. Существующие СУС имеют ряд недостатков, в частности, один из них связан с тем, что настройка СУС производится на уже реальном объекте без предварительного тщательного анализа, при котором учитывается и изменение профиля дороги. Это позволяет существенно сократить время настройки.

**Объект исследования.** Динамическая система подвески автомобиля совместно с наличием сетевой связи между элементами системы.

**Предмет исследования.** Сетевая технология в системе управления демпфированием подвески колесной машины.

**Цель работы.** Разработка и исследование алгоритмов демпфирования и управления через сеть полуактивными системами подвески автомашин. Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

1. Провести сравнительный анализ используемых сетевых технологий и выделить наилучшую сеть для применения в системе управления подвеской колесной машины.
2. Разработать сеть для описания доминирующих элементов подвески колесной машины, позволяющую исследовать комплексную модель системы.
3. Разработать регулятор для системы управления подвеской колесной машины с учетом влияния эффекта демпфирования.
4. Для учета влияния дорожного профиля на качество управления подвеской колесной машины разработать алгоритм моделирования профиля дороги с учетом динамических параметров машины и рельефа дороги.
5. Разработать процедуру отработки сетевой системы на базе аппарата сетей Петри.

6. Создать полунатурную модель полуактивной системы управления подвеской для проведения детальных исследований.

### **Научная новизна**

1. Результаты сравнительного анализа коммуникационных технологий, применяемых в современном автотранспорте и обоснование выбора сетевого стандарта CAN для использования в динамических системах транспортного средства, в частности в системе динамической подвески автомобиля.

2. Предложена 3-х этапная процедура анализа динамических свойств подвески, позволяющая разработать алгоритм управления, обеспечивающий желаемое качество системы, учесть особенности функционирования реальной сети, сравнить различные законы управления, снизить затраты на проектирование и последующую эксплуатацию и модернизацию.

3. Разработана модифицированная сеть Петри для описания доминирующих элементов подвески колесной машины, позволяющая получить и исследовать объединённую алгоритмическую модель всей системы.

4. Разработан регулятор для СУС подвески колесной машины с текущей идентификацией параметра демпфирования и изменением параметра демпфера в соответствии с интегралом от текущего рассогласования между желаемым и текущим значениями демпфирования.

5. Предложен алгоритм имитации профиля дороги, который принципиально отличается от используемых стационарных формирующих фильтров возможностью воспроизводить нестационарные процессы, связанные с разгоном, торможением или текущим изменением профиля.

6. Разработана имитационная модель системы подвески, состоящая из узлов и модели шины CAN, с возможностью в процессе моделирования изменять такие параметры, как скорость сети, время передачи, приоритетность доступа узлов к шине, а также полунатурная модель полуактивной системы управления подвеской с включением физической шины CAN, позволяющая провести исследования с различными регуляторами.

**Практическая ценность** - Создание процедуры отработки функционирования системы подвески автомобиля с управлением через сеть, опирающейся на современные математические платформы и аппаратные средства и включающей три последовательных этапа теоретический, имитационный и полунатурный- обеспечивающих возможность разработать варианты законов управления, выполнить их сравнительный анализ на имитационных моделях и учесть реальные свойства сети при полунатурном моделировании, варьируя такие параметры сети как скорость передачи, приоритеты узлов, что обеспечивает достоверность и надёжность получаемых результатов. По сравнению с существующими вариантами разработанная СУС обеспечивает эффективность демпфирования неровностей дорожного покрытия, соответствующую непрерывным аналогам реализации.

### **Внедрение результатов работы**

Создана и внедрена в учебный процесс лабораторная работа по исследованию СУС. Материалы диссертации использованы в учебном

процессе факультета «Информатика и системы управления» МГТУ им. Н.Э. Баумана в курсе лекций «Управление в технических системах».

**Достоверность** полученных результатов и выводов обеспечивается глубокой теоретической проработкой известных подходов, использованием апробированных методов, корректностью математических выводов при разработке СУС, а также согласованностью полученных результатов с данными полунатурного моделирования с известными данными, опубликованными в открытой печати.

**Методы исследования.** Для исследований применялись методы теории управления и теории случайных процессов, теории сетей Петри, а также вычислительные методы, математическое и полунатурное моделирование.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций:

1. The 13th International Symposium “Intelligent Systems — 2018” (Санкт-Петербург, 2018 г.).
2. XLIII академических чтениях по космонавтике (Москва, 2019 г.).
3. XLIV академических чтениях по космонавтике (Москва, 2020 г.).

### **Публикации**

Основные результаты работы по теме диссертации опубликованы в четырех научных работах автора, из них две — в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и два — в журнале БД SCOPUS, общим объемом 3,6 п.л./ 2 п.л.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов по работе, списка используемой литературы, включающего 102 наименования. Общий объем составляет 155 страниц, в том числе 56 рисунков и 9 таблиц.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Результаты сравнительного анализа свойств и характеристик различных видов коммуникационных технологий, применяемых в современных автомобилях и обоснование выбора сетевого стандарта CAN для использования в динамических системах транспортного средства, в частности в системе динамической подвески автомобиля.

2. Модификация классической сети Петри, позволяющая формировать объединённую непрерывно- событийную модель динамической системы подвески, включающей описания отдельных элементов и частей системы подвески- измерителей, преобразователей сигналов, закона управления, исполнительных устройств, и, особенно, самой сети с включением её основных свойств.

3. Методика отработки функционирования системы с управлением через сеть, опирающейся на современные математические платформы и аппаратные средства и включающей три последовательных этапа -теоретический, имитационный и полунатурный- обеспечивающих возможность исследования различных законов управления на имитационных моделях и учитывающей реальные свойства сети при полунатурном моделировании.

4. Регулятор для ССУ подвески колесной машины с текущей идентификацией параметра демпфирования, снабженный процедурой сравнения его с заданным желаемым значением и изменением параметра демпфера в соответствии с интегралом от текущего рассогласования.

5. Алгоритм моделирования профиля дороги, который отличается от используемых стационарных формирующих фильтров возможностью воспроизводить нестационарные процессы, связанные с разгоном, торможением или текущим изменением профиля. В основе данного алгоритма лежит разбиение всей дороги на участки фиксированной длины и аппроксимация профиля на каждом участке многочленом 3-го порядка со случайными коэффициентами.

6. Оригинальный комплекс полунаатурного моделирования на базе использования и адаптации аппаратных средств National Instruments, позволивший провести более детальное исследование функционирования динамической системы подвески с учётом физически реализуемой шины CAN при различных параметрах сети, оценить влияние и обоснованно выбрать эти параметры.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и основные задачи диссертации, определены научная новизна и практическая ценность работы, приведены выносимые на защиту научные положения и дано краткое описание содержания глав диссертации.

**В первой главе** представлен обзор используемых на сегодняшний день технологий автомобильной связи, некоторых ключевых свойств каждой из них, а также типовых коммуникационных требований, определяемых этими сетевыми технологиями.

Сформулировано определение систем управления через сеть, представляющие собой системы управления, в которых контуры управления замкнуты через коммуникационную сеть. Рассмотрены преимущества и недостатки этих систем.

Временные задержки, возникающие в системе управления при использовании сети, являются наиболее важным и опасным фактором, их влияние на показатели качества обязательно должно учитываться при проектировании системы.

Представлены результаты анализа основных требований к средствам связи в ССУ: отказоустойчивость, детерминизм, пропускная способность сетевых соединений и др.

Работа ряда базовых автомобильных подсистем основана на доступе к сети. К таким подсистемам относятся система шасси, система срабатывания подушек безопасности, подсистемы комфорта водителя и пассажиров, подсистемы, работающие по технологии XBW (X-by-wire— «по проводам»), мультимедийные и информационно-развлекательные системы, системы беспроводной связи и телематики.

Наиболее известными и важными сетевыми протоколами, которые используются при обмене данными между различными автомобильными подсистемами, являются CAN, LIN, Byteflight и MOST. Результаты сравнения этих протоколов показали, что протокол CAN с топологией сети типа «общая шина» широко используется в различных типах транспортных средств, именно, во всевозможных внутритранспортных динамических подсистемах, и при этом позволяет успешно справляться с поставленными задачами. Сравнение осуществлялось на основе наиболее распространённых свойств каждого протокола, немаловажными критериями также являлись стоимость и возможность их потенциального применения в различных подсистемах транспортного средства.

Таким образом, в результате проведенного анализа видов сетевой связи компонентов системы подвески выбрана сеть CAN, под которой подразумевается сочетание протокола CAN с топологией типа «шина».

Шина данных CAN (англ. ControllerAreaNetwork— «область, охваченная сетью контроллеров») представляет собой комплекс стандартов промышленных сетей, поддерживающий последовательную передачу данных в режиме реального времени с высокой степенью надёжности информационного обмена. Протокол CAN обладает такими значимыми свойствами, как ретрансляция (повторная передача) повреждённых сообщений, способность обнаруживать и обрабатывать коллизии и ошибки, возможность распределения приоритета отправленных и полученных сообщений в зависимости от их важности. Основной отличительной особенностью адресации в CAN является использование идентификатора сообщения, описывающего содержимое пересылаемых данных. Идентификатор не указывает адрес сообщения, а скорее сообщает информацию о том, откуда оно было отправлено; другими словами, предоставляет сведения об источнике данных. Сообщения в пределах шины CAN или сети CAN могут передаваться периодически, по запросу или при изменении состояния с постоянной и фиксированной скоростью передачи данных до 1 Мбит/с.

**В второй главе** рассмотрено формирование полуактивной системы демпфирования автомобиля с использованием технологии сетевого управления для основного узла подвески— пары платформа-колесо с интегральным законом управления демпфированием (Рис.1,а).

Выполнено сравнительное исследование двух вариантов алгоритма управления демпфированием. Один из них соответствовал известному MIN / MAX закону, а другой – предлагаемому алгоритму управления подвеской с идентификацией параметра демпфирования (Рис.1,б).

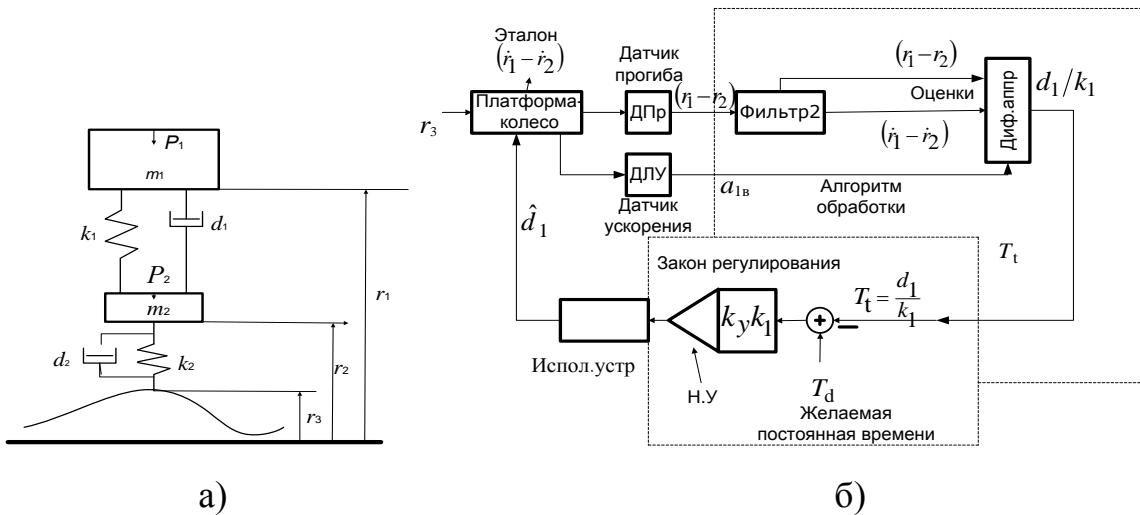


Рис. 1. Физическая модель узла подвески и блок-схема системы демпфирования

Характерным свойством MIN / MAX закона-релейное изменение параметра демпфера  $d_1$  в зависимости от логического условия (больше или меньше нуля), зависящего от значений произведения *абсолютной* скорости платформы  $v_{abs}$  и *относительной* скорости  $v_{rel}$  между платформой и колесом.

$$d_1 = d_{\max}, \text{ if } v_{abs} * v_{rel} \geq 0 . \quad (1)$$

$$d_1 = d_{\min}, \text{ if } v_{abs} * v_{rel} \leq 0$$

Характерным свойством предлагаемого закона- текущая идентификация параметра демпфирования, сравнение его с заданным желаемым значением и изменение параметра демпфера в соответствии с интегралом от текущего рассогласования. Алгоритм идентификации и алгоритм закона регулирования (интегральный) реализуются в локальном процессоре; ввод и вывод данных осуществляется через преобразователи аналог- цифра (АЦП) и цифра - аналог (ЦАП). Желаемая уставка вырабатывается извне в бортовом центральном вычислителе (БЦВК) и пересыпается через сеть. На (Рис. 2,а) показана схема реализации данного варианта с использованием сети

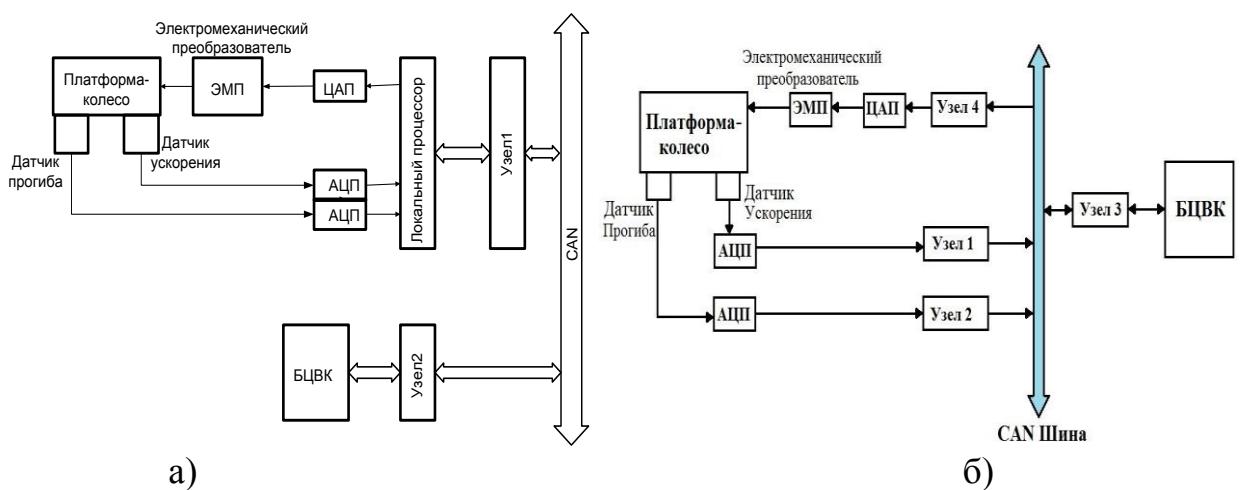


Рис. 2. Схема реализации системы демпфирования с сетью и алгоритмами а) в локальном процессоре б) в центральном процессоре.

Рассмотрено функционирование контура изменения демпфирования в составе всей системы подвески.

Уравнение объекта платформа – колесо в переменных состояния в соответствии с (Рис.1,а).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}n_r + \mathbf{F}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор состояния  $4 \times 1$ ,  $n_r$  – высота профиля дороги (скаляр),  $\mathbf{F}$  – вектор сил тяжести; строго показано, что  $\frac{d(d_d - d)}{dt} = -k(d_d - d)$ , где  $d_d$  – желаемое

(задаваемое) значение демпфирования в виде постоянной времени  $T_d$ ,  $d$  – текущее значение демпфирования по результатам идентификации,  $k$  – коэффициент усиления контура; при интегральном **И** законе изменения параметра демпфирования  $d$  и при больших значениях  $k$  рассогласование  $\Delta = (d_d - d)$  практически быстро устраняется, т. е.  $d \approx d_d$  при достаточно малом промежутке времени  $\Delta t$ . Текущая идентификация, реализуемая на *конечном* промежутке времени, соответствует алгоритмам метода дифференциальной аппроксимации.

Таким образом, в тех случаях, когда определение текущего значения  $d$  происходит без существенного запаздывания, влияние динамических свойств внутреннего контура демпфирования практически отсутствует. В действительности, конечно, существуют ограничения на величину передаточного коэффициента усиления.

Предложен алгоритм моделирования профиля дороги, который *принципиально* отличается от используемых для этой цели стационарных формирующих фильтров, возможностью воспроизводить нестационарные процессы, связанные с разгоном, торможением или текущим изменением профиля. В основе данного алгоритма лежит разбиение всей дороги на участки фиксированной длины и аппроксимация профиля на каждом выбранном кванте по расстоянию  $\Delta s$  многочленом 3-го порядка со случайными коэффициентами. Этот процесс аппроксимации основывается на реальных записях дороги или подбирается эвристически экспертом дорожником. В качестве случайной функции реально принят многочлен 3-го порядка на каждом участке длины  $\Delta s$

$$x(s) = X_0 + X_1 s + X_2 s^2 + X_3 s^3, \quad (3)$$

где  $X_0, X_1, X_2, X_3$  – неизвестные случайные коэффициенты, подлежащие определению, а  $s$  – координата расстояния.

Если известны значения переменной  $x(s)$  и её производной  $\frac{dx(s)}{ds} = x'(s)$  в начале и конце интервала  $\Delta s$  (эти переменные рассматриваются и генерируются как случайные), то неизвестные коэффициенты многочлена определяются однозначно. Тем самым, оказывается возможным по задаваемой информации в

краевых точках интервала восстановить данные в промежутке интервала по расстоянию и обеспечить непрерывное продолжение на следующий участок, используя новые случайные значения переменной и производной в конце следующего промежутка и т.д. Тем самым обеспечивается непрерывность описания профиля дороги (Рис.3).

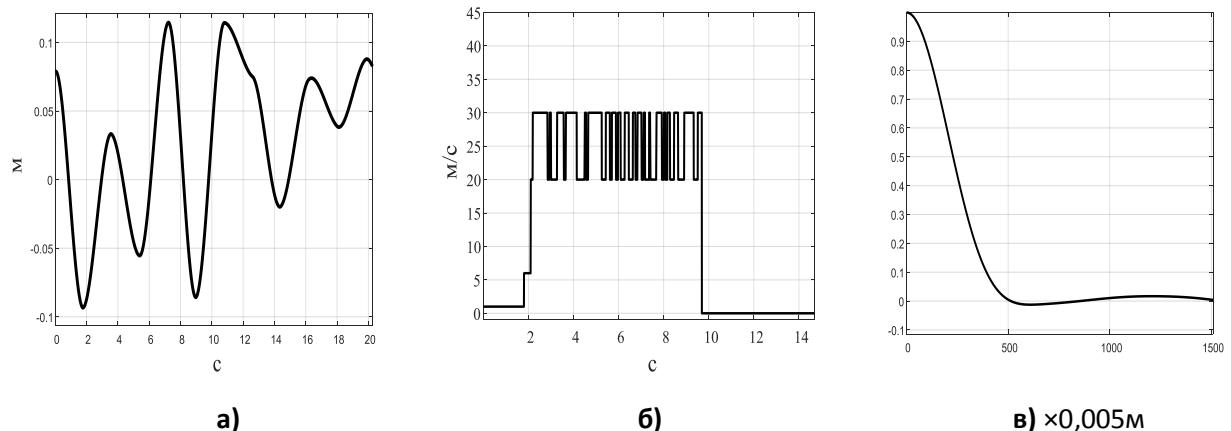


Рис. 3. а)вид профиля дороги [м]. б)изменение скорости авто[м/с].

в)нормированная корреляционная функция дороги с дискретностью  $\times 0,005$  [м].

Процедура проведения исследований подвески включает три этапа: 1-ый этап отработки (теоретический) заканчивается моделированием принятых для исследования законов управления демпфированием и его результаты служат в качестве эталона для последующего сравнения.

На 2-ом этапе отработки выполняется моделирование с физической моделью сети. Предложено 2 варианта сетевой реализации системы демпфирования для основной пары платформа-колесо, отличающиеся местом размещения алгоритмов обработки (см. Рис. 2). Выбор той или иной схемы зависит в большей степени от практических возможностей, ограничений и характеристик имеющейся сети.

Исследование динамических свойств системы демпфирования для пары платформа-колесо проводилось с использованием физической шины CAN на оборудовании комплекса National Instruments (NI) с математической платформой LabView, которое позволило показать влияние характеристик сети на результирующие свойства системы и, тем самым, целенаправленно подойти выбору характеристик сети при сохранении желаемых динамических свойств всей системы демпфирования.

На (Рис.4) и (Рис.5) показана общий вид стенда полунатурного моделирования, включающего шину и драйверы CAN, контроллер и объект управления (модель платформа- колесо).



Рис. 4. Общий вид стенда полунатурного моделирования

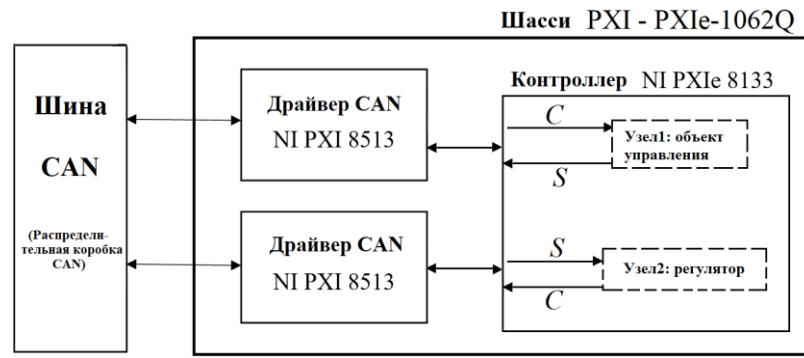


Рис. 5. Физические компоненты стенда

Проведено сравнение показателей качества сетевой системы при использовании двух различных типов регуляторов - предлагаемого регулятора NSAR и известного регулятора MIN / MAX- при различных параметрах функционирования сети — скорости сети и шага квантования по времени. Было установлено, что предлагаемый регулятор (NSAR) обеспечивает хорошее качество в обоих рассмотренных случаях (с / без использования сети).

Все полученные результаты моделирования позволяют подойти к практической реализации, чтобы на их основе впоследствии могла быть сконструирована реальная система демпфирования с реализованным алгоритмом регулирования NSAR.

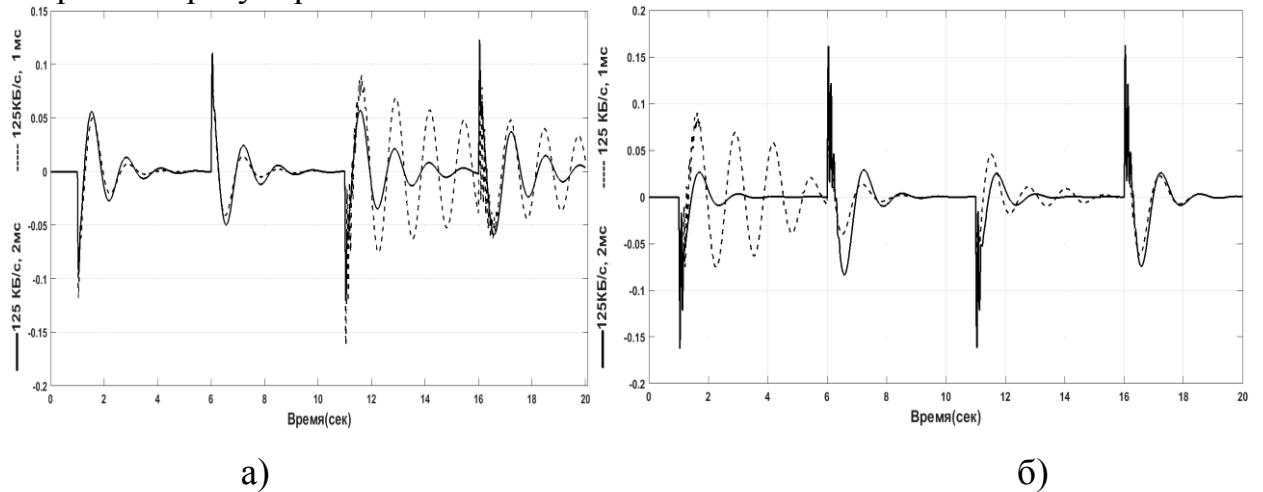


Рис. 6. Изменение прогиба подвески при скорости сети 125 Кбит/с, времени передачи равном 1 мс. и 2 мс а) для регулятора NSAR б) для регулятора Min/Max

Условия проведения эксперимента: Профиль дороги представляет собой прямоугольный сигнал с амплитудой 0,1 м и периодом 10 с, эксперименты проводятся при различных значениях скорости сети: 500 Кбит/сек (высокоскоростная сеть) и 125 Кбит/сек (низкоскоростная сеть). На (Рис. 6) представлен график изменения прогиба подвески при использовании NSAR для низкоскоростной сети (125 Кбит/с) со временем передачи (шаг квантования по времени), равным 1 мс и 2 мс.

Как отчётливо видно, выбор параметров сети оказывается на результатах. Помимо прогиба подвески важной переменной является ускорение платформы. Так при параметрах сети: скорость 125 Кбит/с и времени передачи 1 мс и 2 мс величины СКО разности (текущее ускорение – g) для выбранных законов составляла значения:  $СКО_{NSAR\_без\ сети} = 1.087$ ,  $СКО_{NSAR\_125\text{кб/с}, 1\text{ мс}} = 1.301$ ,  $СКО_{NSAR\_125\text{кб/с}, 2\text{ мс}} = 1.091$ ,  $СКО_{MIN/MAX\_без\ сети} = 0.965$ ,  $СКО_{MIN/MAX\_125\text{кб/с}, 1\text{ мс}} = 1.287$ ,  $СКО_{MIN/MAX\_125\text{кб/с}, 2\text{ мс}} = 0.978$ .

В целом два регулятора (NSAR и MIN / MAX) дали схожие результаты, поскольку в основе обоих лежит один и тот же принцип управления регулируемым демпфером, реализованный различными способами. По итогам моделирования можно сделать вывод, что показатели обоих рассмотренных регуляторов, естественно, были лучше при высокой скорости сети, чем при низкой. Однако даже когда время передачи составляло 2 мс, а скорость составляла 125 Кбит / с (низкоскоростная сеть), полученные результаты были достаточно хорошими. Иными словами, регуляторы MIN / MAX и NSAR могут работать при низких параметрах сети и не накладывают строгих требований на применение высокоскоростных сетей. Таким образом, при правильной настройке параметров сети можно обеспечить качество функционирования практически соответствующему случаю отсутствия сети.

**В третьей главе** рассматривается система активной подвески автомобиля, представлена математическая модель системы активной подвески для полной модели автомобиля. В ССУ использованы ПИД и линейно-квадратичный регулятор (LQR), проведен ряд экспериментов с использованием этих регуляторов и последующей оценкой их эффективности. Показана реализация модели сетевой системы активной подвески с использованием пакета MATLAB и специализированного приложения Petri .NET Simulator для исследования влияния различных параметров сети на качество системы управления. Основное внимание уделяется влиянию сети на качество функционирования системы, а не методам управления.

Было установлено, что в низкоскоростной сетевой системе, регулятор LQR показал более хорошие результаты по сравнению с ПИД-регулятором и наилучшим образом выполнил требования, предъявляемые к системе управления. На (Рис. 7) показано изменение величины прогиба подвески, расположенной в переднем правом углу транспортного средства, при использовании регуляторов ПИД и LQR для скорости сети 125 Кбит / с, и времени передачи 10 мс

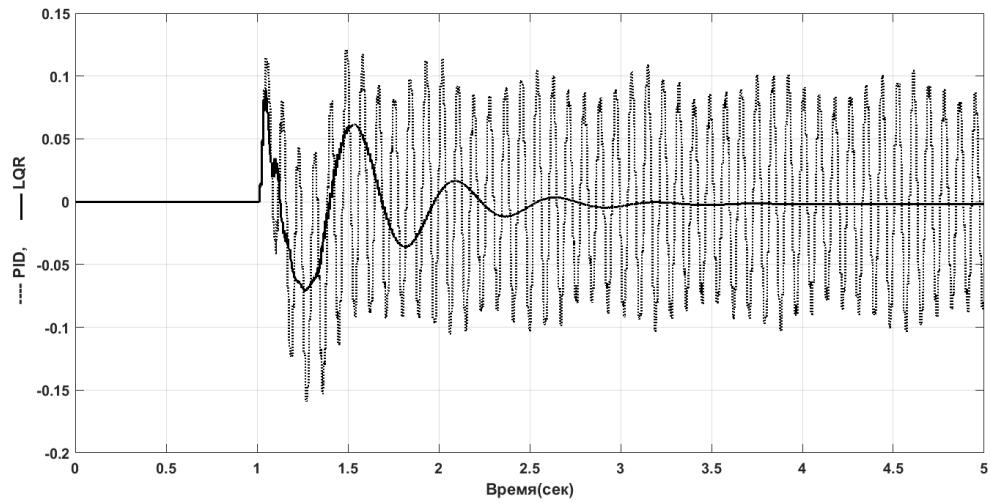


Рис.7. Прогиб подвески в переднем правом углу автомобиля при использовании регуляторов ПИД и LQR, (125 Кбит/с), времени передачи 10 мс.

В низкоскоростной сети ПИД регулятору для получения хороших результатов необходим период дискретизации, длительность которого больше, чем та, которая потребуется в подобной ситуации LQR-регулятору.

Практический результат представлен для планирования приоритета узлов, этот результат заключается в том, что входные узлы должны иметь приоритет выше, чем другие узлы. Еще один важный практический результат проведенных исследований заключается в следующем: различное планирование приоритетов узлов обеспечивает совершенно разное качество процесса управления. Для рассматриваемой системы показано, что узлы, которые передают входные данные (информацию с датчиков), должны иметь приоритет выше, чем другие узлы (например, регулятор и узлы, осуществляющие запись команд на шину).

На (Рис. 8) представлен график изменения величины прогиба подвески в переднем правом углу автомобиля при использовании ПИД-регулятора для двух вариантов распределения приоритетов узлов (подходящего и неподходящего для рассматриваемой системы).

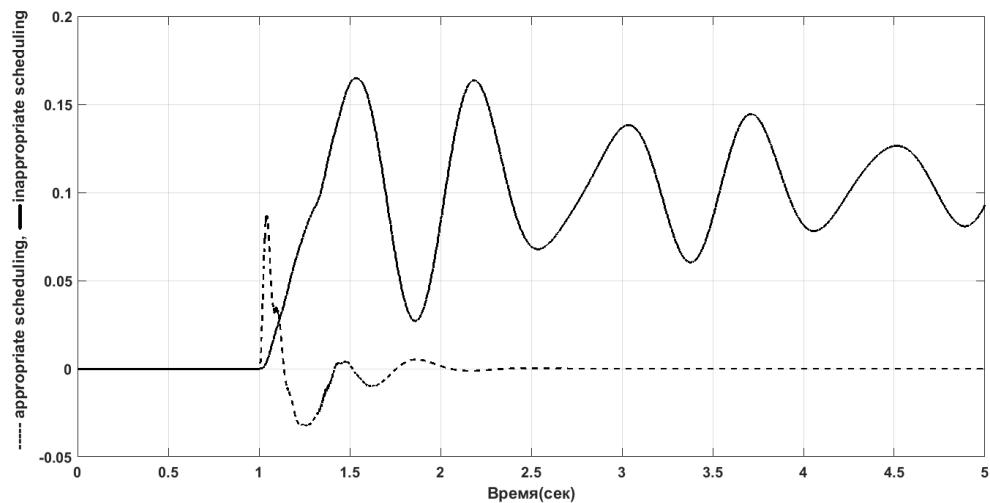


Рис. 8. Прогиб подвески в переднем правом углу автомобиля для двух ситуаций приоритетного планирования при использовании ПИД-регулятора.

Таким образом, команды управления, которые будут отправлены на привод, будут зависеть от последних значений. Полученное распределение приоритетов значительно лучше, чем если бы входные узлы обладали более низким приоритетом, чем остальные.

**В четвертой главе** показывается практическая применимость аппарата сетей Петри (модифицированных) для описания функционирования сетевых систем управления.

Сеть Петри (её модифицированный вариант— **М** сеть Петри) относится к двудольным ориентированным графам и состоит из вершин **V** 2-х типов: **P**-позиций (кружков) и **E**-расширенных переходов (планок)

$$M = \langle P, E, I, O, D, \mu \rangle,$$

где **P** - множество позиций  $p_i$ ; множество переходов  $e_j$ ; множество вершин **V**=**P**∪**E**, **P**∩**E**=**Ø**; и функций инцидентности **I** и **O**, определяющие отношения между разнородными вершинами, соответствующие дугам;  $\mu$ - маркировка сети, отражающая количество меток (символ  $\bullet$ ) в каждой позиции и **D**- множество векторов, принадлежащих меткам сети. Сам вектор представляет собой линейную последовательность (строку) произвольных данных произвольной длины. В размеченных позициях содержатся как расширенные метки, снабженные вектором данных, так и простые метки (без данных). Условия срабатывания перехода определяются наличием всех меток во входных позициях этого перехода.

Изображение типа планка представляет отдельный элемент **M**-сети Петри— расширенный переход, выполняющий преобразование входного вектора данных в выходной преобразованный вектор. Преобразование характеризуется конкретным оператором.

Для модели широко распространенной сети передачи данных CAN (Controller Area Network) в виде сети Петри целесообразно отразить поле данных, поле арбитража (приоритета) и, особенно, слот подтверждения (т.е. правильность приема). Еще один вариант сетевой системы представлен на (Рис. 2,б) с протоколом CAN и топологией «шина».

Сети Петри позволяют представлять в графической форме процессы получения аналоговых значений от датчиков (Рис.9), передачи кадра ошибки в шине CAN (Рис. 10) и распределения приоритетов доступа к шине (Рис.11).

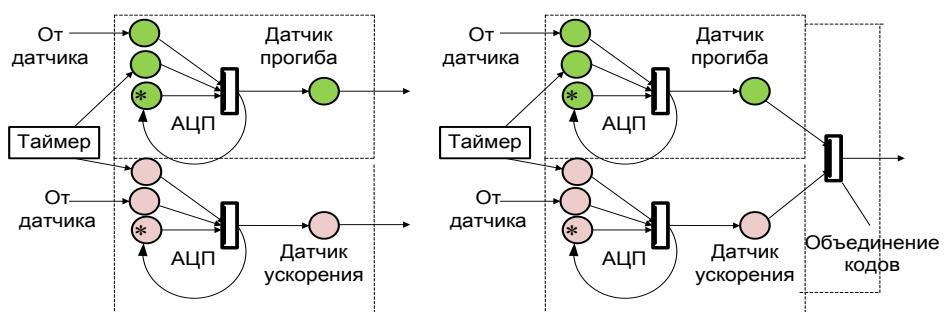


Рис. 9. Графическая модель процесса ввода данных от измерителей  
а) по отдельности(независимый ввод) б) с объединением кодов

На (Рис.10) представлена ситуация, когда в сети возникает ошибка в сетевой системе.

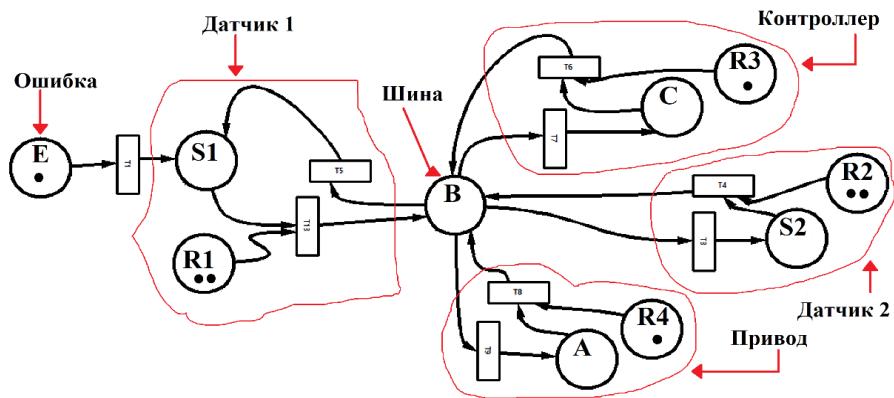


Рис. 10. Модель с кадром ошибки (ErrorFrame) в виде сети Петри для сетевой системы управления подвеской.

Узел, который обнаружил ошибку, отправляет кадр ошибки, и все узлы повторно ретранслируют этот кадр до тех пор, пока проблема, которая привела к появлению ошибки, не будет устранена.

На (Рис.11) показана модель сети Петри для реализации свойства приоритетности в сетевой системе, в которой используется протокол CAN. Узел с более высоким приоритетом имеет возможность первым получить доступ к шине, в то время как узлы с низким приоритетом должны ожидать, пока шина освободится и не будет узлов, обладающих более высоким приоритетом и желающих передать сообщения.

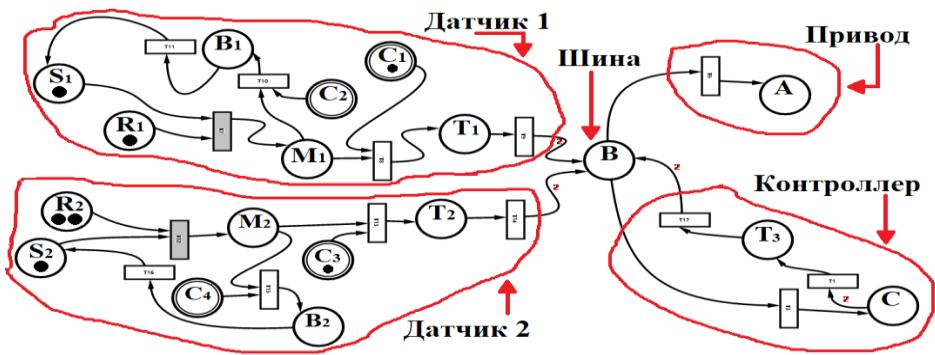


Рис. 11. Модель сети Петри с реализацией свойства приоритетности передачи сообщений в сетевой системе управления полуактивной подвеской.

Использование сетей Петри для моделирования сетевых систем управления предоставляет возможность более детально исследовать различные топологии и протоколы сети, в то время как другие методы моделирования касаются только задержек в передаче данных по сети.

**В заключении** приведены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Обоснован выбор модифицированных сетей Петри для объединённого описания системы подвески, включающей как непрерывные, так и событийные части, соответственно, разработаны модели элементов сетевой системы подвески на основе модифицированных сетей Петри; при этом выявлены и учтены наиболее важные свойства сети, влияющие на динамические характеристики системы, такие как - распределение приоритетов доступа, реакция на возникновения ошибок в процессе функционирования, возможность записи аналоговых значений, поступающих с датчиков в сеть.

2. Предложена и реализована процедура отработки сетевой системы, включающая три этапа: отработка системы без учёта влияния сети (результаты рассматриваются как эталон), отработка системы с математической моделью с использованием аппарата модифицированных сетей Петри, математической платформой Matlab и специализированного приложения Petri .NET Simulator, и отработка наиболее важных частей системы с физическим аналогом сети.

3. Предложен регулятор для СУС подвески автомобиля с текущей идентификацией параметра демпфирования, снабженный процедурой сравнения его с заданным желаемым значением и изменением параметра демпфера в соответствии с интегралом от текущего рассогласования.

4. Предложен алгоритм моделирования профиля дороги, который отличается от используемых стационарных формирующих фильтров возможностью воспроизводить нестационарные процессы, связанные с разгоном, торможением или текущим изменением профиля. В основе данного алгоритма лежит разбиение всей дороги на участки фиксированной длины и аппроксимация профиля на каждом участке многочленом 3- го порядка со случайными коэффициентами.

5. Разработана и реализована имитационная модель системы подвески с использованием программы Matlab и специализированного приложения Petri .NET Simulator, состоящая из узлов и модели шины CAN, при этом каждый узел отображает какой-либо из компонентов системы (датчик, привод, контроллер и т.д.), с возможностью в процессе моделирования изменять такие параметры, как скорость сети, время передачи, приоритетность доступа узлов к шине и т. д

6. Разработана полунатурная модель полуактивной системы управления подвеской с включением физической шины CAN, входящей в состав компонентов аппаратуры National Instruments и математической платформы LabView, позволяющая провести более детальные исследования СУС с различными параметрами сети CAN и с различными видами регуляторов.

7. Предложена 3-х этапная процедура анализа динамических свойств подвески, позволяющая обеспечить желаемое качество системы и учесть особенности функционирования реальной сети, сравнить различные законы управления, снизить затраты на проектирование и последующую эксплуатацию и модернизацию системы управления в среднем на 16 - 20% .

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Для проведения дальнейших исследований предполагается разработка универсального комплекса алгоритмического обеспечения системы управления подвеской с использованием интеллектуальных технологий и их отработка сетевыми методами .

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ**

1. Youness SF, Lobusov E.C., Networked control for active suspension system // Procedia Computer Science, 2019 Jan 1;150. pp 123-30. (0,7 п.л./ 0,4 п.л.)
2. Lobusov, E. S., and S. Youness. Using Petri nets for network control system research// AIP Conference Proceedings. Vol. 2171. No. 1. AIP Publishing LLC, 2019. pp 110007. (0,6 п.л./ 0,3 п.л.)
3. Юнесс Сарем, Лобусов Е. С, Применение сетей Петри для исследования сетевых систем управления// Инженерный журнал: наука и инновации 2019. - № 7. <http://engjournal.ru/catalog/mech/dsmi/1885>. (1,2 п.л./ 0,7 п.л.)
4. Лобусов Е. С, Юнесс Сарем, Алгоритм оценки степени демпфирования колёсной машины// Автоматизация. Современные технологии 2019 .- Т. 73 , № 5 .- С. 199 – 206. (1,1 п.л./ 0,6 п.л.)