

На правах рукописи



**Насретдинов Руслан Фанависович**

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЁМА  
ПРИ СКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
ПРИ ПОМОЩИ ПРУЖИННЫХ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫХ  
ДЕМПФЕРОВ И КОМПЕНСАТОРОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов  
и электрификация

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СамГУПС).

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор  
Загорский Владимир Алексеевич

**Официальные оппоненты:**

Ли Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Системы электроснабжения»;

Паранин Александр Викторович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Электроснабжение транспорта».

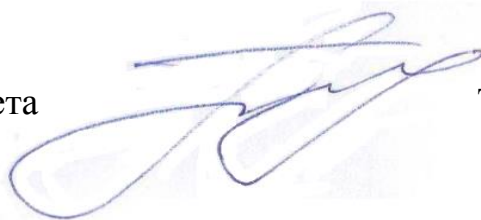
**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС).

Защита состоится «15» апреля 2016 г. в 14-00 ч. на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Использование электрифицированного подвижного состава на железнодорожном транспорте позволяет повысить скорость движения подвижного состава и сократить время доставки пассажиров и грузов, достигая высокого социального и экономического эффекта.

На современном этапе развития железнодорожного транспорта повышением скорости движения занимаются во многих развитых странах. При этом основной трудностью является обеспечение надёжного токосъёма на высоких скоростях в условиях нестабильности параметров системы контактная подвеска-токоприёмник, вызванной недостаточным совершенством её конструкции, износом, вредным воздействием окружающей среды и иными факторами.

В системе контактная подвеска-токоприёмник первый элемент является наиболее дорогостоящим и сложным, подвергаемым жёстким условиям эксплуатации. Ввиду большой территориальной протяжённости нашей страны и развитой сети железных дорог полная модернизация контактных сетей для высокоскоростного движения связана с огромными затратами, поэтому внедрение более совершенных устройств компенсации натяжения проводов и тросов существующих в настоящее время контактных сетей приобретает значимую актуальность.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам повышения эффективности токосъёма и совершенствованию контактных подвесок посвящено большое число работ российских и иностранных учёных. Стоит отметить труды следующих специалистов: И.И. Власова, К.Г. Марквардта, Г.Г. Марквардта, В.П. Шурыгина, В.Л. Григорьева, А.В. Плакса, Л.Н. Решетова, Д.К. Томляновича, В.П. Михеева, А.И. Гукова, В.А. Вологина, А.Т. Демченко, Г.П. Маслова, В.Н. Яковлева, В.А. Нехаева, А.А. Кудрявцева, В.И. Подольского, В.Я. Берента, О.А. Сидорова, А.В. Ефимова, А.Г. Галкина, В.Н. Ли, М. Зюберкрюба, И. Кумезава, М. Сибата, Р. Мориса, Г. Ниблера, Л. Паскуччи, Л. Помакова, З. Фидриха, А. Шмидера, А. Чиприани, Ф. Кислинга и других авторов, отмечавших необходимость выравнивания эластичностей в пролетах контактных подвесок, снижению сосредоточенных масс, увеличению гололедо- и ветроустойчивости.

Контактные подвески скоростного движения характеризуются повышенными динамическими нагрузками от воздействия токоприёмников.

Кроме того, в условиях континентального климата России возникают дополнительные нагрузки как на устройства компенсации натяжения проводов и тросов, так и опорно-поддерживающие сооружения, из-за значительных продольных перемещений проводов и тросов. Значительные ветровые нагрузки на открытых пространствах вызывают появление автоколебаний и вибраций проводов. Приведённые факторы заставляют искать решение задачи повышения стабильности токоёма с учётом экономической целесообразности. Решение этой задачи непосредственно связано с улучшением статических и динамических характеристик скоростных контактных подвесок.

Ввиду сказанного, научный и практический интерес представляет исследование и разработка устройств компенсации натяжения проводов и тросов, обладающие свойством гашением колебаний контактной подвески в условиях воздействия движущихся токоприёмников и аэродинамического воздействия.

**Цель диссертационной работы** – повышение качества токоёма при высоких скоростях движения, за счет совершенствования устройств компенсации натяжения проводов и тросов и демпфирования колебаний контактной подвески.

Исходя из цели работы, для её реализации были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработать и исследовать пружинный жидкостно-газовый демпфер и компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети;
2. Разработать математические модели работы пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора при линейном и нелинейном сопротивлении;
3. Усовершенствовать метод электрических аналогий для моделирования нелинейных колебаний и волновых процессов в проводах и тросах контактной подвески;
4. Разработать математические модели волновых и колебательных процессов в контактной подвеске с пружинным жидкостно-газовым демпфером и компенсатором;
5. Разработать методику расчёта пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан и исследован пружинный жидкостно-газовый демпфер и компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети;
2. Разработаны математические модели работы пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора при линейном и нелинейном сопротивлении;

3. Разработаны математические модели волновых и колебательных процессов в контактной подвеске с пружинным жидкостно-газовым демпфером и компенсатором;

4. Разработаны методики расчёта пружинных жидкостно-газовых демпферов и компенсаторов натяжения проводов и тросов контактной сети.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработан пружинный жидкостно-газовый демпфер и компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети;

2. Введены математические модели работы пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора при линейном и нелинейном сопротивлении;

3. Усовершенствован метод электрических аналогий для моделирования нелинейных колебаний и волновых процессов в проводах и тросах контактной подвески;

4. Введены математические модели нелинейных колебаний проводов и тросов контактной подвески с пружинными жидкостно-газовыми демпферами и компенсаторами натяжения проводов и тросов контактной сети;

5. Введены математические модели нелинейных волновых процессов в контактной подвеске с пружинными жидкостно-газовыми демпферами и компенсаторами натяжения проводов и тросов контактной сети;

6. Получены рекомендации по выбору параметров пружинных жидкостно-газовых демпферов и компенсаторов натяжения проводов и тросов контактной сети, обеспечивающие наибольшую стабильность токосъёма.

**Методы исследования.** Математический аппарат волновых и колебательных процессов, метод аналитических моделей, методы численного решения алгебраических и дифференциальных уравнений, метод электрических аналогий механических колебаний, реализованный в среде MicroCap.

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

1. Пружинный жидкостно-газовый демпфер и компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети;

2. Результаты моделирования работы пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора при линейном и нелинейном сопротивлении;

3. Математические модели нелинейных колебательных и волновых процессов в контактной подвеске с пружинными жидкостно-газовыми демпферами и компенсаторами натяжения проводов и тросов контактной сети;

4. Результаты моделирования нелинейных колебательных и волновых процессов в контактной подвеске с применением метода электрических аналогий, для оценки эффективности применения пружинных жидкостно-

газовых демпферов и компенсаторов для подавления автоколебаний контактной подвески.

#### **Степень достоверности и апробация работы.**

Достоверность работы подтверждается корректным использованием математических методов, известных физических законов и существующих экспериментальных данных.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции в г. Омске в 2014 г., на заседаниях и расширенном заседании кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Самарского государственного университета путей сообщения в 2013, 2014, 2015 гг., на заседании кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения в 2015 г., на заседании и расширенном заседании кафедры «Электроснабжение транспорта» Уральского государственного университета путей сообщения в 2015 г.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, списка литературы, состоящего из 82 наименований. Работа изложена на 121 страницах машинописного текста, включая 61 рисунок.

**Публикации.** Основные результаты работы опубликовано в 6 печатных работах, из них 4 публикации в изданиях, определенных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации. В результате диссертационного исследования получен 1 патент Российской Федерации на изобретение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность, значимость выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования.

**В первом разделе** проведён анализ параметров, показателей и характеристик системы контактная подвеска-токоприёмник.

Разработка контактных подвесок для скоростей 250...300 км/ч связана с выбором конструктивных решений и компенсаторов из условий обеспечения надежного токосъема токоприемниками.

Для качественного токосъема при высоких скоростях движения подвижного состава большое значение имеет надежный контакт между токоприемником и контактным проводом, который возможен только при их устойчивом механическом соприкосновении.

Характеристики контактных подвесок принято осуществлять по трем критериям: параметры, динамические показатели и статические характеристики контактных подвесок.

Основными параметрами системы токоприемник – контактная подвеска являются эластичность контактной подвески  $\eta$  (или жёсткость как обратная величина к эластичности), ее приведенная масса  $m_0$  и приведенная масса токоприемника  $m_T$ , которые определяются силами нажатия  $\Delta F$ .

К наиболее важным динамическим показателям относятся декремент затухания собственных и вынужденных колебаний и фазовая скорость вертикальной волны в проводе, имеющем механическое напряжение  $\sigma$  и плотность материала  $\rho_0$ .

Воздействие ветрового потока на провода контактной подвески, кроме горизонтальных их отклонений, создающих угрозу схода контактного провода с пантографа или нарушения габаритов подвески по отношению к заземлённым частям, может вызывать также возникновение автоколебаний и вибраций проводов.

Чаще всего автоколебания возбуждаются в проводах, имеющих отложения льда или изморози, нарушающих форму сечения провода. Частота колебаний проводов близка к частоте собственных колебаний контактной подвески (0,65...1,00 герц).

Уравнение для вертикальных перемещений провода  $V$  в простейшем случае описывается уравнением колебаний натянутой струны

$$\omega^2 \left( \frac{d^2 V}{d\xi^2} \right) + c_1 \left( \frac{d^4 V}{d\xi^4} \right) = 0, \quad (1)$$

Уравнение (1) имеет общее решение

$$V = a_1 + a_2 \xi + a_3 \sin\left(\frac{\omega \xi}{\sqrt{c_1}}\right) + a_4 \cos\left(\frac{\omega \xi}{\sqrt{c_1}}\right), \quad (2)$$

где  $a_j, j = 1, 2, 3, 4$  – произвольные постоянные.

Указывается, что применение демпфирования даёт возможность значительно уменьшить колебания контактной подвески.

Демпферы и компенсаторы являются одним из важных элементов контактной подвески, и от их конструкции и технического обслуживания зависит обеспечение заданных натяжений проводов контактных подвесок, что определяет качество токосъёма.

На железных дорогах мира наибольшее распространение имеют блочные компенсаторы. Общим недостатком различных блочных грузовых компенсаторов является необходимость в значительном пространстве для грузов, что определяет, в частности, серьезные затруднения в размещении их в малогабаритных тоннелях.

Для преодоления данного обстоятельства ведущие зарубежные и российские фирмы разработали пружинный компенсатор с использованием плоских спиральных пружин, линейный компенсатор с газовым и жидкостным заполнением.

Основными преимуществами газогидравлического компенсатора перед грузовыми блочными являются: более надежная работа при гололедных образованиях; меньшее трение в подвижной системе; сохранность при обрыве провода, заанкерowanego на компенсатор. Кроме этого, газогидравлический компенсатор позволяет подавлять колебания проводов контактной подвески.

**Во втором разделе** выполнена разработка и исследование пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети.

Значение гашения колебаний в контактной подвеске постоянно увеличивается с ростом скорости движения и повышением требований к качеству токосъёма.



Для практического измерения и оценки силы сопротивления компенсатора используется рабочая диаграмма, которая представляет собой график силы сопротивления компенсатора при движении поршня с определенной частотой колебаний – обычно 1...2 Гц.

Непостоянство длины проводов и тросов контактной подвески, вызванное прохождением токоприёмника, температурными колебаниями и ветровыми нагрузками требует устройств компенсации длины при сохранении усилия.

Возникает задача разработки компенсатора принципиально иной конструкции, которая бы решала задачи повышению стабильности подвески контактной сети и скорости движения поездов, безопасности, долговечности, удобства монтажа и эксплуатации.

Поставленная задача решается за счет того, что предлагается пружинный жидкостно-газовый компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети ПЖГ-1, который компенсирует изменения натяжения проводов и тросов контактной сети и гасит колебания контактной подвески. Небольшая масса и габариты данного компенсатора делают возможной его установку на любой опоре контактной сети.

В отличие от известных технических решений у пружинного жидкостно-газового компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети ПЖГ-1 высокая адаптивность к изменению параметров длины и состояния контактной сети, как по величине времени, так и по величине энергии колебания объекта натяжения. Закрытый и герметичный корпус изделия обеспечивает коррозионную стойкость и механическую прочность, а также удобство и безопасность монтажа и долговечность.

На рисунке 1 показан пружинный жидкостно-газовый компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети ПЖГ-1 в разряженном состоянии.

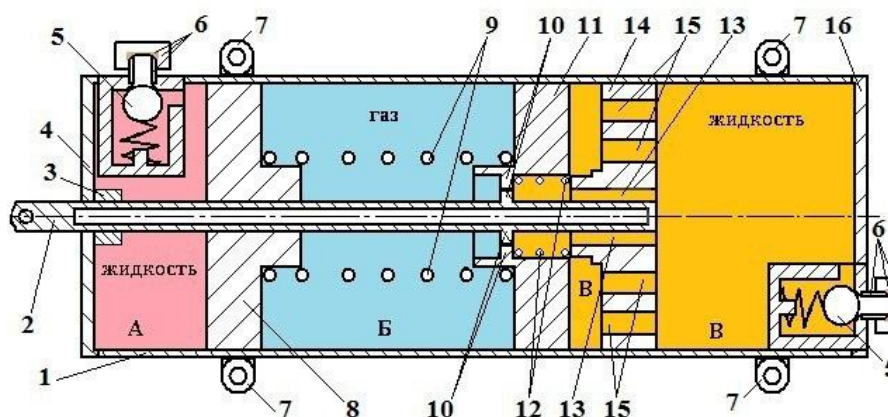


Рисунок 1 – Пружинный жидкостно-газовый компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети ПЖГ-1.

Пружинный жидкостно-газовый компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети содержит 3 полости: полость высокого давления (А) и исполнительную полость (В), заполненные рабочей жидкостью, силовую полость (Б), заполненную газом.

Корпус (1); шток (2); уплотнитель (3); передняя крышка (4); обратный клапан (5); зарядный штуцер с уплотнением и пробкой (6); проушины крепления (7); поршень высокого давления (8); силовая пружина (9); золотниковая пара (10); промежуточный поршень (11); золотниковая пружина (12); золотниковая проточка (13); исполнительный поршень (14); окна-компенсаторы (15); задняя крышка (16).

На рисунке 2 показан ПЖГ-1 в заряженном и готовом к работе состоянии.

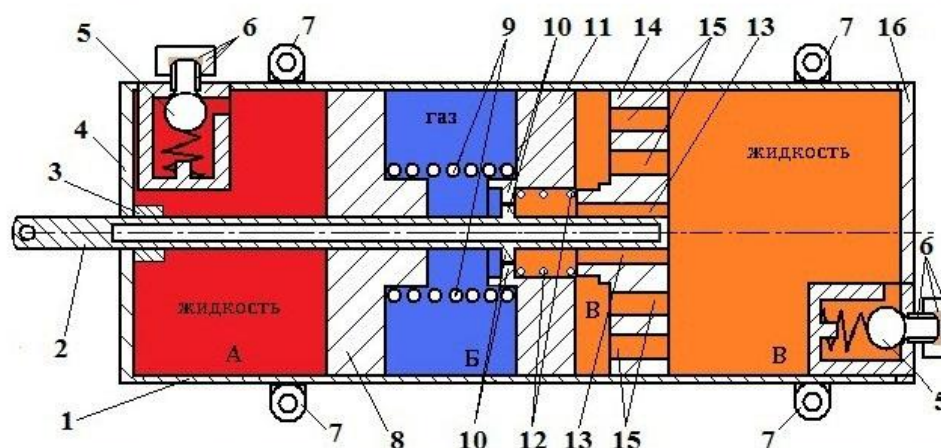


Рисунок 2 – Пружинный жидкостно-газовый компенсатор ПЖГ-1 в заряженном и готовом к работе состоянии

Математическое исследование колебаний компенсаторов натяжения проводов и тросов контактной сети обычно выполняют при помощи нелинейных дифференциальных уравнений.

Будем рассматривать компенсатор как диссипативную колебательную систему, состоящую из совокупной массы  $m$  поршней, пружины 9 с жёсткостью  $c$  и диссипативным коэффициентом  $r$ .

Рассмотрим прямое движение поршня при появлении усилия на штоке. В этом случае происходит протекание жидкости через дросселирующие окна, поэтому имеет место жидкостное сопротивление. Коэффициент сопротивления этого участка  $k$  равен 2.

При обратном движении поршня имеет место дросселирование газожидкостной рабочей среды. Коэффициент сопротивления этого участка  $k$

близок к 1. Характеристика компенсатора будет иметь вид, показанный на рисунке 3.

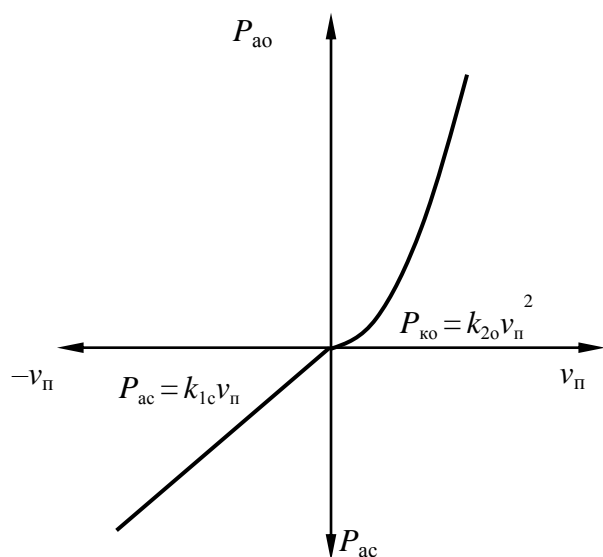


Рисунок 3 – Характеристика сопротивления компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети

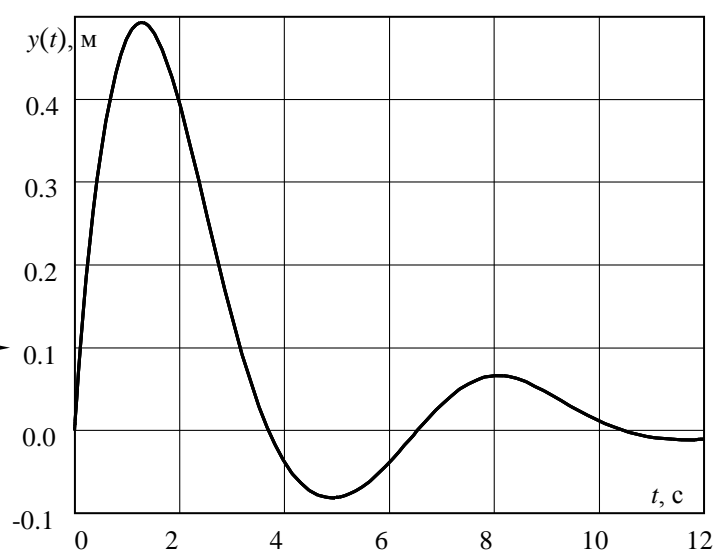


Рисунок 4 – Кривая положения поршня для газожидкостной рабочей среды

Дифференциальное уравнение движения поршня при нелинейном сопротивлении имеет вид.

$$P = m \left( \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \right) + \frac{r_2 \left( 1 + \operatorname{sgn} \left( \frac{dy(t)}{dt} \right) \right) \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2}{2} + \frac{r_1 \left( 1 - \operatorname{sgn} \left( \frac{dy(t)}{dt} \right) \right) \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)}{2} + cy(t). \quad (3)$$

Положим начальное положение  $y(0) = 0$ , а начальную скорость  $y'(0) = 1,0$ , коэффициенты  $k_1 = 1$ ,  $k_2 = 2$ .

На рисунке 4 показаны график кривой положения поршня компенсатора.

Из графика на рисунке 4 следует, что предложенный вид сопротивления компенсатора даёт возможность эффективно подавить первое сильное колебание на участке сжатия за счёт жидкостного сопротивления и затем также эффективно подавляется второе колебание на участке расширения за счёт газожидкостного сопротивления.

Таким образом, предложенная конструкция жидкостно-газового компенсатора ПЖГ-1 обеспечивает эффективное подавление как больших, так и малых колебаний контактной подвески.

Для проверки адекватности математической модели жидкостно-газового компенсатора ПЖГ-1 был изготовлен рабочий образец.

Компенсатор ПЖГ-1 заполняется рабочей жидкостью АМГ-10, что даёт возможность работать при отрицательных температурах воздуха.

Для оценки адекватности соответствия практических результатов расчётам была снята рабочая диаграмма изменения усилия компенсатора по ходу поршня, показанная на рисунке 5.

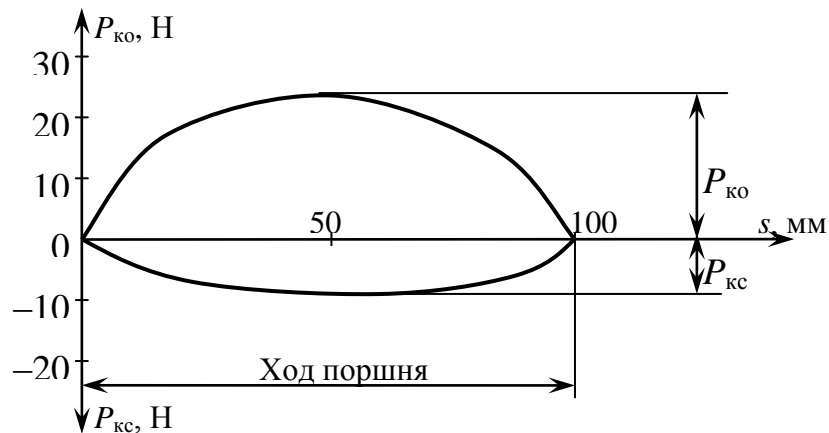


Рисунок 5 – Рабочая диаграмма изменения усилия компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети по ходу поршня в отсутствие пружины

**В третьем разделе** разработаны методы описания волновых и колебательных процессов в контактной подвеске с пружинным жидкостно-газовым демпфером и компенсатором.

Применение метода электрических аналогий основано на эквивалентности записи физических уравнений, описывающих механические и электрические процессы.

Рассмотрим цепочечный эквивалент растяжимого провода. Разделим недеформированный провод с предварительным натяжением  $T$  на  $n$  частей, и представим каждую часть массой  $m = \frac{\rho FL}{n}$  и пружиной с длиной  $\Delta = \frac{L}{n}$ , как показано на рисунке 6.

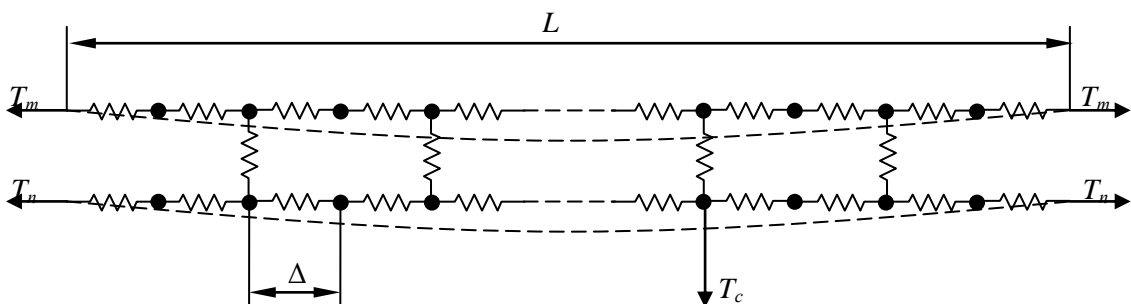


Рисунок 6 – Цепочечный эквивалент растяжимого провода

Запишем систему уравнений равновесия по осям  $Ox$ ,  $Oy$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( T + \frac{EF(\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} - \Delta)}{\Delta} \right) \Delta x_i \\ \frac{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}} = 0 \\ \left( T + \frac{EF(\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} - \Delta)}{\Delta} \right) \Delta y_i \\ \frac{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}}{\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}} - mg = 0 \end{array} \right. , i=0...n$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( T_c + \frac{EsFs(\sqrt{\Delta x'_i{}^2 + \Delta y'_i{}^2} - \Delta)}{\Delta} \right) \Delta x'_i \\ \frac{\sqrt{\Delta x'_i{}^2 + \Delta y'_i{}^2}}{\sqrt{\Delta x'_i{}^2 + \Delta y'_i{}^2}} = 0 \\ \left( T_c + \frac{EsFs(\sqrt{\Delta x'_i{}^2 + \Delta y'_i{}^2} - \Delta)}{\Delta} \right) \Delta y'_i \\ \frac{\sqrt{\Delta x'_i{}^2 + \Delta y'_i{}^2}}{\sqrt{\Delta x'_i{}^2 + \Delta y'_i{}^2}} + q = 0 \end{array} \right. , i=0...n \quad (4)$$

На рисунке 7 показана кривая провеса для троса и провода модельной контактной подвески, где тонкой линией показана кривая провисания тяжёлой нерастяжимой нити. При этом предварительное напряжение составляло  $H_{\Pi} = 12800$  Н, для того, чтобы натяжения в обоих случаях были равными.

Значение непостоянства эластичности составляет  $a = 1,114$ .

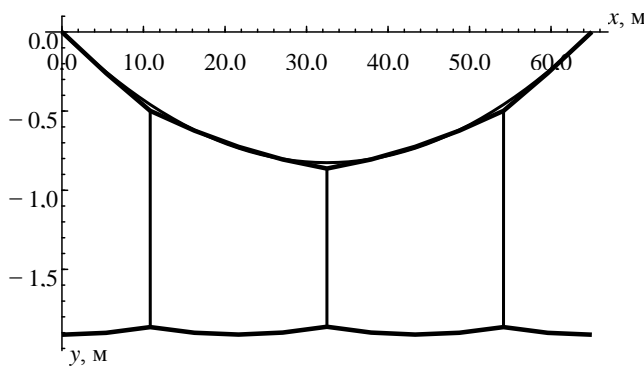


Рисунок 7 – Кривая провеса для троса и провода модельной контактной подвески

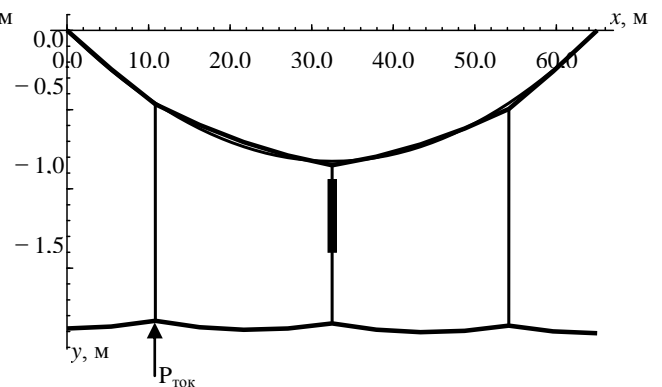


Рисунок 8 – Кривая провеса при приложении силы нажатия токоприёмника под крайней струной

На рисунке 8 показана кривая провеса для троса и провода модельной контактной подвески, где тонкой линией показана кривая провисания тяжёлой нерастяжимой нити при приложении силы нажатия токоприёмника  $P_T = 70,0$  Н под крайней струной и установке компенсатора вместо средней струны.

Значение непостоянства эластичности составляет  $a = 1,008$ .

Таким образом, имеет место существенное выравнивание эластичности в пролёте, то есть неравномерность эластичности снижается с 11,4% до 0,8%.

Для анализа процессов возбуждения и подавления нелинейных колебаний проводов и тросов контактной подвески рассмотрим одномерные колебания груза на пружине вдоль вертикальной оси, как показано на рисунке 9.

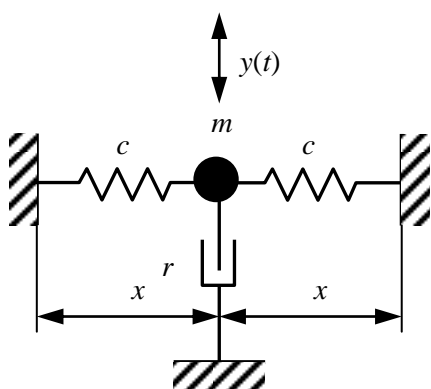


Рисунок 9 – Одномерные колебания груза на пружине вдоль вертикальной оси

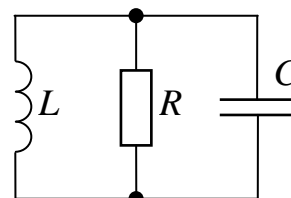


Рисунок 10 – Узловая электрическая аналогия механической системы нелинейных одномерных колебаний груза на пружине

Зададим предварительное натяжение пружины  $T$ . Тогда уравнение движения груза с учётом потерь на трение запишется в виде

На рисунке 10 показана контурная электрическая аналогия механической системы согласно уравнения (5).

$$\frac{\left( T + \frac{EF(\sqrt{x^2 + (y(t))^2} - x)}{x} \right) y(t)}{\sqrt{x^2 + (y(t))^2}} + r \left( \frac{dy(t)}{dt} \right) + m \left( \frac{d^2 y(t)}{dt^2} \right) = 0. \quad (5)$$

Установка пружинного жидкостно-газового компенсатора в пролёте показано на рисунке 11.

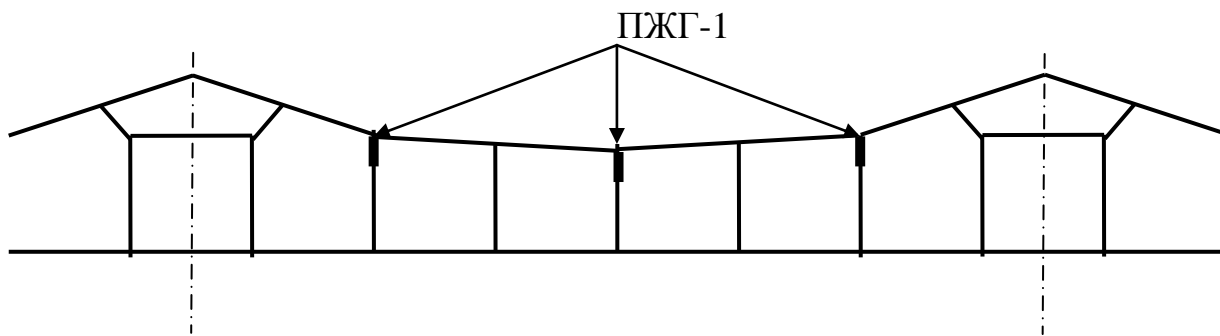


Рисунок 11 – Установка пружинного жидкостно-газового компенсатора в пролёте

Графики затухания компенсатора с диссипацией, равной 10,0 Нс/м для случая трёх компенсаторов и одного компенсатора в середине пролёта, показаны на рисунках 12 и 13.

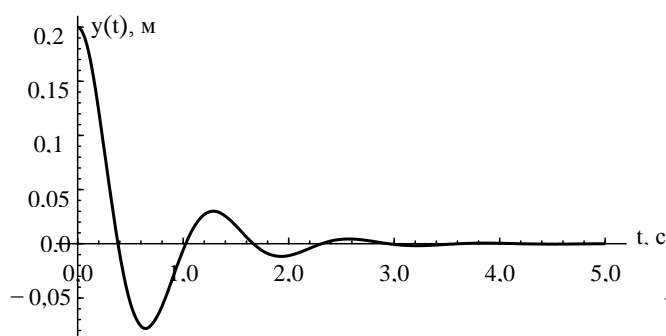


Рисунок 12 – График движения центральной точки провода для случая трёх компенсаторов

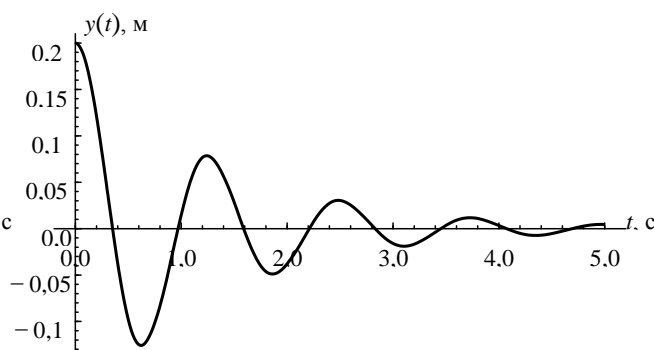


Рисунок 13 – График движения центральной точки провода для случая одного компенсатора

Как следует из рисунков 12 и 13, при использовании трёх логарифмический декремент затухания составит величину 1,9, а при использовании одного компенсатора 0,92, то есть, затухание увеличивается в 2,06 раза.

Моделирование волновых процессов в контактном проводе с применением метода электрических аналогий выполняется для цепочечного эквивалента с погонными параметрами  $L$ ,  $C$ ,  $R$ ,  $G$ , как показано на рисунке 14.

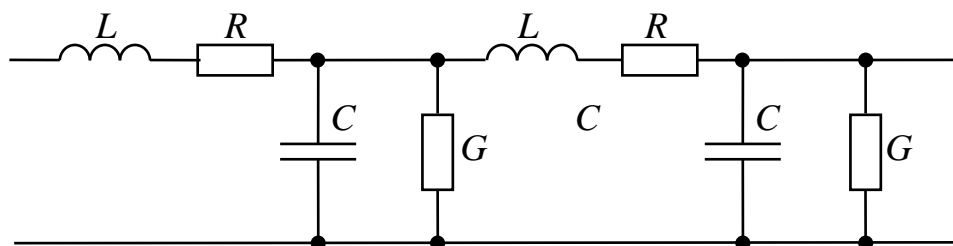


Рисунок 14 – Цепочечный эквивалент длинной линии

В контактной подвеске струны можно рассматривать как неоднородности, эквивалентные дополнительным поперечным ёмкостям, а участки контактного провода между струнами можно рассматривать как однородные линии без потерь, что приводит к эквивалентной электрической схеме, показанной на рисунке 15.

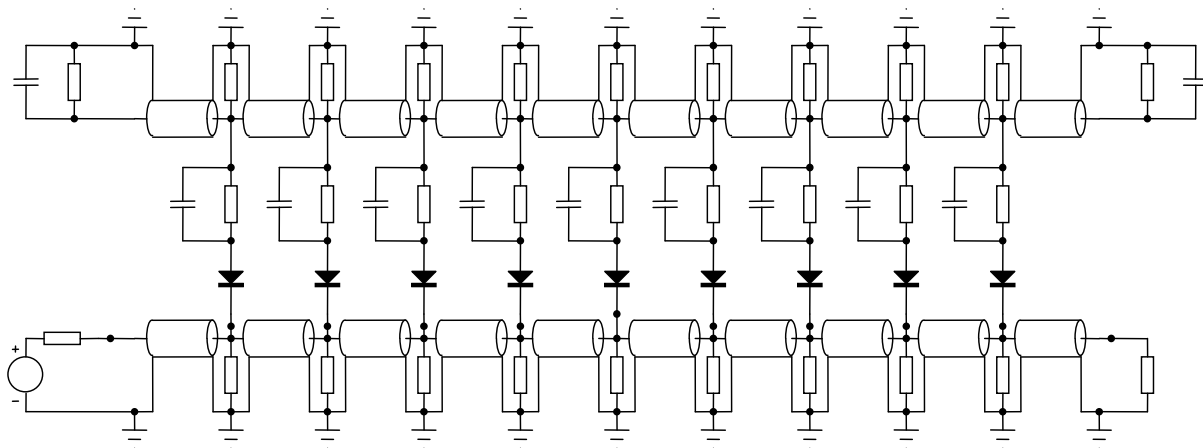


Рисунок 15 – Эквивалентная электрическая схема троса и контактного провода в пролёте контактной подвески при возбуждении гауссовым импульсом

Принимая для контактного провода  $\rho_0 = 8500,0 \text{ кг/м}^3$ ,  $S = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $K_0 = 12000,0 \text{ Н}$ , получим  $L = 8,33 \cdot 10^{-5} \text{ 1/Н}$ ,  $C = 1,02 \text{ кг/м}$ ,  $u_{\phi} = 109,0 \text{ м/с}$ ,  $Z_B = 9,04 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ .

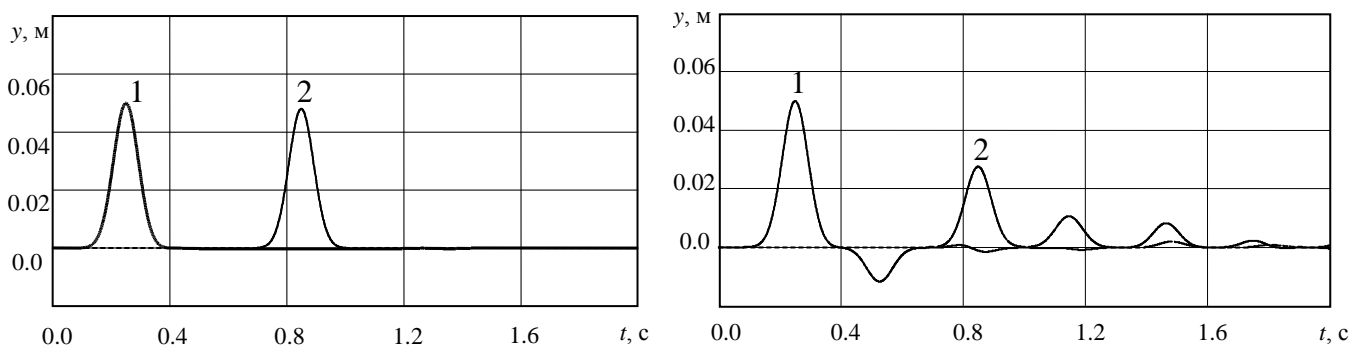


Рисунок 16 – Прохождение одиночного возмущения по контактному проводу провода в пролёте контактной подвески с анкерным закреплением

*a* – при отсутствии жидкостно-газового компенсатора; *б* – при наличии жидкостно-газового компенсатора

Как видно из рисунка 16, амплитуда импульса при прохождении пролёта уменьшается на 85,0%, что свидетельствует об эффективности применения пружинных жидкостно-газовых компенсаторов для подавления волновых процессов в контактной подвеске.



Таким образом, применение жидкостно-газового компенсатора ПЖГ-1 для анкеровки контактного провода позволяет исключить появление отражённых волн и улучшить качество токосъёма.

**В четвёртом разделе** разработана методика расчёта и проектирования пружинного жидкостно-газового компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети.

Требования, предъявляемые к конструкции компенсатора, могут быть разбиты на две группы. К первой группе относятся:

- габаритный ряд демпферов и компенсаторов (необходимое количество типов и модификаций для различных применений; выбор основных параметров компенсаторов);

- виды уплотнений, клапанов и сборочных единиц;

- создание специализированных компенсаторов;

- объём партии компенсаторов каждого типа и запасных частей к ним.

Ко второй группе требований относятся:

- функциональное назначение, определяемое по характеристикам поглощения колебаний, надёжности и долговечности;

- материалоемкость изготовления;

- технологичности в изготовлении, удобстве монтажа, обслуживания и ремонта;

- внешний дизайн.

Проектирование компенсатора начинается с выбора главных размеров, определяющих его габариты: диаметр корпуса цилиндра  $d_{Ц}$  и ход исполнительного поршня  $H_{П}$ . Базовым размером ряда считают диаметр корпуса цилиндра, а величину хода поршня компенсатора определяют обычно по конструктивным соображениям, исходя из существующего токоприёмника или контактной подвески, выбирая из стандартного ряда. При этом полная длина компенсатора в заряжённом состоянии складывается из хода поршня  $H_{П}$  и конструктивной длины  $l_{к}$ , которая равна  $\sum L_i$  сборочных единиц и редко превышает  $10d_{Ц}$ , но и не встречается менее  $5d_{Ц}$ .

**В пятом разделе** произведено обоснование экономического эффекта от внедрения пружинного жидкостно-газового амортизатора. Автором установлено, что внедрение данного устройства экономически целесообразно при скоростном движении подвижного состава. Были рассчитаны основные экономические показатели с учетом сметной стоимости и эксплуатационных расходов, срок окупаемости составил 2,5 года.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа вопросов гашения колебаний проводов и тросов контактной сети установлено, что на современном уровне развития техники наиболее легкими и малогабаритными при одинаковой мощности могут быть жидкостно-газовые демпферы и компенсаторы.

2. На основании имитационного моделирования параметров работы разработанного пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети при линейном и нелинейном сопротивлении установлено, что сочетание жидкостного и жидкостно-газового сопротивления даёт возможность эффективно подавить как первое сильное колебание за счёт жидкостного сопротивления, так и последующие слабые колебания за счёт жидкостно-газового сопротивления.

3. Моделирование работы токоприёмника с жидкостно-газовым компенсатором показало, что применение последнего даёт возможность улучшить качество токосъёма за счёт уменьшения вероятности и амплитуды отрыва полоза токоприёмника от контактного провода.

4. Проведённое моделирование динамических параметров контактной подвески с использованием устройства компенсации натяжения проводов и тросов контактной сети показало, что установка пружинного демпфера и жидкостно-газового компенсатора в анкерном креплении даёт возможность ввести значение жидкостное трения, равное механическому аналогу волнового сопротивления и устранить отражённые волны, повысив качество токосъёма.

5. В результате проведённых экспериментальных оценок результатов моделирования параметров работы пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора установлено качественное соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

6. На основе результатов аналитических исследований разработана методика расчёта и проектирования пружинного жидкостно-газового демпфера и компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети.

Для дальнейшей разработки темы целесообразно усовершенствовать конструкцию и применение жидкостно-газовых компенсаторов натяжения проводов и тросов контактной сети в части обеспечения различных видов жидкостного и смешанного сопротивления, а также применения их в составе струн и рессорных тросов подвески.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. **Насретдинов Р.Ф.** Анализ взаимодействия токоприемников подвижного состава и контактных проводов / В.А. Загорский, В.Ф. Путько, Р.Ф. Насретдинов // Вестник транспорта Поволжья. 2012, №4, С. 24-27.

2. **Насретдинов Р.Ф.** Анализ эластичности контактной сети / В.А. Загорский, В.Ф. Путько, Р.Ф. Насретдинов // Электротехника. М.: 2013, №6, С. 57-59.

3. **Насретдинов Р.Ф.** Пружинный жидкостно-газовый компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети ПЖГ-1 с нелинейным сопротивлением / Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: Материалы международной научно-практической конференции. Омск: ОмГУПС, 2014, С. 116-122.

4. **Насретдинов Р.Ф.** Модель пружинного жидкостно-газового компенсатора натяжения проводов и тросов контактной сети / Р.Ф. Насретдинов // Вестник ВНИИЖТ. 2015, №1, С. 59-64.

5. **Насретдинов Р.Ф.** Анализ эффективности гашения колебаний контактной подвески при помощи пружинных жидкостно-газовых компенсаторов / В.А. Загорский, Р.Ф. Насретдинов // Вестник транспорта Поволжья. 2015, №4, С. 35-38.

6. Пат. RU 2525618 С1 Россия, МПК В60М 1/26. Пружинный жидкостно-газовый компенсатор натяжения проводов и тросов контактной сети ПЖГ-1 / Р.Ф. Насретдинов, В.А. Загорский (Россия). – 2013134105/11; Заявлено 19.07.2013; Опубл. 20.08.2014. Бюл. № 24.

Насретдинов Руслан Фанависович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЁМА  
ПРИ СКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА  
ПРИ ПОМОЩИ ПРУЖИННЫХ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫХ  
ДЕМПФЕРОВ И КОМПЕНСАТОРОВ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Подписано к печати 11.02.2016 г.

Формат бумаги 60 x 84 1/16  
Тираж 100 экз.

Объем усл. печ. л. 1,1  
Заказ № \_\_\_\_\_

---

Издательство УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66