

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Тракторы»

А. С. Поварехо

САПР МАШИН.
ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ
В СРЕДЕ SIMCENTER AMESIM

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей
1-37 01 03 «Тракторостроение», 1-37 01 04 «Многоцелевые
гусеничные и колесные машины (по направлениям)»,
1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2024

УДК 629.3.014.1:658.512.22-027.44:004.9(075.8)

ББК 30.2-5-05я7

П42

Р е ц е н з е н т ы:

зав. кафедрой «Техническая эксплуатация автомобилей»
Белорусско-Российского университета,
канд. техн. наук, доцент *О. В. Билык*;
зам. начальника УКЭР-1 по серийному производству
и трансмиссиям ОАО «МТЗ», канд. техн. наук *В. Г. Ермаленок*

Поварехо, А. С.

П42 САПР машин. Инженерный анализ в среде SIMCENTER AMESIM : учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-37 01 03 «Тракторостроение», 1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные и колесные машины (по направлениям)», 1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт» / А. С. Поварехо. – Минск : БНТУ, 2024. – 74 с.

ISBN 978-985-583-964-5.

Учебно-методическое пособие содержит 6 лабораторных работ по курсу «САПР узлов и агрегатов машин», «САПР узлов и агрегатов трактора», «САПР электрических и автономных транспортных средств» для студентов специальностей 1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные и колесные машины», 1-37 01 03 «Тракторостроение», 1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт».

Лабораторные работы предусматривают изучение компьютерных технологий инженерного анализа с помощью средств имитационного моделирования пакета SIMCENTER AMESIM, применяемых при решении ряда научных и инженерных проблем. Применение компьютерных технологий решения задач посредством системы SIMCENTER AMESIM иллюстрируется примерами и упражнениями.

Пособие предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов высших технических учебных заведений, будет полезно специалистам и научным работникам технического профиля.

УДК 629.3.014.1:658.512.22-027.44:004.9(075.8)

ББК 30.2-5-05я7

ISBN 978-985-583-964-5

© Поварехо А. С., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

Содержание

Введение	4
Требования к выполнению работ.....	5
Лабораторная работа № 1. Моделирование механической подвески колесных машин.....	6
Лабораторная работа № 2. Моделирование гидропневматической подвески колесных машин.....	18
Лабораторная работа № 3. Моделирование активной гидропневматической подвески колесных машин	30
Лабораторная работа № 4. Моделирование устойчивости колесных машин в повороте с помощью плоской модели	44
Лабораторная работа № 5. Моделирование движения транспортного средства в повороте с помощью 3D-модели	52
Лабораторная работа № 6. Моделирование гидропривода линейного перемещения	67
Литература	74

ВВЕДЕНИЕ

Целью выполнения лабораторных работ является углубление и закрепление знаний, полученных студентами на лекционных занятиях и в процессе самостоятельной работы по курсу САПР. Рассмотрены основы работы с некоторыми приложениями пакета Simcenter Amesim. Выбор в качестве платформы для функционального проектирования пакета Simcenter Amesim обусловлен высоким рейтингом компании Siemens в области инженерного анализа в области автотракторостроения, а также широким его использованием в научно-исследовательских институтах и базовых для специальностей 1-37 01 04 «Многоцелевые гусеничные и колесные машины», 1-37 01 03 «Тракторостроение», 1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт» предприятиях Республики Беларусь.

Приведены методические рекомендации и описание шести лабораторных работ согласно учебным программам дисциплин «САПР узлов и агрегатов» соответствующих специальностей. Работы включают теоретические сведения, касающиеся моделирования (инженерного анализа и синтеза), варианты заданий и требования к выполнению работы и оформлению отчета. Данные работы должны выполняться с использованием пакета Simcenter Amesim.

Выполнение приведенных лабораторных работ предполагает обязательное наличие у студентов базовых знаний таких дисциплин, как «Механика материалов», «Теория механизмов и машин», «Детали машин», «Конструирование и расчет» для указанных выше специальностей.

Учебно-методическое пособие может быть полезным при выполнении курсового и дипломного проектирования, а также для подготовки магистерских выпускных работ.

Работы выполняются в приведенной в учебно-методическом пособии последовательности, так как при выполнении последующих расчетов используются результаты, полученные в предыдущих работах.

В данных работах с учебно-методической точки зрения показано, что структурное моделирование неразрывно связано с теоретическими положениями функционирования колесных машин (КМ), а не заключается в формальном построении расчетной модели, как это зачастую представляется.

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Выполняемые лабораторные работы сводятся к следующему.

1. На основе приведенного варианта задания составить структурную модель в Simcenter Amesim.

2. Произвести проверку и анализ разработанной модели путем проведения моделирования с исходными данными согласно индивидуальному варианту.

3. Построить требуемые графические зависимости, отражающие функционирование моделируемого объекта, используя графические средства Simcenter Amesim или пакета Grapher Golden Software, LLC.

При выполнении работ для обеспечения понятной структуры алгоритма моделирования должно соблюдаться следующее:

– представленные на эскизах модели компоненты сопровождаются пояснительными надписями;

– входные параметры модели сопровождаются комментариями и ссылками на источники, откуда они получены;

– графики строятся с соблюдением требований к оформлению графической документации.

Общие требования к оформлению отчета по лабораторным работам:

– отчет должен быть выполнен на листах формата А4 печатным или рукописным способом;

– отчет по каждой работе должен содержать цель работы, краткие сведения об исследуемом объекте, результаты расчетов, сведенные в таблицы или представленные в виде графических зависимостей, и выводы по результатам выполнения лабораторной работы;

– расчетные схемы и эскизы должны быть выполнены либо вручную, либо с помощью средств компьютерной графики;

– после приведения расчетных формул должны быть расшифрованы использованные в них переменные;

– допускается в отчетах приводить скриншоты моделей, схем и графиков. Информация на скриншотах должна быть полностью читаема и оформлена в соответствии с заданием и нормативными документами;

– для полученных в результате расчета значений обязательно должны быть представлены их размерности.

Лабораторная работа № 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Цель работы: получение навыков построения математических моделей систем поддрессоривания тягово-транспортных машин и реализации их на ЭВМ с помощью пакета Simcenter AMESim.

1. Общие сведения

Рассматривается независимая подвеска колеса типа Макферсон, упругим элементом которой является пружина, демпфирующим – амортизатор, располагающийся внутри пружины (рис. 1). Нижняя часть подвески связана с колесом, оборудованным пневматической шиной, а верхняя – с корпусом автомобиля.

Ступица колеса, ШРУС и прочие элементы, связанные непосредственно со ступицей, формируют неподдрессоренную массу. Масса автомобиля, опирающаяся на подвеску – поддрессоренную массу. Шина обладает как упругими, так и демпфирующими свойствами.

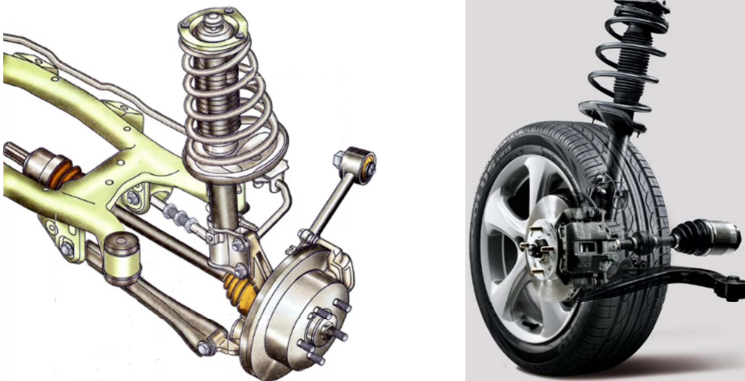


Рис. 1. Конструкция подвески типа Макферсон

Целью является моделирование работы подвески при наезде колеса на неровность микропрофиля и определение выходных параметров колебательного процесса.

2. Порядок выполнения работы

Для построения модели создадим новый проект, выбрав: **File** → **New**. В появившемся окне в области **Starter files from Patch List** выбираем из списка **Empty System**, и в нижней части окна **Create a new** → **Started**. Нажимаем **Ok**.

На экране появляется рабочее пространство, в котором будет формироваться схема модели. Справа располагаются библиотеки AMESim.

В данной работе будут использоваться компоненты библиотеки **Mechanical**, **Hydraulic Component Design** и **Hydraulic**. Если данные библиотеки отсутствуют в окне дерева библиотек (**Library tree**), то необходимо загрузить их с помощью **Sketch** → **Category path list**.

2.1. Формирование расчетной модели

1. Переходим при необходимости в режим **SKETCH** (рис. 2).

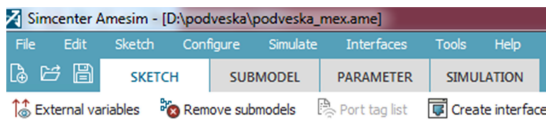


Рис. 2. Панель выбора режима **SKETCH**

В дереве библиотек выбираем **Mechanical** → **Translation** → **Masses** → **mass_friction_endstop** и перетаскиваем выбранный компонент в рабочее пространство (рис. 3).

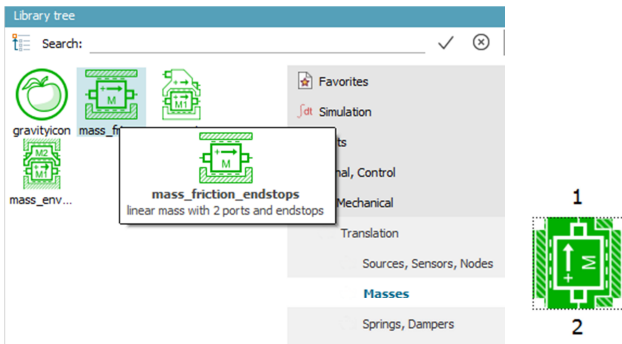


Рис. 3. Создание эскиза элемента **mass_friction_endstop**

Выбираем его мышью и поворачиваем (**Ctrl+R**) до положения, когда положительное направление, указанное стрелкой на пиктограмме компонента, будет вверх. Для удобства, используя панель инструментов рисования, помещаем текстовую подпись компонента. Аналогично помещаем второй компонент, имитирующий неподдрессоренную массу автомобиля.

Далее из раздела *Mechanical* → *Translation* → *Springs, Dampers* помещаем в модель элементы *spring01* (линейный упругий элемент с двумя портами), *damper01* (линейный упругий элемент с двумя портами), *springdamper01* (линейный упруго-демпфирующий элемент с двумя портами) (рис. 4).

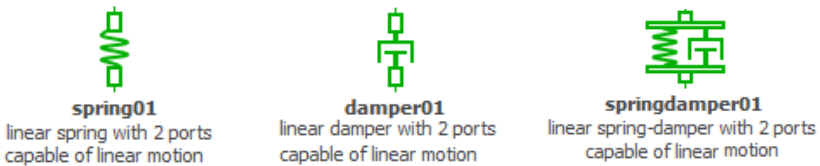


Рис. 4. Блоки модели из библиотеки *Mechanical* → *Springs, Dampers*

Из раздела *Mechanical* → *Translation* → *Sources, Sensor, Nodes* помещаем в поле модели два коннектора *lconnector* (линейный механический узел), блок конвертации сигнала *linearxyfromxcon* (линейного перемещения с вычислением скорости) и блок *zeroforce* (источник нулевой силы), который используем для «заглушки» открытых портов) (рис. 5).

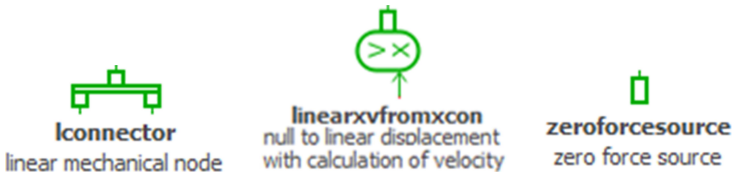


Рис. 5. Блоки модели из библиотеки *Mechanical* → *Sources, Sensor, Nodes*

Помещенные в рабочую область элементы закрашены зеленым цветом, который свидетельствует об отсутствии связей между их портами.

Позиционируем указанные элементы соответствующим образом и накладываем связи между ними. Следует обратить внимание, что

по мере «сборки» модели исчезает закрашка компонентов, для которых заданы все связи их портов. С точки зрения конструкции подвески схема модели имеет законченный вид. Однако для проведения исследования необходимо определить микропрофиль опорной поверхности. Для этого из раздела *Mechanical* → *Signal, Control* → *Sources, Sinks* помещаем в модель компонент *piecwiselinear* (рис. 6).



Рис. 6. Блок кусочно-линейного сигнала

В итоге имеем модель механической подвески (рис. 7).

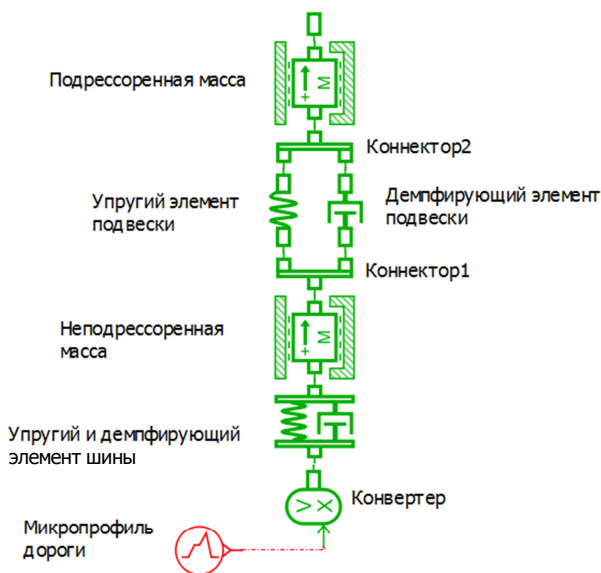


Рис. 7. Расчетная схема механической подвески

2.2. Определение субмоделей компонентов

Для определения субмоделей компонентов составленной расчетной модели перейдем на закладку *SUBMODEL* (рис. 8).

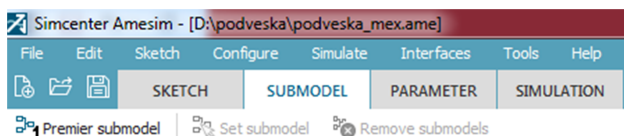


Рис. 8. Панель выбора режима **SUBMODEL**

Для задания субмодели компонента необходимо дважды щелкнуть по нему мышью и в появившемся окне **Set Submodel** в области **Compatible submodel list** (Список совместимых субмоделей) выбрать интересующую субмодель из списка.

Можно назначить всем компонентам первую субмодель из списка допустимых для компонента субмоделей (как правило, самая простая), выбрав в панели команд **Premier submodel**.

Для компонентов, описывающих подрессоренную и неподдресоренную массы, выберем **MECMAS21** (*1D translation mass*) (рис. 9).

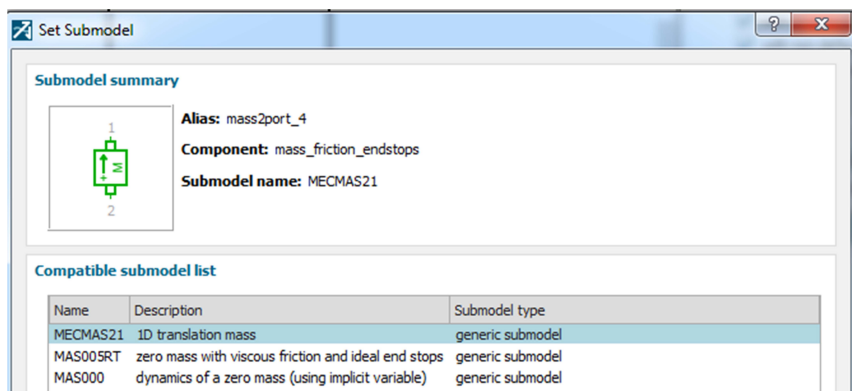


Рис. 9. Выбор субмодели для компонента **mass2port**

Для остальных компонентов в данном примере назначим субмодели по умолчанию, выбрав **Premier submodel**. Схема модели примет вид, представленный на рисунке 10. В данном режиме, выделив любой компонент модели, можно просмотреть его характеристики. Особый интерес представляют **External variables** (Внешние переменные), которые содержат параметры компонента и их положительное направление (если параметр – вектор), рассчитываемые при моделировании (рис. 11).

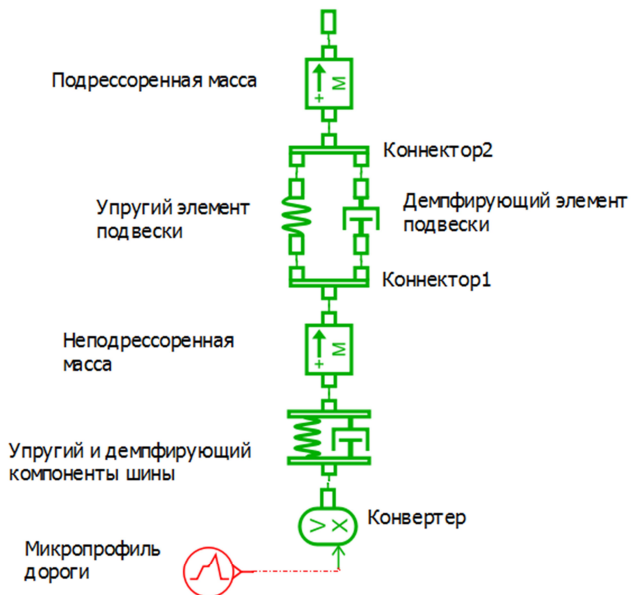


Рис. 10. Итоговый вид расчетной схемы модели

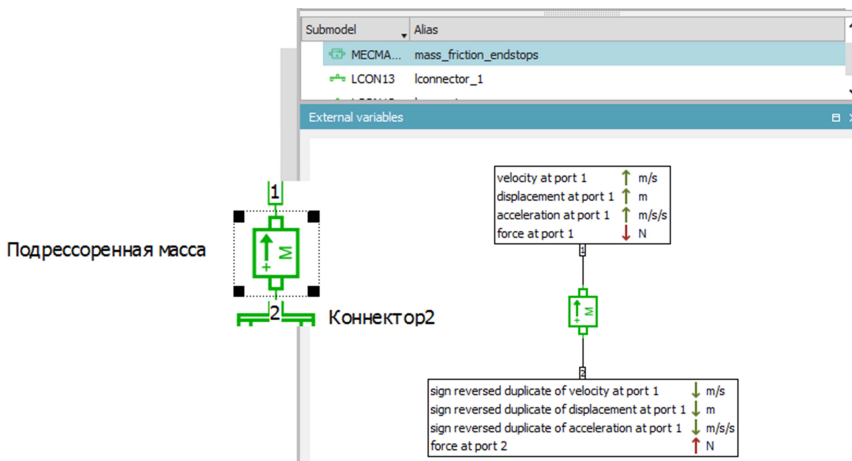


Рис. 11. Окно *External variables*

2.3. Задание параметров компонентов

Для задания параметров компонентов расчетной модели переходим на закладку **PARAMETER**. Как видно из рисунка 12, можно назначить глобальные параметры, исследуемые параметры, скопировать параметры или вставить из другой модели.

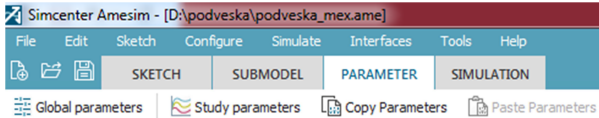


Рис. 12. Панель выбора режима **SUBMODEL**

Исходными данными упругой системы являются:

- масса поддресоренная: $m_{\Pi} = 300$ кг;
- жесткость подвески: $c_{\Pi} = 15000$ Н/м;
- коэффициент демпфирования подвески: $k_{\Pi} = 1000$ Н/(м/с);
- масса неподдресоренная: $m_{\text{H}} = 30$ кг;
- жесткость шины: $c_{\text{ш}} = 180000$ Н/м;
- коэффициент демпфирования шины: $k_{\text{ш}} = 100$ Н/(м/с).

Зададим соответствующие характеристики, выбирая компонент левой кнопкой мыши и задавая их численные значения в появившемся окне **Parameters** (рис. 13 для неподдресоренной массы).

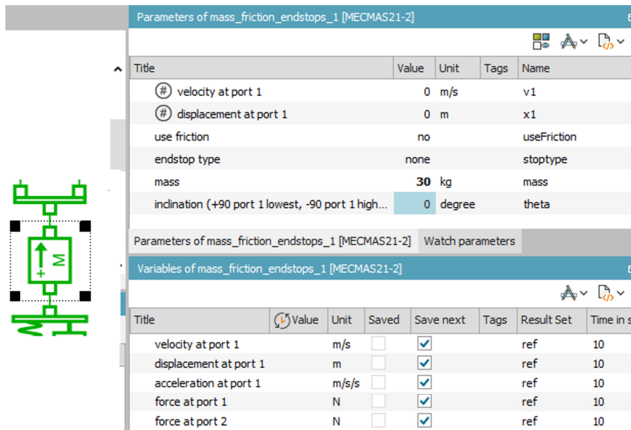


Рис. 13. Задание параметров для неподдресоренной массы

Время анализа задаем 10 с.

Параметр *inclination* (наклон) задаем равным -90° , так как порт 1 располагается сверху. При этом следует учитывать начальные нагрузки в отдельных компонентах (рис. 14). Например, для компонента, имитирующего жесткость и демпфирование шины, необходимо задать значение силы сжатия упругого элемента в статическом положении. Ее определяем как вес, приходящийся на шину:

$$F = (m_{\Pi} + m_{Н}) \cdot g = (300 + 30) \cdot 9,81 = 3237 \text{ Н},$$

где g – ускорение свободного падения.

Аналогично задаем силу в упругом элементе подвески при статическом равновесии, которая равна

$$F = m_{\Pi} \cdot g = 300 \cdot 9,81 = 2943 \text{ Н}.$$

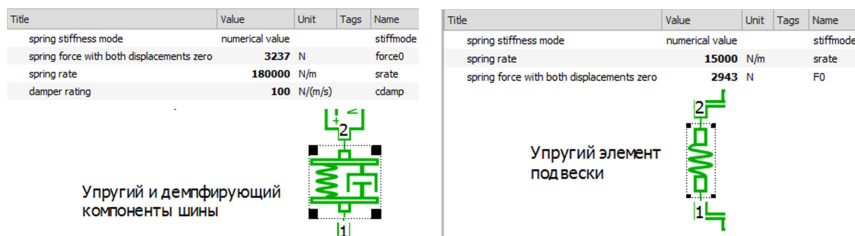


Рис. 14. Задание параметров упругих и демпфирующих элементов

Для конвертера оставляем параметры по умолчанию. Микропрофиль зададим в виде ступенчатой неровности с помощью компонента кусочно-линейной аппроксимации *piecwiselinear* с параметрами, представленными на рисунке 15.

Кусочно-линейная функция задается с помощью следующих параметров:

- **number of stages** (число участков аппроксимации) – задаем 2;
- **time at which duty cycle starts** (начальное время определения функции) – задаем 0;
- **output at start of stage i** (значение функции в начальной точке i -го участка);
- **output at end of stage i** (значение функции в конечной точке i -го участка);
- **duration of stage i** (временная длина i -го участка).

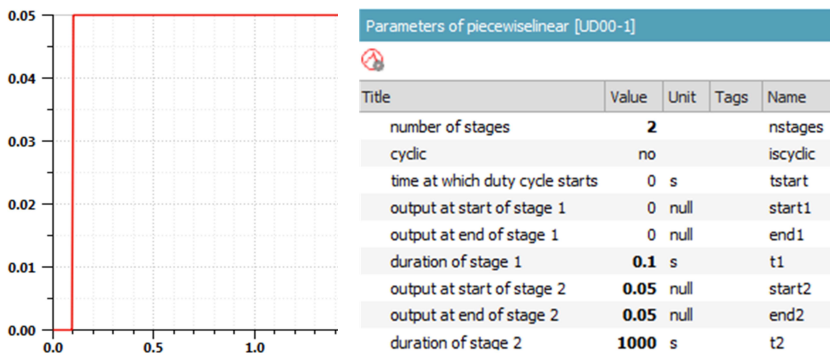


Рис. 15. Задание параметров неровности

2.4. Выполнение расчета

Для выполнения анализа необходимо перейти на вкладку **SIMULATION** (рис. 16). При этом выполняется компиляция модели, и в командной строке появляются кнопки, связанные с выполнением анализа.



Рис. 16. Панель выбора режима **SIMULATION**

Выбираем **Run params**, задаем длительность расчета (3 с) и шаг печати (0,01 с), остальные параметры оставляем без изменения (рис. 17, 18).

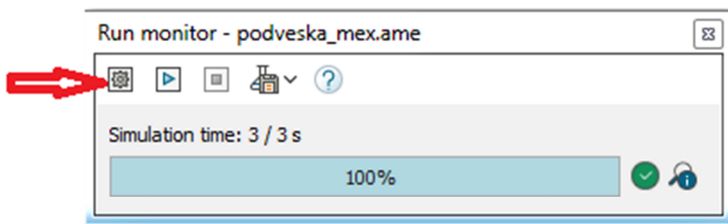


Рис. 17. Задание параметров расчета

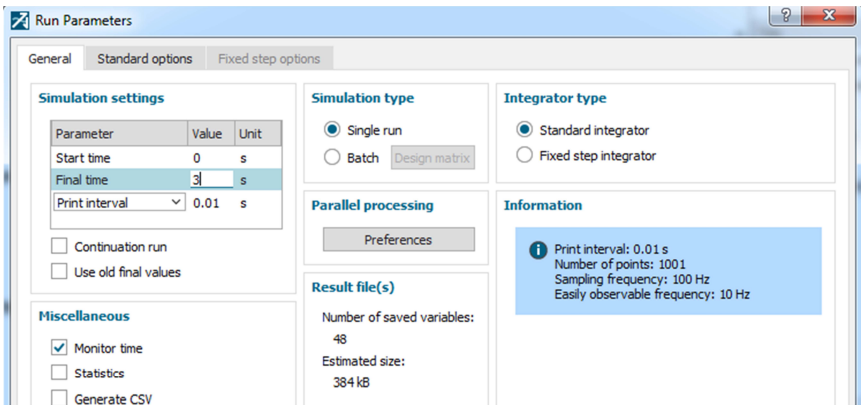


Рис. 18. Задание параметров расчета

Запускаем расчет, выбрав в панели инструментов **Run simulation**.

После завершения расчета, для вывода результатов, необходимо дважды кликнуть по компоненту, рассчитанные параметры которого следует проанализировать. В появившемся окне в области **Variables** выбираем интересующий параметр и нажимаем **Plot** или просто перетягиваем соответствующий параметр в окно графика (рис. 19).

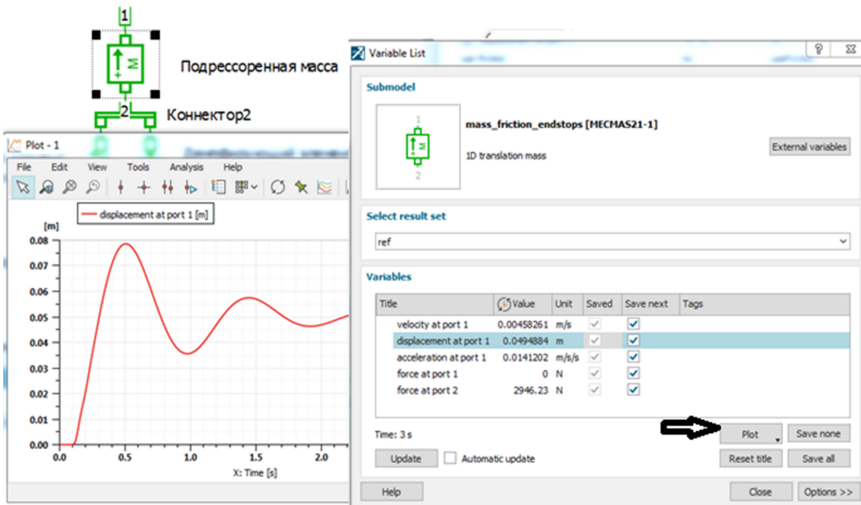


Рис. 19. Просмотр результатов моделирования

Задание

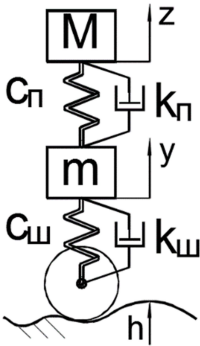


Рис. 20. Расчетная схема

поддрессоренной и неподдрессоренной масс при наезде объекта на заданную неровность.

5. Оформить отчет, содержащий расчетную модель и графики зависимостей согласно пункту 4.

1. Составить расчетную модель механической подвески с помощью компонентов AMEsim в соответствии с вариантом задания и расчетной схемой (рис. 20).

2. Выбрать соответствующие субмодели компонентов.

3. Задать параметры компонентов для анализа колебаний поддрессоренной и неподдрессоренной масс при заданном законе изменения возмущающего воздействия (табл. 1–3).

4. По результатам моделирования построить зависимости перемещений и скоростей

Таблица 1

Параметры системы (варианты заданий выбираются по номеру в списке группы)

Вариант	m , кг	M , кг	$c_{п}$, кН/м	$k_{п}$, Н·с/м	$c_{ш}$, кН/м	$k_{ш}$, Н·с/м
1–12	50	300	20	780	1000	200
13–24	50	400	25	2100	1200	250

Таблица 2

Параметры неровности

Вариант	Неровность	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	h_{max} , м
1–12	1–12	0,5	1,2	0,6	0,15
13–24	1–12	0,4	0,9	0,7	0,20

Таблица 3

Параметры микронеровности (выбираются согласно списку группы)

1		2	
3		4	
5		6	
7		8	
9		10	
11		12	

Лабораторная работа № 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Цель работы: получение навыков построения междисциплинарных математических моделей систем поддрессоривания тягово-транспортных машин и реализации их на ЭВМ с помощью пакета Simcenter AMESim.

1. Общие сведения

В данной работе создается модель и проводится анализ гидропневматической подвески простейшей конструкции (рис. 21).

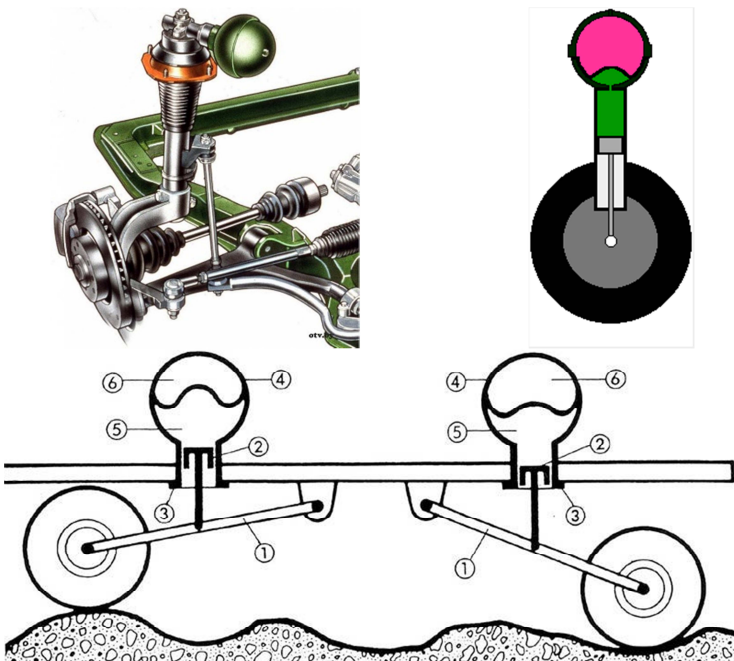


Рис. 21. Конструкция гидропневматической подвески:

1 – рычаг подвески; 2 – поршень гидроцилиндра; 3 – корпус гидроцилиндра;
4 – гидроаккумулятор; 5 – масло; 6 – газ (сжатый азот)

Сферические элементы, заполненные газом, действуют фактически как упругие звенья в механической подвеске. Связь между этими пружинами и движущимися частями, соединенными с колесами, обеспечивается несжимаемой жидкостью. Связь гидроцилиндра и аккумулятора осуществляется через дроссельное отверстие, площадь которого определяет демпфирующие свойства подвески.

Цель работы состоит в том, чтобы смоделировать гидропневматическую подвеску с параметрами, аналогичными механической подвеске, рассмотренной в предыдущей работе, и определить ее выходные характеристики. Это предполагает определение соответствующих значений демпфирования и жесткости, обеспечиваемых выбором параметров гидропневматических элементов модели.

2. Порядок выполнения работы

Для построения расчетной модели создадим новый проект. В данной работе будут использоваться компоненты библиотеки *Mechanical, Hydraulic Component Design* и *Hydraulic*.

2.1. Формирование расчетной модели

1. Переходим при необходимости в режим *SKETCH*.

2. Загружаем модель механической подвески (предыдущая работа) и копируем ее в новое окно эскиза модели, созданное с помощью команды *File → New*.

3. Удаляем из модели линейный упругий элемент, один из коннекторов и демпфер, так как будем формировать подвеску колесной машины (КМ) с помощью компонентов библиотеки гидравлики.

4. Добавляем в эскиз модели следующие компоненты (рис. 22):

– *Hydraulic Component Design → brp2* (поршень с подвижным корпусом);

– *Hydraulic Component Design → bhc1* (гидравлическая емкость с учетом сжимаемости жидкости);

– *Hydraulic Component Design → bhr1* (гидравлический дроссель);

– *Hydraulic → accumulator* (газонаполненный аккумулятор).

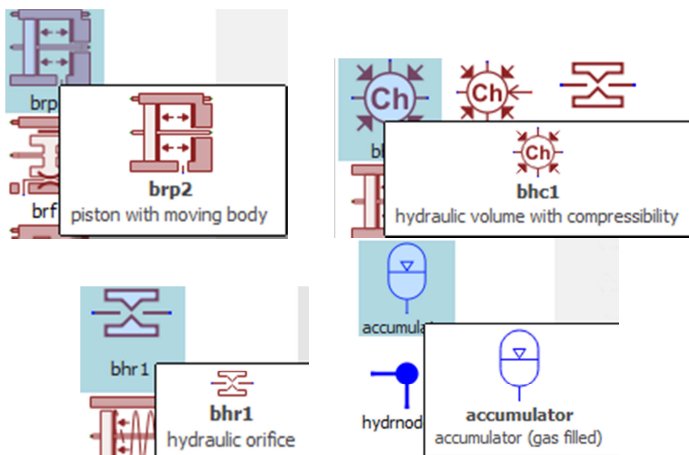


Рис. 22. Компоненты расчетной схемы

5. Соединим поршень компонента **brp2** (порт 5) с неподдрессоренной массой, а корпус (порт 4) – с коннектором. Неиспользуемые порты 2 и 3 закроем «заглушками» – блоками **zeroforcesource** (источник нулевой силы). Порт 1 соединим с гидравлической емкостью (компонент **bhc1**).

6. Второй порт коннектора соединим с поддрессоренной массой.

Следует иметь в виду, если субмодель оставшегося коннектора несовместима с создаваемой связью, последняя не сформируется и будет выдано сообщение об ошибке. Для устранения проблемы кликаем на коннектор правой кнопкой мыши и в выпавшем меню выбираем **Remove submodel** (рис. 23).

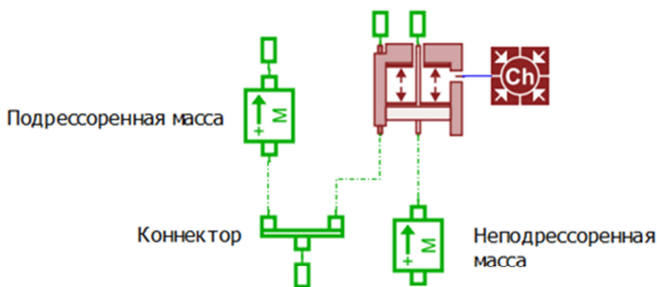


Рис. 23. Установка в схему блока коннектора

7. Соединяем один из портов (порт 3) гидравлической емкости (компонент *bhc1*) через дроссель (компонент *bhr1*) с гидроаккумулятором (компонент *accumulator*).

Оставшиеся незадействованные гидравлические порты заглушим с помощью компонента *hydraulicplug* (источник нулевого потока) (рис. 24).

8. Для определения параметров жидкости добавим в модель блок *elementaryhydraulicprops* (рис. 24).

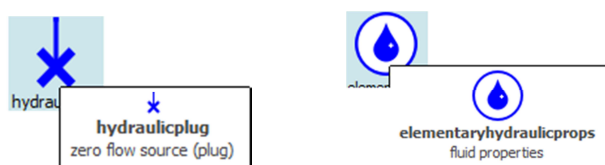


Рис. 24. Компоненты *hydraulicplug* и *elementaryhydraulicprops*

В итоге получаем приведенную ниже схему гидропневматической подвески (рис. 25).

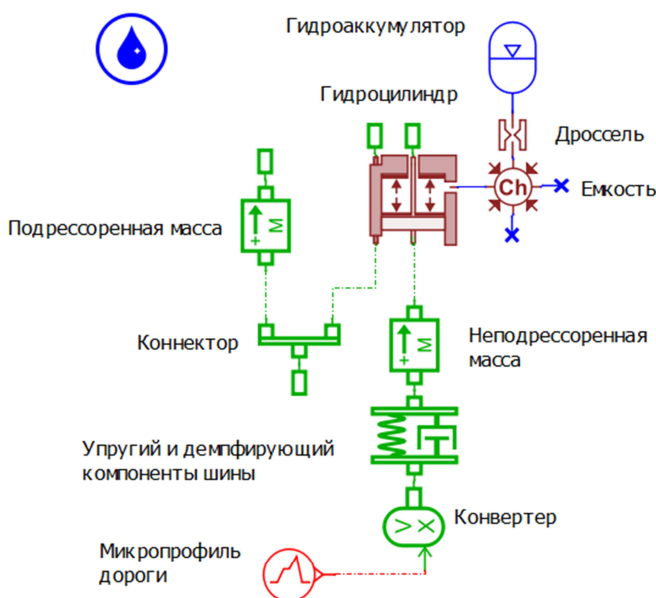
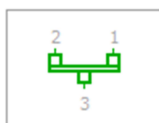


Рис. 25. Расчетная модель гидропневматической подвески

2.2. Определение субмоделей компонентов

Так как был использован ряд компонентов из предыдущей работы, то необходимо задать субмодели только для добавленных в модель объектов (рис. 26–30). Следует иметь в виду, что компоненты, для которых не определены субмодели, при переходе на данную закладку выделяются (закрашиваются).

Submodel summary



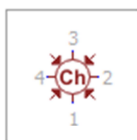
Alias: lconnector
Component: lconnector
Submodel name: LCON12

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
LCON12	linear shaft node transferring port 2 velocity and displacement	generic submodel
LCON02	linear shaft node transferring port 2 velocity	generic submodel
LCON11	linear shaft node transferring port 1 velocity and displacement	generic submodel
LCON01	linear shaft node transferring port 1 velocity	generic submodel

Рис. 26. Выбор субмодели коннектора:
linear shaft node transferring port 2 velocity and displacement (использовать порт 2 для передачи линейной скорости и перемещения)

Submodel summary



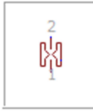
Alias: bhc1
Component: bhc1
Submodel name: BHC11

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
BHC11	hydraulic volume with pressure dynamics	generic submodel
BHC12	hydraulic volume with pressure dynamics and wall compliance	generic submodel

Рис. 27. Выбор субмодели гидравлической емкости:
hydraulic volume with pressure dynamics (гидравлическая емкость с изменяемым давлением)

Submodel summary



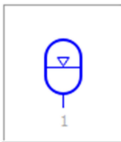
Alias: bhr1
Component: bhr1
Submodel name: BHORF0

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
BHORF0	hydraulic orifice - fixed	customized submodel
BHORF1	hydraulic orifice - fixed, asymmetric	customized submodel
BHORF2	hydraulic orifice - fixed, with cavitation	customized submodel
BHORG1	hydraulic orifice - thick-edged, with $\zeta = f(Re, F_0/F_1, l/dh)$	customized submodel

Рис. 28. Выбор субмодели дросселя:
hydraulic orifice – fixed (дроссель постоянного сечения)

Submodel summary



Alias: accumulator
Component: accumulator
Submodel name: HA001

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
HA001	hydraulic accumulator without inlet orifice	generic submodel
HA0011	hydraulic accumulator with heat exchange	generic submodel
HA0021	hydraulic accumulator with heat exchange (semi-perfect or real gas behavior)	generic submodel

Рис. 29. Выбор субмодели гидроаккумулятора:
hydraulic accumulator without inlet orifice
 (гидроаккумулятор без входного отверстия)

Submodel summary



Alias: hydraulicplug
Component: hydraulicplug
Submodel name: Q000

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
Q000	zero hydraulic flow source	generic submodel
BZQV0	zero flow rate and volume source	generic submodel

Submodel summary



Alias: zeroforcesource_1
Component: zeroforcesource
Submodel name: F000

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
F000	zero force source	generic submodel
ZFS 1DOF	zero force source (1DOF)	generic submodel

Рис. 30. Выбор субмоделей *hydraulicplug* и *zeroforcesource*

2.3. Задание параметров компонентов

Исходные данные $m_{п}$, $m_{н}$, $c_{ш}$, $k_{ш}$ берем из лабораторной работы № 1.

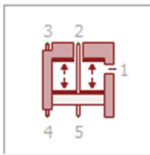
Чтобы параметры гидропневматической части подвески были эквивалентны механической подвеске (лабораторная работа № 1), необходимо обеспечить коэффициент демпфирования системы $k_{п} = 1000 \text{ Н/(м/с)}$ и жесткость $c_{п} = 15000 \text{ Н/м}$.

Для этого задаем соответствующие параметры для компонентов:

1. Гидроцилиндр (рис. 31).

Примем диаметр поршня гидроцилиндра $d_{п} = 40 \text{ мм}$. Тогда площадь поршня $A_{п} = \pi \cdot d^2 / 4 \approx 1256 \text{ мм}^2 = 1,256 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Submodel



brp2 [BRP18]

piston with moving body

External variables

Image >>

Parameters

Title	Value	Unit	Tags
index of hydraulic fluid	0		
piston diameter	40	mm	
rod diameter	5	mm	
chamber length at zero relative displacem...	0	mm	

Рис. 31. Задание параметров гидроцилиндра

2. Дроссель.

Дроссель – это элемент, определяющий *демпфирование*, для него необходимо задаться перепадом давления и расходом жидкости.

Предположим, что максимальная вертикальная скорость изменения высоты микропрофиля составляет $\dot{h} = 1 \text{ м/с}$. Учитывая, что требуемый коэффициент демпфирования должен быть $k_{п} = 1000 \text{ Н/(м/с)}$ – максимальное усилие на поршне:

$$F = k_{п} \cdot \dot{h} = 1000 \cdot 1 = 1000 \text{ Н.}$$

Тогда максимальное давление и, соответственно, перепад давления можно определить как

$$\Delta p = F / A_{\text{п}} = 1000 / 1,256 \cdot 10^{-3} \approx 0,8 \text{ МПа} \approx 8 \text{ бар.}$$

Расход через дроссель при принятой скорости можно вычислить согласно выражению

$$Q = A_{\text{п}} \cdot \dot{h} = 1,256 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 1,256 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} \approx 75 \text{ л/мин.}$$

Следует отметить, что другие сочетания, такие как 37,5 л/мин; 4 бар или 25 л/мин; 2,7 бар и т. д., дают такой же коэффициент демпфирования, но для различных скоростей изменения высоты микропрофиля, и позволяют получить разные выходные характеристики колебаний из-за нелинейности уравнения Бернулли.

В данном примере примем для расчета параметры 18,75 л/мин для расхода и 2 бар для перепада давления (рис. 32).

Submodel



bhr1 [BHORF0]

hydraulic orifice - fixed

External variables

Image >>

Parameters

Title	Value	Unit	Tags
index of hydraulic fluid		0	
number of parallel orifices		1	
pressure drop definition method		dP/Q	
fluid properties for pressure drop measure...	at reference conditions		
characteristic flow rate	18.75	L/min	
corresponding pressure drop	2	bar	
critical flow number (laminar/turbulent)	1000	null	

Рис. 32. Задание параметров дросселя

3. Аккумулятор.

Аккумулятор обеспечивает *упругие характеристики* подвески. Их необходимо задать через параметры аккумулятора, а именно найти давление предварительной зарядки газа p_0 (*gas precharge pressure*), объем аккумулятора V_0 (*accumulator volume*) и начальное давление p_i (*pressure at port I*), которые обеспечивают эквивалентную механическую жесткость $c_{\Pi} = 15000$ Н/м.

Для нахождения указанных параметров воспользуемся законами газодинамики. Поскольку аккумулятор изначально находится в равновесии, мы можем считать, что его начальное состояние описывается уравнением

$$p_0 \cdot V_0 = p_i \cdot V_i. \quad (1)$$

Кроме того, принимая отсутствие у аккумулятора теплообмена с окружающей средой (адиабатический процесс), получаем уравнение Пуассона:

$$p \cdot V^{\gamma} = \text{const}, \quad (2)$$

где γ – показатель адиабаты (для воздуха $\gamma = 1,42$).

Механическую жесткость можно определить по выражению

$$k_{\text{мех}} = \frac{dF}{dx}. \quad (3)$$

Тогда жесткость аккумулятора можно выразить через механическую, используя формулу (3):

$$k_{\text{гидр.}} = \text{abs} \left(\frac{dp}{dV} \right) = \frac{d \left(\frac{F}{A_{\Pi}} \right)}{d(A_{\Pi} \cdot x)} = \frac{1}{A_{\Pi}^2} \cdot k_{\text{мех}}. \quad (4)$$

Продифференцировав обе части уравнения (2), получаем

$$dp \cdot V^{\gamma} + \gamma \cdot p \cdot V^{\gamma-1} \cdot dV = 0.$$

Преобразовав данное уравнение, получим выражение для определения коэффициента демпфирования аккумулятора:

$$k_{\text{гидр.}} = abs\left(\frac{dp}{dV}\right) = \frac{\gamma \cdot p_i}{V_i}. \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (1), (4) и (5), можно получить значение давления газа в положении статического равновесия:

$$p_0 = \frac{A_{\text{п}}^2 \cdot \gamma \cdot p_i^2}{V_0 \cdot k_{\text{мех}}} = \frac{(12,56 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1,42 \cdot (2,343 \cdot 10^6)^2}{350 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 2,342 \text{ МПа.}$$

Принимая во внимание, что подвеска в статическом положении уравнивает вес КМ, и приняв диаметр поршня 40 мм (площадь поршня $A_{\text{п}} = 1,256 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$), вычислим величину давления, соответствующую этой нагрузке на подвеску:

$$p_i = \frac{300 \cdot 9,81}{1,256 \cdot 10^{-3}} = 2,343 \text{ МПа} = 23,43 \text{ бар.}$$

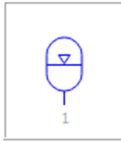
Для нахождения начального объема аккумулятора V_0 принимаем максимальный ход подвески равным $x_{\text{max}} = 10 \text{ см}$ (полный ход можно принять равным $2 \cdot x_{\text{max}}$). Тогда определяем минимальный объем газонаполненной полости аккумулятора:

$$V_{0\text{min}} = 2 \cdot x_{\text{max}} \cdot A = 2 \cdot 10 \cdot 12,56 = 251,2 \text{ см}^3.$$

Учитывая необходимость обеспечения работоспособности аккумулятора, принимаем с запасом $V_0 = 400 \text{ см}^3$ (примерно). Тогда,

$$p_0 = \frac{A^2 \cdot \gamma \cdot p_i^2}{V_0 \cdot k_{\text{мех}}} = \frac{(12,56 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1,42 \cdot (2,343 \cdot 10^6)^2}{350 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 2,342 \text{ МПа.}$$

Submodel



accumulator [HA001]

hydraulic accumulator without inlet orifice

External variables

Image >>

Parameters

Title	Value	Unit	Tags
# pressure at port 1	23.43	bar	
index of hydraulic fluid	0		
isothermal initialization (0) or adiabatic initi...	0		
gas precharge pressure	20.5	bar	
accumulator volume	0.4	L	
polytropic index	1.42	null	

Рис. 33. Задание параметров гидроаккумулятора

4. Параметры жидкости.

Заддим характеристики жидкости согласно рисунку 34.

Submodel



elementaryhydraulicprops [FP04]

indexed hydraulic fluid properties

External variables

Image >>

Parameters

Title	Value	Unit	Tags
type of fluid properties	elementary		
index of hydraulic fluid	0		
temperature	40	degC	
name of fluid	unnamed fluid		
▾ <input type="checkbox"/> General properties			
density	850	kg/m**3	
bulk modulus	17000	bar	
absolute viscosity	51	cP	
▾ <input type="checkbox"/> Aeration			
absolute viscosity of air/gas	0.02	cP	
saturation pressure (for dissolved air/...	0	bar	
air/gas content	0.1	%	
polytropic index for air/gas/vapor con...	1.4	null	

Рис. 34. Параметры жидкости

2.4. Выполнение расчета

Переходим на вкладку **SIMULATION**, выбираем пункт *Temporal analysis* (Временной анализ) и *Run simulation*.

После завершения расчета строим кривую перемещения поддресоренной массы для гидравлической подвески (красный цвет). Запускаем расчет колебаний КМ с механической подвеской и помещаем кривую перемещений на тот же график (кривая желтого цвета). На этот же график наносим кривую, описывающую изменение высоты микропрофиля (синий цвет) (рис. 35).

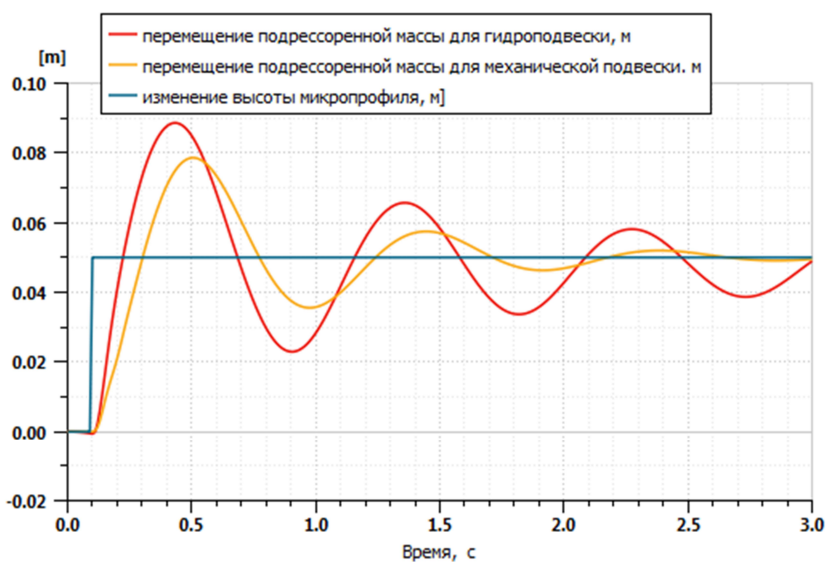


Рис. 35. Перемещения поддресоренной массы

Как и прогнозировалось, гидравлическая подвеска имеет почти ту же частоту, что и механическая, это означает, что эти жесткости практически эквивалентны. Что касается демпфирования, есть некоторые отличия, о которых указывалось выше, в связи с нелинейностью уравнения Бернулли, идеализацией газодинамических процессов.

Варьируя значениями перепада давления и расхода для дросселя, можно добиться практически одинаковых характеристик колебаний для механической и гидравлической подвески.

Задание

1. Составить расчетную модель гидропневматической подвески с помощью компонентов AMESim в соответствии с вариантом задания и расчетной схемой (рис. 20).
2. Выбрать соответствующие субмодели компонентов.
3. Задать параметры компонентов для анализа колебаний поддрессоренной и неподдрессоренной масс при заданном законе изменения возмущающего воздействия (табл. 1–3 из лабораторной работы № 1).
4. По результатам моделирования построить зависимости перемещений и скоростей поддрессоренной и неподдрессоренной масс при наезде объекта на заданную неровность.
5. Оформить отчет, содержащий расчетную модель и графики зависимостей согласно пункту 4.

Лабораторная работа № 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Цель работы: получение навыков синтеза структуры системы поддрессирования тягово-транспортных машин на основе построения междисциплинарных математических моделей и реализации их на ЭВМ с помощью пакета Simcenter AMESim.

1. Общие сведения

В данной работе создается модель и проводится анализ активной гидропневматической подвески.

В предыдущей лабораторной работе рассмотрена гидропневматическая подвеска с демпфирующим элементом в виде дросселя, постоянного сечения со статическим регулированием жесткости (начальное давление газа в аккумуляторе). Однако в процессе движения машины имеет место перераспределение веса на колеса и мосты, например, при торможении, движении на повороте и пр. В силу этого происходит крен машины, что снижает устойчивость движения,

ухудшается управляемость. Статическое регулирование не позволяет устранить эту проблему, поэтому используются активные подвески, учитывающие динамику перераспределения веса и изменяющие параметры подвески.

На рисунке 36 демонстрируется принцип работы активной гидropневматической подвески. Стрелками указана последовательная работа подвески при увеличении и последующем снижении нагрузки на колесо КМ.

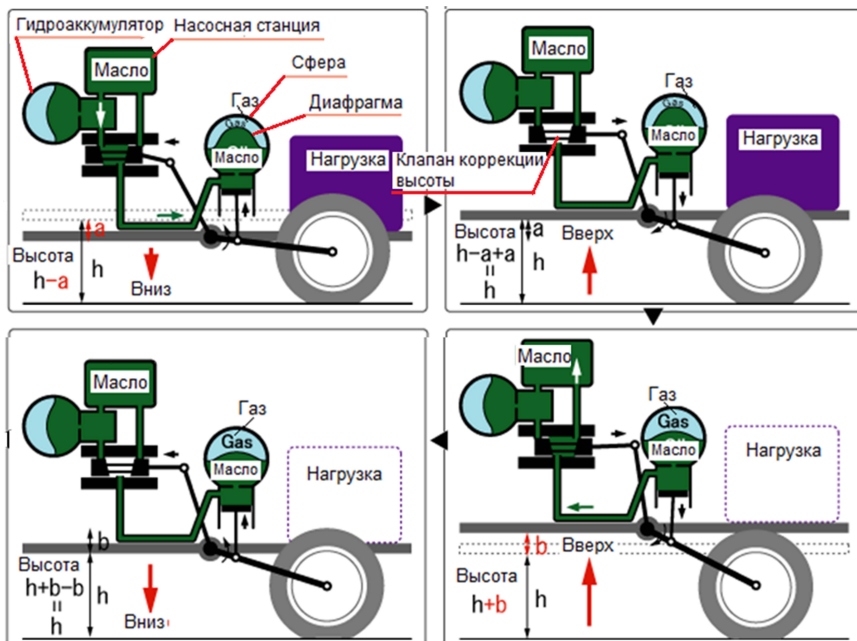


Рис. 36. Принцип работы активной гидropневматической подвески

Дополнительно к элементам гидropневматической подвески в рассматриваемой конструкции для подачи жидкости в гидроцилиндр установлена насосная станция, включающая насос и, как правило, гидроаккумулятор, повышающий быстродействие системы. Переключение режимов накачка/откачка жидкости в/из гидроцилиндра осуществляется трехпозиционным распределителем.

Увеличение нагрузки приводит к уменьшению высоты положения подпрессоренной массы. Сигнал об этом поступает к блоку управле-

ния распределителем, который связывает насос с гидроцилиндром, что приводит к повышению давления в гидроцилиндре и поршне, сжимая газ в сфере, перемещается вверх, компенсируя снижение высоты положения кузова автомобиля. При уменьшении нагрузки аналогичным образом происходит снижение давления в цилиндре.

В работе стоит задача смоделировать подвеску со статической коррекцией дорожного просвета (т. е. в соответствии со статической нагрузкой). При этом сохраняется один и тот же ход поршня, какой бы ни была полезная нагрузка. Эта коррекция осуществляется за счет изменения давления в гидропневматической части подвески.

Проанализируем реакцию подвески на ступенчатое увеличение нагрузки в 2500 Н на подвеску через 2 с после начала движения. Остальные параметры сохраняются, как в лабораторной работе № 2.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Формирование расчетной модели

1. Переходим при необходимости в режим **SKETCH**.

2. Загружаем модель гидравлической подвески (предыдущая работа) и копируем ее в новое окно эскиза модели, созданное с помощью команды **File** → **New**.

3. Добавим в модель компонент **piecwiselinear** из раздела **Mechanical** → **Signal, Control** → **Sources, Sinks** (рис. 37) для задания нагрузки и соединим его через компонент **forcecon** из **Mechanical** → **Translation** → **Sources, Sensors** → **Nodes** с верхним по схеме портом подрессоренной массы. Компонент **forcecon** служит для преобразования безразмерного сигнала, поступающего на порт 1, в силу с тем же значением в H , которое выводится на порт 2.

Для замера перемещений подрессоренной и неподрессоренной масс устанавливаем на их портах датчики перемещения **displacementsensor** из той же библиотеки, ориентируя их, чтобы положительное перемещение при замере было направлено вверх.

Для расчета относительного смещения поместим в схему компонент из библиотеки **Signal, Control** → **Maths** → **subtraction**, соединив порт «+» с датчиком перемещения неподрессоренной, порт «-» — с датчиком перемещения подрессоренной масс, и на выход блока вычитания поместим компонент **Signal, Control** → **Maths** → **signalsink**.

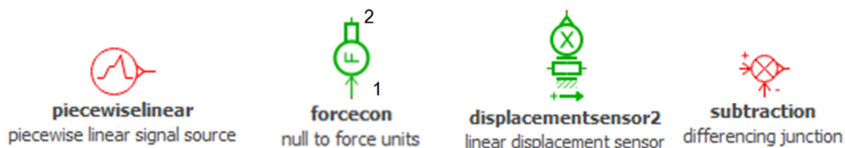


Рис. 37. Блоки модели

В итоге получим схему, приведенную на рисунке 38.



Рис. 38. Модель активной подвески

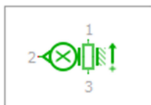
2.2. Определение субмоделей компонентов

Так как мы использовали ряд компонентов из предыдущей работы, то необходимо задать субмодели только для добавленных в модель объектов (они подсвечены в модели).

Для датчика перемещения подрессоренной массы выбираем суб-модель MECDS2A *displacement sensor with offset and gain* (датчик перемещения со смещением и коэффициентом усиления), а для датчика перемещения неподдресоренной массы – субмодель MECDS1A *displacement sensor with offset and gain (acceleration and displacement at port)* (датчик перемещения со смещением и усилением (ускорение и смещение в порту)) (рис. 39).

Для источника сигнала силы выберем субмодель UD00 (рис. 40).

Submodel summary



Alias: displacementsensor2_1
Component: displacementsensor2
Submodel name: MECDS2A

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
MECDS0A	displacement sensor with offset and gain (displacement at ports)	generic submodel
MECDS1A	displacement sensor with offset and gain (acceleration and displacement at ports)	generic submodel
MECDS2A	displacement sensor with offset and gain	generic submodel

Рис. 39. Выбор субмодели для датчиков перемещения *displacementsensor2*

Submodel summary



Alias: piecewiselinear_1
Component: piecewiselinear
Submodel name: UD00

Compatible submodel list

Name	Description	Submodel type
UD00	piecewise linear signal source	generic submodel
SIGUD00	piecewise linear signal source	generic submodel

Рис. 40. Выбор субмодели для источника силы *piecewiselinear_2*

2.3. Задание параметров компонентов

Для обоих датчиков перемещения зададим положительное направление сигнала от порта 1 к порту 3 (рис. 41).

Submodel



displacementsensor2 [MECDS1A]

displacement sensor with offset and gain (acceleration and displacement at ports)

External variables

Image >>

Parameters

Title	Value	Unit	Tags
sign convention: positive from	port 1 to 3		
offset to be subtracted from displacement	0	m	
gain for signal output	1	1/m	

Рис. 41. Задание параметров датчиков перемещения

Для источника сигнала силы определим кусочно-линейный закон согласно рисунку 42.

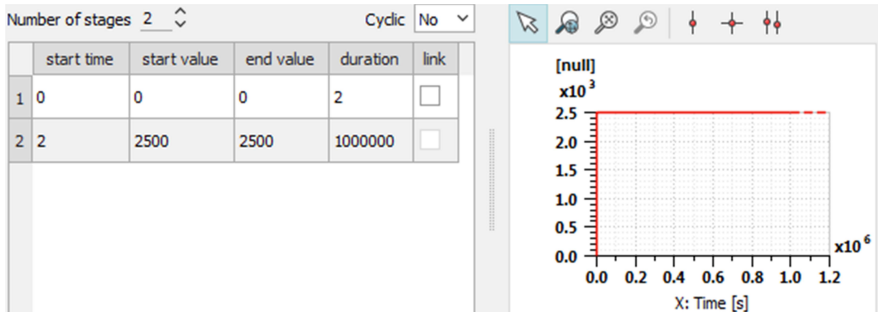


Рис. 42. Задание сигнала силы

Для «чистоты» эксперимента для высоты микропрофиля зададим нулевое значение (рис. 43).

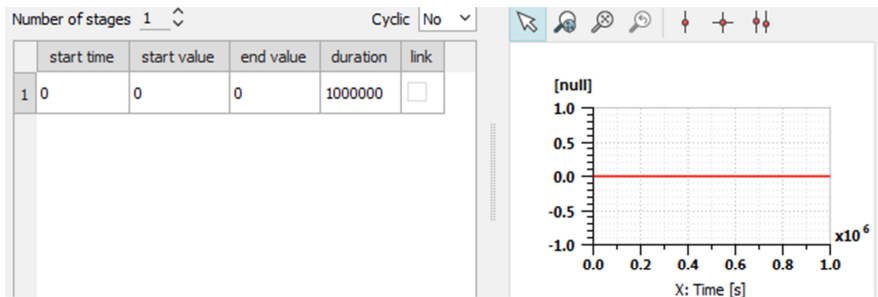


Рис. 43. Задание параметров микропрофиля

2.4. Выполнение расчета

Задаем длительность расчета (10 с) и шаг печати (0,01 с), остальные параметры оставляем без изменения.

Полученная зависимость перемещения подрессоренной массы представлена на рисунке 44, из которого следует, что уровень кузова КМ снижается примерно на 11 см, что также видно по снижению расстояния между колесом и кузовом (рис. 45).

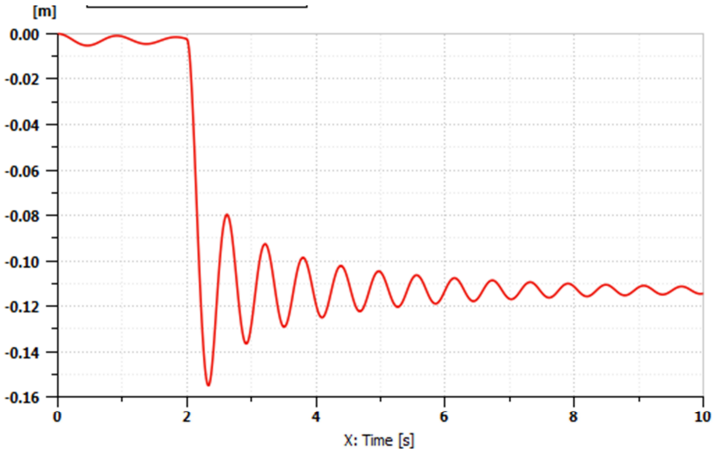


Рис. 44. Перемещение подрессоренной массы

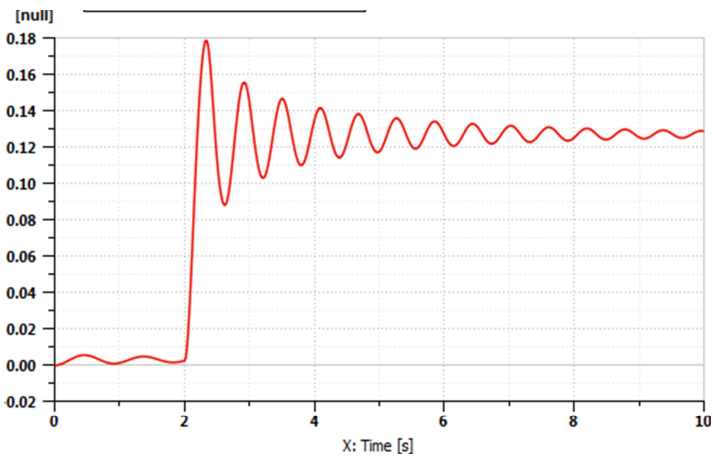


Рис. 45. Относительное смещение неподдресоренной и подрессоренной масс

3. Реализация функции коррекции относительного положения кузова и колеса

Для коррекции высоты необходимо обеспечить подпитку энергии в гидравлическую часть подвески, а именно, в надпоршневое пространство гидроцилиндра. В качестве источника энергии будем использовать гидронасос, а в качестве регулирующего элемента – трехходовой распределитель, который реагирует на изменение относительного расстояния между колесом и кузовом КМ, т. е. на выходящий сигнал блока вычитания.

Параметры нагружения подвески оставим аналогичными пункту 2 данной работы.

3.1. Формирование расчетной модели

1. Переходим при необходимости в режим **SKETCH**.

2. Загружаем модель гидравлической подвески, полученную в пункте 2 данной работы, и копируем ее в новое окно эскиза модели, созданное с помощью команды **File** → **New**.

3. В качестве гидронасоса используем компонент **Hydraulic** → **Fluids, Sources, Sensors** → **pressuresource** (идеальный источник гидравлического давления) (рис. 46).

4. В качестве управляющего распределителя выбираем **Hydraulic** → **Directional Control Valves** → **valve04** (электрически управляемый трехпозиционный трехходовой клапан) (рис. 46).

Порт **P** связан с источником давления, порт **T** – со сливом, порт **A** – с нагрузкой.

5. В качестве бака для слива используем компонент **Hydraulic** → **Fluids, Sources, Sensors** → **tank1** (бак или емкость) (рис. 46).

6. Передачу сигнала от блока вычитания к распределителю будем осуществлять через блок усиления, компонент **Signal, Control** → **Maths** → **gain** (усиление) (рис. 46).



Рис. 46. Добавленные блоки модели

В результате вставки указанных компонентов в модель и их соответствующего соединения, получим модернизированную модель, в которой добавлен трехходовой гидравлический клапан, управляемый сигналом от датчика относительного смещения между колесом и кузовом КМ (рис. 47).

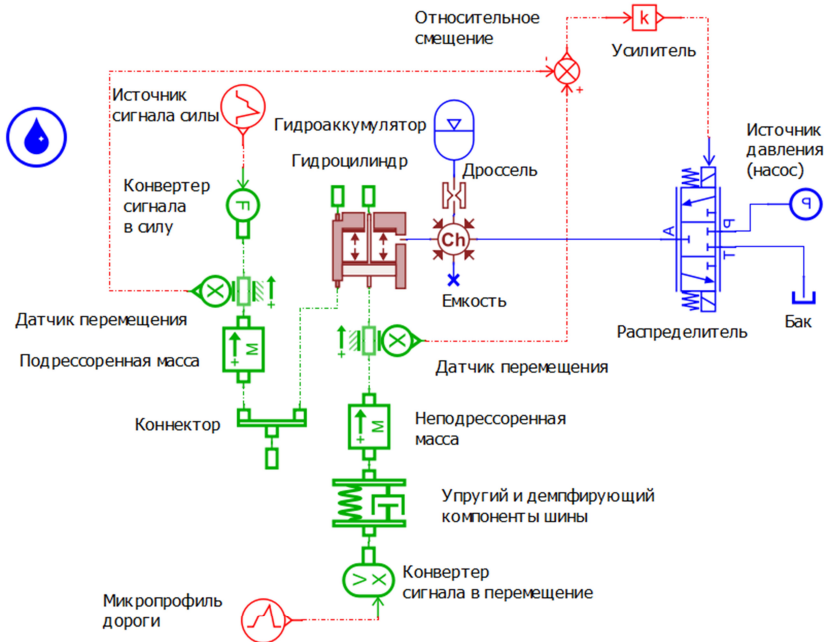


Рис. 47. Модель активной подвески с коррекцией положения кузова КМ

3.2. Определение субмоделей компонентов

Для всех новых компонентов, кроме линий связи, имеются единственные субмодели. Для всех линий связи зададим субмодель *Direct connection* (прямое соединение) (рис. 48).

Submodel summary



Alias: hydraulic_1
Component: h2port
Submodel name: DIRECT

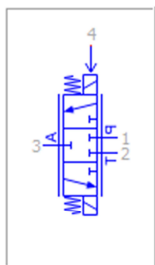
Name	Description	Submodel type
DIRECT	Direct connection	
HL0001	hydraulic pipe - basic (C-R)	
HL010	hydraulic pipe - distributive (C-R *** C-R)	
HL0040	hydraulic pipe - distributive inertia (C-IR **** C-IR)	
HLLW0	hydraulic pipe - cfd 1d (C-IR *** C-IR)	

Рис. 48. Выбор субмоделей трубопроводов

3.3. Задание параметров компонентов

1. Для распределителя зададим значение *valve rated current* (номинальный ток клапана) равным 1 мА, а остальные параметры оставим без изменения (рис. 49).

Submodel



valve04 [PV0033]

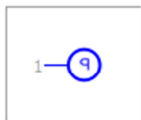
3 position 3 port hydraulic control valve

Title	Value	Unit	Tags
index of hydraulic fluid	0		
valve rated current	1	mA	
deadband as fraction of spool travel	0	null	
▶ <input type="checkbox"/> valve dynamics			
▶ <input type="checkbox"/> pressure drop characteristic			

Рис. 49. Параметры трехходового распределителя

2. Для идеального источника давления зададим постоянное давление, равное 70 бар (рис. 50).

Submodel



pressuresource [PS00]

piecewise linear hydraulic pressure source

Title	Value	Unit	Tags
number of stages	1		
cyclic	no		
time at which duty cycle starts	0	s	
pressure at start of stage 1	70	bar	
pressure at end of stage 1	70	bar	
duration of stage 1	1e+06	s	

Рис. 50. Параметры источника давления

3. Для блока усиления зададим коэффициент усиления, равный 50.

3.4. Выполнение расчета

Задаем длительность расчета (30 с) и шаг печати (0,1 с), остальные параметры оставляем без изменения.

Полученная зависимость смещения во времени показывает, что контур регулирования работает не очень удовлетворительно. С одной стороны, ему удастся регулировать относительное смещение

вблизи нуля, но, с другой стороны, время отклика велико, а регулирование очень нестабильно, управление подвеской приводит к колебаниям (имеет место эффект перерегулирования) (рис. 51).

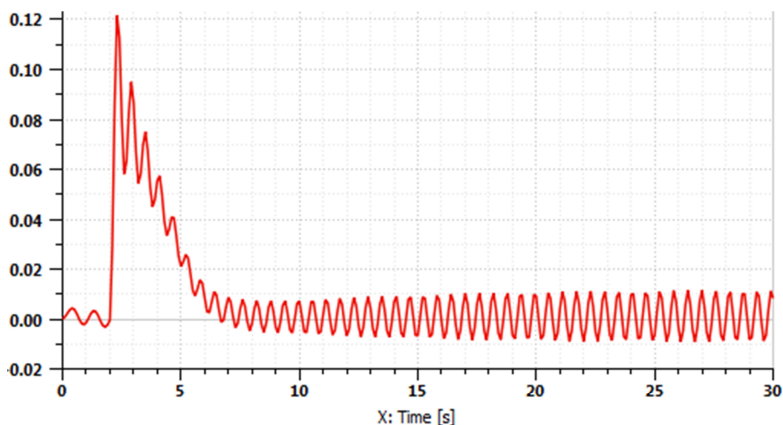


Рис. 51. Относительное смещением неподдрессоренной и поддрессоренной масс

4. Повышение стабильности работы системы коррекции

Один из вариантов решения состоит в замене фиксированного дроссельного отверстия обратными клапанами, что позволит сделать демпфирование более стабильным.

4.1. Формирование расчетной модели

1. Загружаем модель гидравлической подвески, полученную в пункте 3 данной работы, и копируем ее в новое окно эскиза модели, созданное с помощью команды **File** → **New**.

2. Удаляем из модели компонент гидравлический дроссель.

3. В линию связи гидроцилиндра и аккумулятора устанавливаем параллельно два разнонаправленных обратных клапана из библиотеки **Hydraulic** → **Pressure Control Valves** → **presscontrol02** (обратный клапан) (рис. 52).

4. Для формирования параллельного соединения добавим в модель два гидравлических узла с тремя портами из библиотеки **Hydraulic** → **Pressure Losses, Volumes, Nodes** → **hydrnode3** (рис. 52).



Рис. 52. Компоненты, добавляемые в модель

В результате вставки указанных компонентов в модель и их соответствующего соединения, получим активную подвеску (рис. 53).

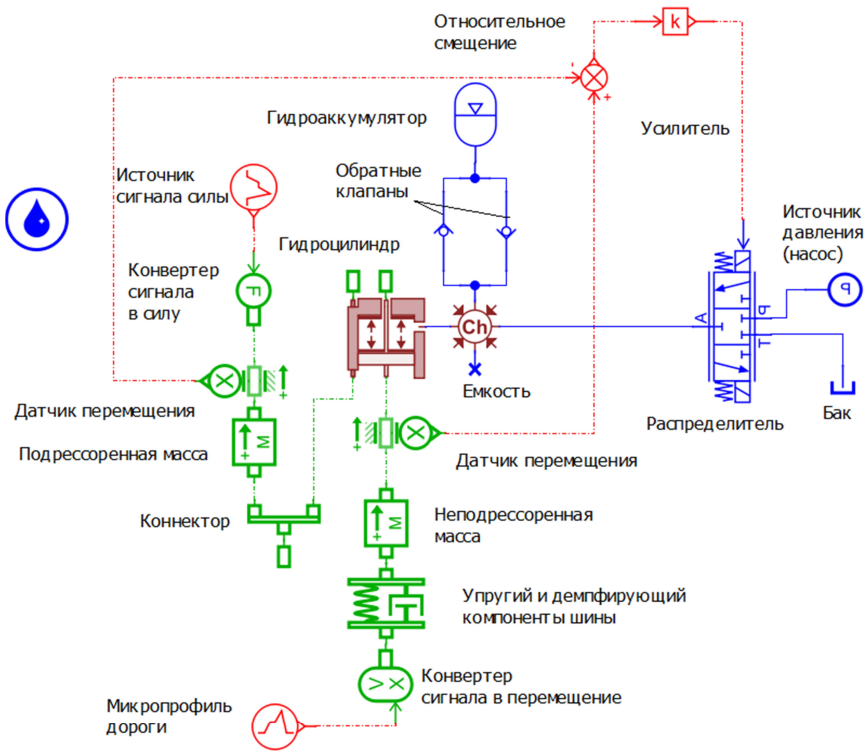


Рис. 53. Модель активной подвески с коррекцией положения кузова КМ

4.2. Определение субмоделей компонентов

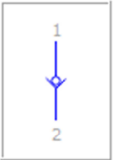
Для всех новых элементов зададим в качестве субмоделей *Premier submodel*.

4.3. Задание параметров компонентов

1. Для обратных клапанов по аналогии с дросселем зададим (рис. 54):

- давление открытия 2 бар;
- расход 18,75 л/мин/бар.

Submodel



presscontrol02_1 [CV010]
hydraulic check valve with linear characteristic

Title	Value	Unit	Tag
index of hydraulic fluid	0		
check valve cracking pressure	2	bar	
check valve flow rate pressure gradient	18.75	L/min/bar	
valve hysteresis	0	bar	

Рис. 54. Задание параметров обратных клапанов

4.4. Выполнение расчета

Задаем длительность расчета (30 с) и шаг печати (0,1 с), остальные параметры оставляем без изменения. Получаем относительное смещение (рис. 55).

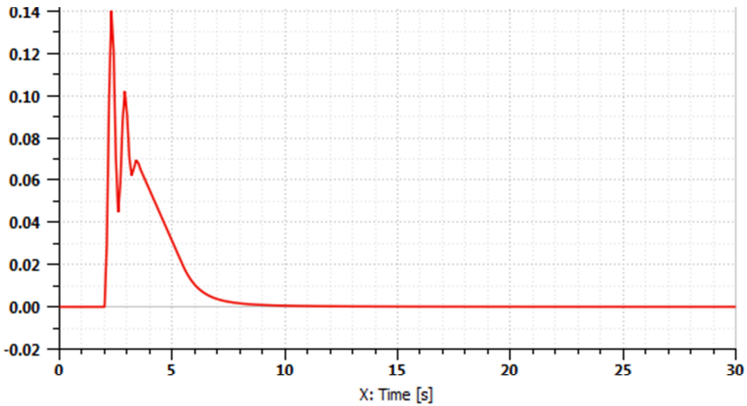


Рис. 55. Относительное смещением неподдресоренной и подрессоренной масс

Полученный график подтверждает, что регулирование лучше осуществлять с помощью обратных клапанов. Время отклика остается прежним, потому что динамика регулирующего распределителя не изменилась, но система при этом достаточно стабильна.

Следует отметить, что в результате проведенного анализа подвеска не была полностью оптимизирована, но были продемонстрированы возможные варианты решения задачи создания активной подвески и выбора ее параметров.

Студентами самостоятельно или по заданию преподавателя могут быть проведены дополнительные структурные изменения конструкции подвески, исследования и сопоставительный анализ результатов с полученными в данной лабораторной работе.

Задание

1. Составить расчетную модель гидропневматической подвески с помощью компонентов AMEsim в соответствии с вариантом задания и расчетной схемой (рис. 20).

2. Выбрать соответствующие субмодели компонентов.

3. Задать параметры компонентов для анализа колебаний поддрессоренной и неподдрессоренной масс при заданном законе изменения возмущающего воздействия (табл. 1–3 из лабораторной работы № 1).

4. Величину нагрузки и характеристику изменения нагрузки на подвеску взять из таблиц 4, 5.

5. По результатам моделирования построить зависимости перемещений и скоростей поддрессоренной и неподдрессоренной масс при наезде объекта на заданную неровность.

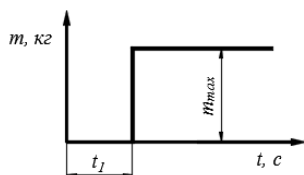
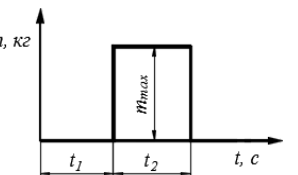
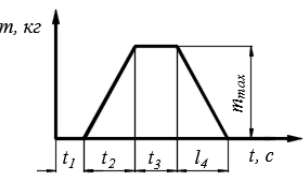
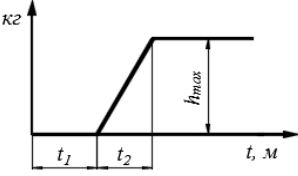
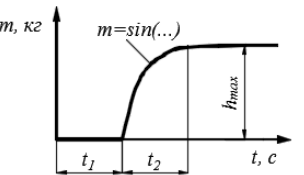
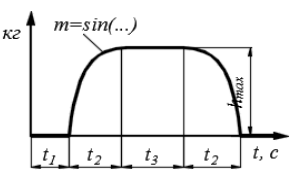
6. Оформить отчет, содержащий расчетную модель и графики зависимостей согласно пункту 5.

Таблица 4

Параметры нагрузки

Вариант	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_4 , с	m_{\max} , кг
1–5	0,5	–	–	–	50
6–10	1,0	10	–	–	40
11–15	1,5	3	10	4	60
16–20	0,5	2	–	–	55
21–25	1,5	3	–	–	65
26–30	1,0	2	15	4	45

Характер изменения нагрузки на подвеску
(варианты согласно списку группы)

№ вар.	Изменение нагрузки	№ вар.	Изменение нагрузки
1–5		6–10	
11–15		16–20	
21–25		26–30	

Лабораторная работа № 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕСНЫХ МАШИН В ПОВОРОТЕ С ПОМОЩЬЮ ПЛОСКОЙ МОДЕЛИ

Цель работы: получение навыков построения математических моделей динамики движения тягово-транспортных машин и реализации их на ЭВМ с помощью пакета Simcenter AMESim.

1. Общие сведения

Рассматривается двухосное транспортное средство, оборудованное шинами, движущееся на повороте с постоянной скоростью.

Все обозначения и словарь взяты из Международного стандарта ISO 8855 – «Дорожное транспортное средство – Динамика транспортного средства и его способность удерживать дорогу – Словарь» [3] и соответствуют терминологии AMESim.

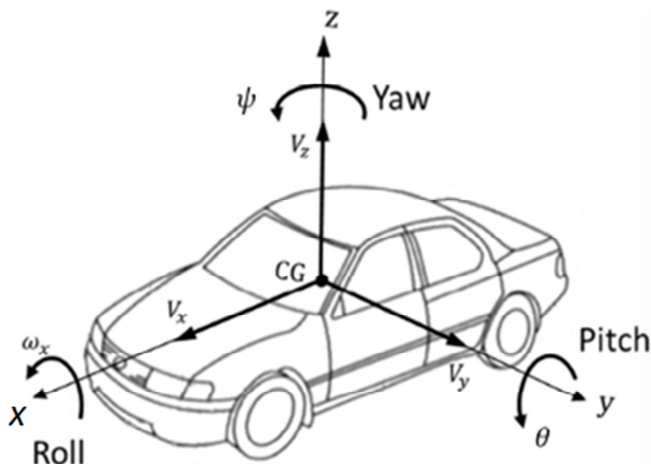


Рис. 56. Обобщенные координаты транспортного средства при повороте:
 X – продольная ось (положительное направление – движение вперед);
 Y – перпендикулярно оси автомобиля, параллельно земле;
 Z – вертикальная ось (положительное направление вверх)

С математическими моделями движения КМ на повороте траектории, реализованными в AMESim, можно ознакомиться в [4–5].

2. Основные сведения о модели шасси VDCAR2DOF1

Субмодель *VDCAR2DOF1* (рис. 57) – это модель шасси с двумя колесами («плоская» схема) для моделирования движения и управляемости, представленная двумя степенями свободы (*DOF*): скоростью рыскания (ψ') и боковым скольжением центра масс (ЦМ) шасси (β) (т. е. крен, тангаж и колебания кузова не учитываются). Учитывается один из основных эффектов – явление скольжения шин.

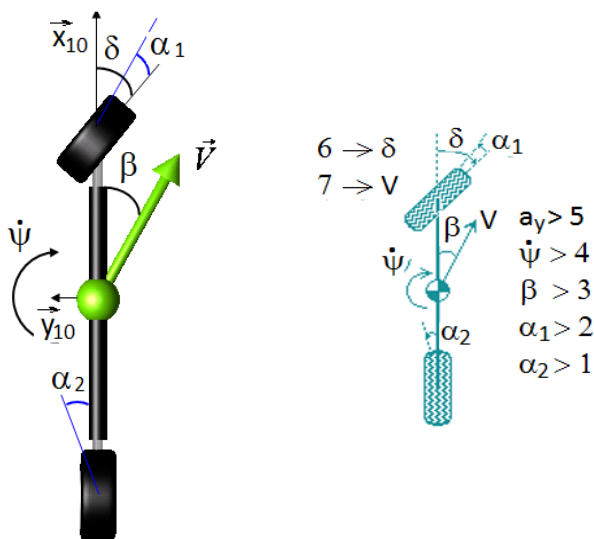


Рис. 57. Входные и выходные параметры модели шасси *VDCAR2DOF1*:
 \vec{V} – абсолютная скорость центра масс шасси, м/с; δ – угол поворота колеса, градус;
 β – угол бокового скольжения центра масс, градус; $\dot{\psi}$ – угловая скорость рыскания,
градус/с; α_1, α_2 – углы увода переднего и заднего колес соответственно, градус;
 $\bar{x}_{10}, \bar{y}_{10}$ – продольная и поперечная оси СК, связанной с центром масс шасси,
параллельные опорной поверхности

Кроме указанного в модели приняты следующие ограничения:

- абсолютная скорость ЦМ кузова V постоянна;
- входной угол поворота δ – это непосредственно угол поворота рулевого колеса;

– ЦМ расположен на опорной поверхности;

– жесткость шин постоянна (линейные модели шин).

В модели используются следующие СК:

- $R_0 (O, x_0, y_0, z_0)$ – неподвижная система отсчета;
 - $R_{10} (G, x_{10}, y_{10}, z_{10})$ – СК кузова, начало которой расположено в центре тяжести, а ось x ориентирована вдоль продольной оси КМ.
- Задаваемые для расчета параметры КМ приведены в таблице 6.

Параметры системы, задаваемые для расчета

№ п/п	Наименование	Имя переменной
1	Передняя колесная база (Front wheelbase)	$a1$
2	Задняя колесная база (Rear wheelbase)	$a2$
3	Масса КМ (Mass of the vehicle)	M
4	Момент инерции рыскания (Yaw inertia)	I_{zz}
5	Жесткость передних шин (для одной шины) при движении в повороте (Front tire cornering stiffness (one tire))	$D1$
6	Жесткость задних шин (для одной шины) при движении в повороте (Rear tire cornering stiffness (one tire))	$D2$

Пользователь также может установить начальные значения переменных состояния (по умолчанию они равны нулю):

ψ'_0 – скорость рыскания кузова, градус/с;

β_0 – угол бокового скольжения кузова КМ, градус;

ψ_0 – угол рыскания кузова, градус;

X_{G0} – абсолютное положение ЦМ кузова КМ по оси x , м;

Y_{G0} – абсолютное положение ЦМ кузова КМ по оси y , м.

3. Порядок выполнения работы

Целью является моделирование движения двухосной КМ по криволинейной траектории и определение выходных параметров процесса движения КМ.

3.1. Создание эскиза модели

В данной работе будут использоваться компоненты библиотеки *Vehicle Dynamics* и *Signal, Control*.

1. Переходим при необходимости в режим *SKETCH*.

2. В дереве библиотек выбираем *Vehicle Dynamics* → *Chassis* → *Chassis2dof* и перетаскиваем компонент в рабочее пространство.

3. Далее из раздела *Signal, Control* → *Sources, Sinks* помещаем в модель два элемента *piecewiselinear*, которые впоследствии будут использоваться для задания значений угла поворота рулевого колеса и скорости движения КМ.

4. Аналогично из раздела *Signal, Control* → *Sources, Sinks* помещаем в модель пять элементов *signalsink*, и из раздела *Signal, Control* → *Match* один блок *gain*.

5. Задаем связи между портами помещенных в схему элементов. В итоге получаем схему модели (рис. 58):

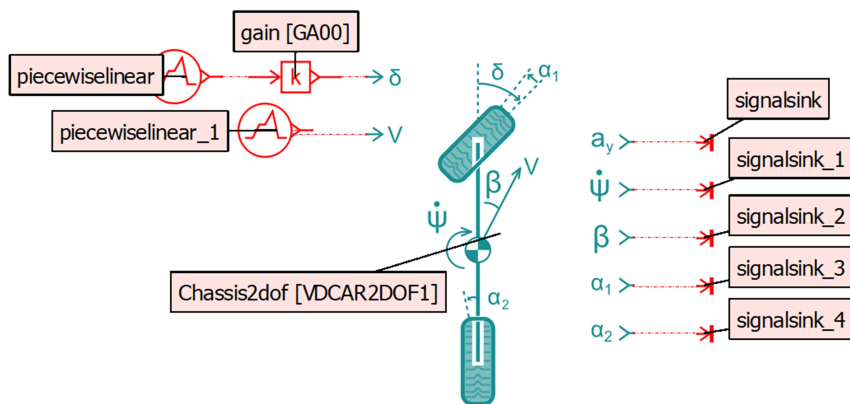


Рис. 58. Схема модели

3.2. Определение субмоделей компонентов

Для всех компонентов в данном примере назначим субмодели по умолчанию, выбрав *Premier submodel*.

3.3. Задание параметров компонентов

Параметры модели шасси задаются согласно рисунку 59.

Начальные значения переменных состояния КМ *Explicit state initial value* устанавливаются равными нулю.

Parameters

Title	Value	Unit	Tags
▼ <input type="checkbox"/> Explicit state initial value			
# carbody sideslip angle	0	degree	
# carbody yaw velocity	0	degree/s	
# carbody yaw angle	0	degree	
# absolute position of carbody cog ...	0	m	
# absolute position of carbody cog ...	0	m	
▼ <input type="checkbox"/> Masses and inertias			
mass of the vehicle	1000	kg	
yaw inertia	800	kgm**2	
▼ <input type="checkbox"/> Geometry			
front wheelbase	1	m	
rear wheelbase	1.5	m	
▼ <input type="checkbox"/> Tires			
front tire cornering stiffness (one tire)	65000	N/rad	
rear tire cornering stiffness (one tire)	55000	N/rad	
▶ <input type="checkbox"/> Low speed handling			

Рис. 59. Параметры модели шасси

Для блока угла поворота управляемых колес *piecwiselinear* задаем нижеприведенную характеристику (рис. 60).

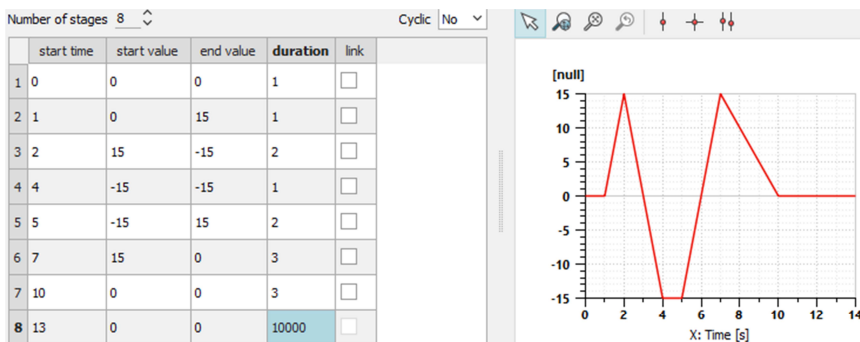


Рис. 60. Характеристика угла поворота управляемых колес

Для блока усиления *gain* задаем значение, равное 1/16.

Для блока задания скорости *piecwiselinear_1* задаем постоянное значение 30 м/с.

3.4. Моделирование и постобработка результатов

Ниже приведены некоторые из расчетных характеристик движения КМ по криволинейной траектории (рис. 61–64).

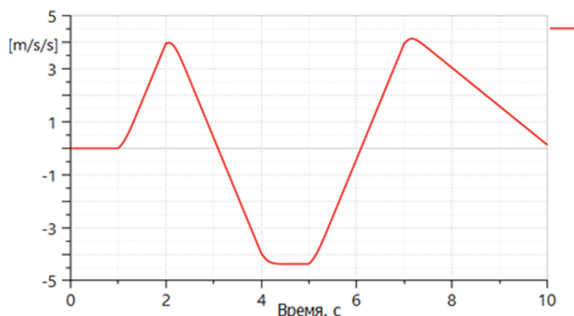


Рис. 61. Боковое ускорение кузова КМ (*carbody lateral acceleration*)

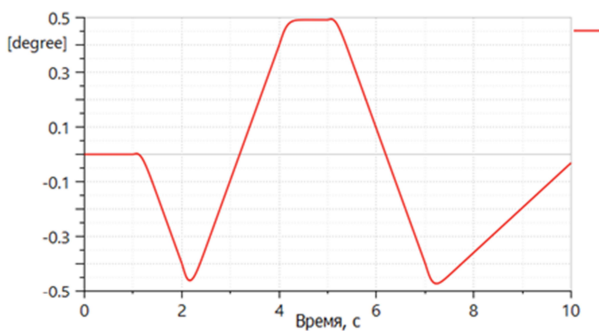


Рис. 62. Угол дрейфа кузова КМ

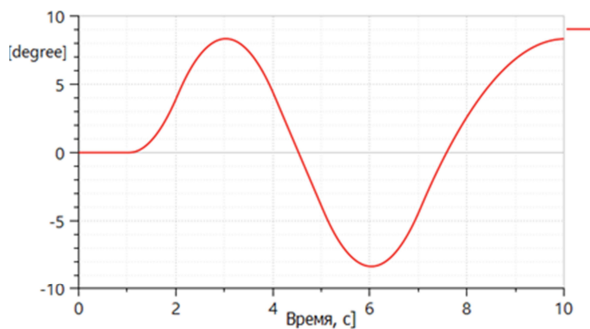


Рис. 63. Угол рыскания кузова КМ (*carbody yaw angle*)

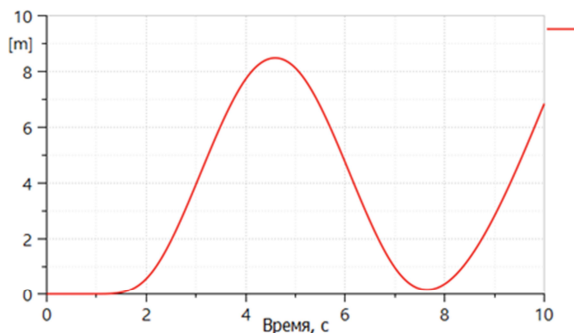


Рис. 64. Положение ЦМ КМ (*absolute position of carbody cog on y axis*)

Задание

1. Составить плоскую расчетную модель движения двухосной машины на повороте с помощью компонентов AMESim в соответствии с вариантом задания.

2. Выбрать соответствующие субмодели компонентов.

3. Задать параметры колесной машины согласно таблице 7.

4. Закон управления (поворот рулевого колеса) задать аналогично примеру, а передаточное отношение рулевого привода $u_{пр}$ – согласно таблице 7. Коэффициент усиления блока *gain*, определяющий угол поворота управляемого моста, принять равным $1 / u_{пр}$.

5. По результатам моделирования построить зависимости бокового ускорения, угла дрейфа, угла рыскания кузова КМ и изменение положения центра масс КМ при криволинейном движении.

6. По заданию преподавателя оценить другие характеристики поворачиваемости КМ.

7. Оформить отчет, содержащий расчетную модель и графики зависимостей, согласно пункту 4.

Таблица 7

Варианты заданий

№ вар.	a_1 , м	a_2 , м	M , кг	I_{zz} , кг·м ²	D_1 , Н/рад	D_2 , Н/рад	V , м/с	$u_{пр}$
1	1,05	1,60	1100	900	65 000	55 000	30	15
2	1,10	1,65	1050	800	60 000	50 000	28	14
3	1,20	1,45	1200	1000	70 000	65 000	26	13

№ вар.	a_1 , м	a_2 , м	M , кг	I_{zz} , кг·м ²	D_1 , Н/рад	D_2 , Н/рад	V , м/с	$u_{пр}$
4	1,30	1,60	1250	1050	65 000	60 000	32	14
5	1,25	1,85	1150	950	60 000	55 000	34	15
6	1,15	1,70	1050	850	65 000	60 000	30	16
7	1,45	1,75	1200	950	70 000	65 000	28	17
8	1,35	1,55	1250	1000	65 000	60 000	26	16
9	1,50	1,60	1100	800	60 000	55 000	32	15
10	1,40	1,45	1150	900	75 000	65 000	34	14
11	1,30	1,55	1250	950	65 000	55 000	30	13
12	1,60	1,60	1300	1100	70 000	55 000	28	14
13	1,35	1,70	1350	1150	60 000	50 000	26	15
14	1,45	1,65	1100	1000	55 000	50 000	32	16
15	1,5	1,85	1250	1050	65 000	55 000	34	13

Лабораторная работа № 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В ПОВОРОТЕ С ПОМОЩЬЮ 3D-МОДЕЛИ

Цель работы: получение навыков построения математических моделей динамики движения тягово-транспортных машин и реализации их на ЭВМ с помощью пакета Simcenter AMESim.

1. Общие сведения о модели шасси *VDCAR3DOF2*

Теоретические положения динамики поворота колесной машины (КМ) изложены в лабораторной работе № 4.

В данной работе рассматривается четырехколесная модульная модель шасси *VDCAR3DOF2* (рис. 65, 66) с 3 степенями свободы (скорость рыскания ψ' , угол бокового скольжения кузова β , угол крена ϕ).

Она может учитывать следующие основные факторы (при использовании других подмоделей):

– боковое скольжение шины (используются отдельно модели шин *VDTIRELAT01* и *VDTIRELAT02*);

- эластокинематику оси (угол схождения и боковую деформацию под действием боковых сил);
- кинематику оси (схождение и развал, вызванные углом крена);
- изменение жесткости систем стабилизации передней/задней оси;
- влияние жесткости рулевой колонки (соответствующие модели рулевого управления).

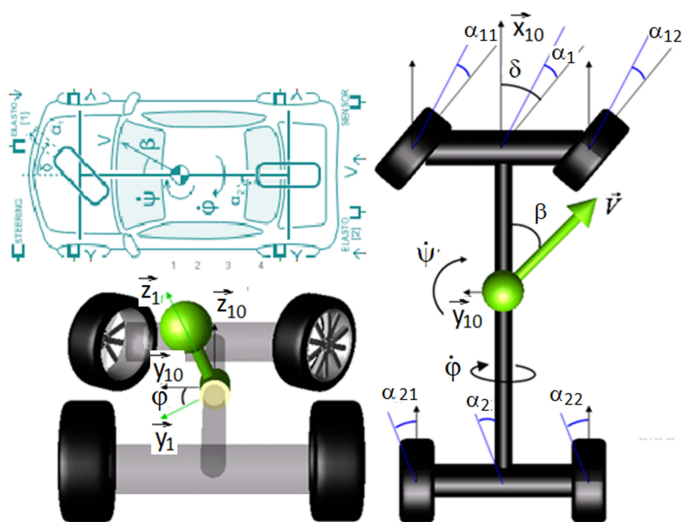


Рис. 65. Четырехколесная модульная модель шасси *VDCAR3DOF2*:

\vec{V} – абсолютная скорость центра масс шасси; δ – угол поворота управляемых колес; β – угол бокового скольжения центра масс; $\dot{\psi}$ – скорость рыскания; φ – угол крена; $\dot{\varphi}$ – угловая скорость крена; α_1, α_2 – углы увода передней и задней осей

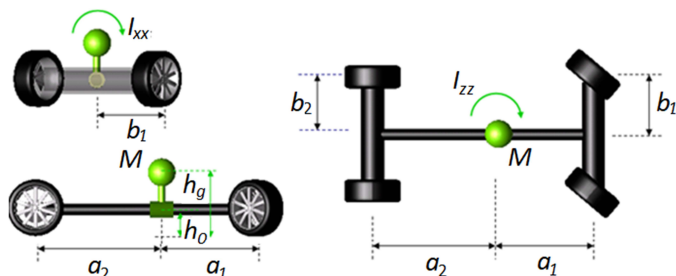


Рис. 66. Основные массо-геометрические параметры модели *VDCAR3DOF2*

Вследствие модульности рассматриваемой модели можно выбрать уровень моделирования: учитывать ли при моделировании кинематику оси (да/нет), а также эффект эластокинматики (да/нет).

Уровень моделирования кинематики оси может быть выбран:

- постоянные коэффициенты для угла схождения и развала, вызванных креном;

- однофакторная кинематическая зависимость (1D): $\delta = f(y_n)$;

- трехфакторная кинематическая зависимость (3D): $\delta = f(z, y_n, z_{opp})$ (z – текущий поворот рулевого колеса, y_n – перемещение рулевой рейки и z_{opp} – соответствующий ход колеса).

Дополнительно можно оценить влияние жесткости поперечной стабилизации передней/задней оси и связанные с этим эффекты.

Колебания КМ при крене не принимаются во внимание.

Дополнительно к СК модели, рассмотренной в лабораторной работе № 4, используется СК кузова КМ $R_1(G, x_{10}, y_1, z_1)$, полученная из R_{10} поворотом на угол крена (φ) вокруг оси x_{10} (рис. 67).

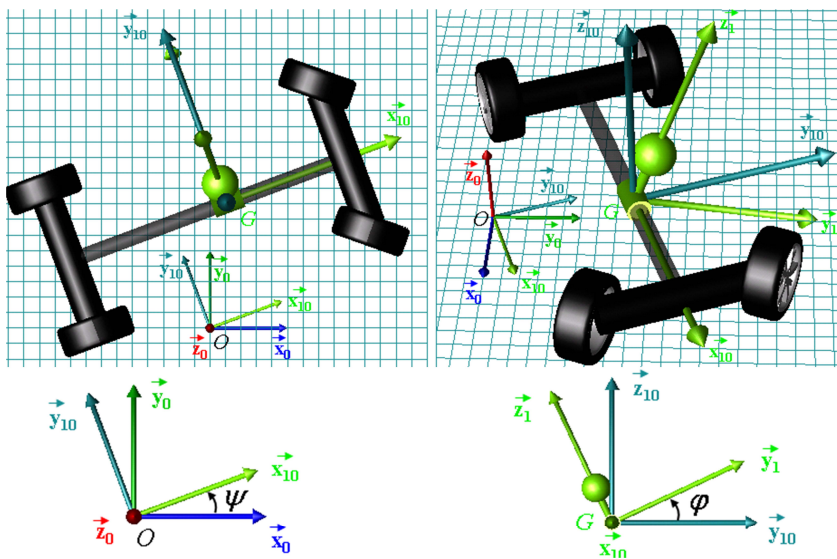


Рис. 67. Системы координат модели

Входные и выходные переменные модели представлены на рисунке 68 (обозначены стрелками), а их описание – в таблице 8.

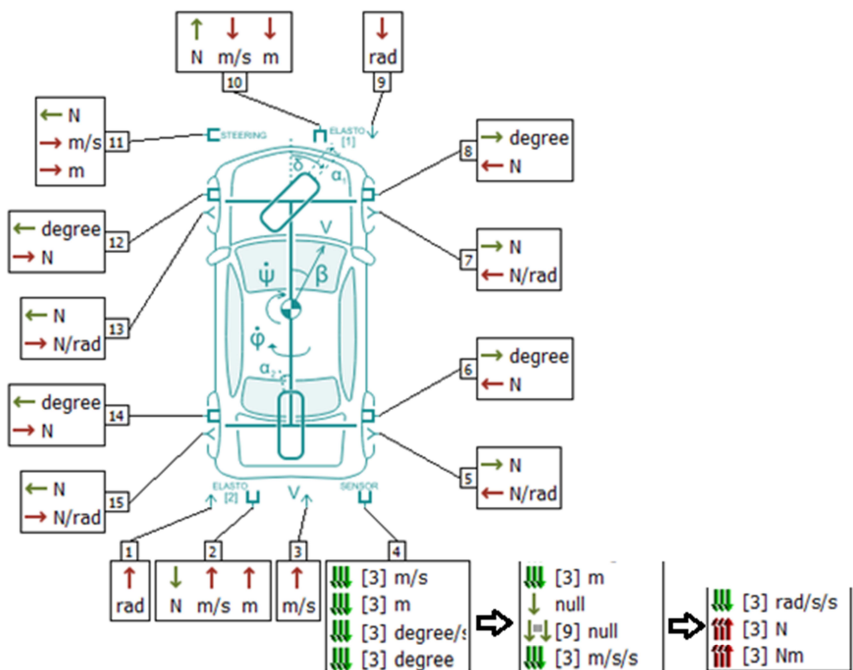


Рис. 68. Внешние переменные модели шасси

Таблица 8

Описание переменных модуля шасси *VDCAR3DOF2*

№ п/п	Наименование
Порты 1, 9	
1	Угол схождения вследствие упругокинематического эффекта оси (Toe angle due to elastokinematic effect – ... axle)
Порты 2, 10	
1	Боковая сила на оси (Lateral force on ... axle)
2	Боковая скорость оси (Axle lateral velocity (elastokinematics) – ... axle)
3	Боковое смещение оси (Axle lateral displacement (elastokinematics) – ... axle)
Порт 3	
1	Абсолютная скорость корпуса шасси (Carbody absolute velocity)

№ п/п	Наименование
Порт 4	
1	Абсолютная скорость центра масс – базовая СК (Absolute velocity of center of gravity – Ground frame)
2	Абсолютное положение центра масс – базовая СК (Absolute position of center of gravity - Ground frame)
3	Угловая скорость кузова (R_1 относительно R_0) – выражается в СК кузова (R_1) Carbody rotary velocity (R_1 vs R_0) – expressed in carbody frame (R_1)
4	Углы Эйлера кузова (движение СК R_1 относительно СК R_0): 0 = Крен; 1 = Тангаж; 2 = Рыскание (Carbody Euler angle (motion R_1 vs Galilean frame R_0) – 0 = Roll – 1 = Pitch – 2 = Yaw)
5	Начало СК кузова (OgridG – carbody frame)
6	INDEX, значение по умолчанию 1 (Carbody index)
7	Матрица изменения СК (R_1/R_0) = $R_0 \rightarrow R_1$ (Frame change matrix (R_1/R_0))
8	Абсолютное ускорение центра масс G – базовая СК (Absolute acceleration of center of gravity G – Ground frame – A(G) $R_1/R_0 R_0$)
9	Абсолютное угловое ускорение (R_1 относительно R_0) (Absolute angular acceleration (R_1 vs R_0) – Carbody frame (R_1) – $d\Omega_{R_1/R_0 R_1}$)
10	Сила, приложенная в центре масс – базовая СК (Force applied at center of gravity – Ground frame)
11	Момент, приложенный в центре масс – базовая СК (Torque applied at center of gravity – ground frame)
Порты 5, 7, 13, 15	
1	Вертикальная нагрузка на колесо (Vertical load – ... wheel)
2	Жесткость развала шины колеса (Tire camber stiffness – ... wheel)
Порты 6, 8	
1	Угол скольжения шины колеса (Tire slip angle – ... wheel)
2	Боковая сила на колесе (Tire lateral force – ... wheel)
Порт 11	
1	Сила на рулевой рейке (Force on the steering rack)
2	Скорость перемещения рулевой рейки (Steering rack velocity)
3	Перемещение рулевой рейки (Steering rack displacement)
Порты 12, 14	
1	Угол скольжения шины колеса (Tire slip angle wheel)
2	Боковая сила на шине колеса (Tire lateral force)

Входные параметры модели приведены в таблице 9.

Таблица 9

Входные параметры модели

№ п/п	Наименование	Имя переменной
1	Колесная база (Front/rear wheelbase)	a_1, a_2
2	Половина колеи оси (Front/rear half track)	b_1, b_2
3	Высота центра масс (Height of center of gravity (absolute))	hg
4	Высота центра крена (Height of roll center (absolute))	h_0
5	Высота центра крена оси (Height of front (rear) roll center (absolute))	h_1, h_2
6	Масса КМ (Mass of the vehicle)	M
7	Момент инерции рыскания (Yaw inertia), крена (Roll inertia)	I_{zz}, I_{xx}
8	Жесткость стабилизатора оси (Front (rear) anti-roll stiffness)	Kr_1, Kr_2
9	Коэффициент демпфирования крена (Roll damper rating)	$bphi$
10	Передачное отношение рулевого привода (Steer angle ratio ($\delta = u_{np} \cdot \gamma_n$))	$Demul$
11	Коэффициент схождения для соответствующей оси из-за крена (Toe coefficient induced by roll – ... axle)	$eps1, eps2$
18	Коэффициент развала для соответствующей оси из-за крена (Camber coefficient induced by roll – ... axle)	$lambda1, lambda2$
20	Смещение (кастор) переднего колеса (Front castor offset)	ch

2. Порядок выполнения работы

2.1. Создание эскиза модели

В данной работе будут использованы компоненты библиотеки *Vehicle Dynamics, 1D Mechanical* и *Signal, Control*.

1. В дереве библиотек выбираем *Vehicle Dynamics* → *Chassis* → *Chassis3dof_Modular* и перетаскиваем выбранный компонент в рабочее пространство (рис. 69).

2. Для подсоединения к порту 4 загружаем в эскиз блок *Vehicle Dynamics* → *Sources, Sensors, Nodes* → *Sources* → *zeroforcesorse3D* (рис. 69).

3. Добавляем в модель четыре колеса из библиотеки *Vehicle Dynamics* → *Tires and Road* → *tiremodel_lateral* (рис. 69).

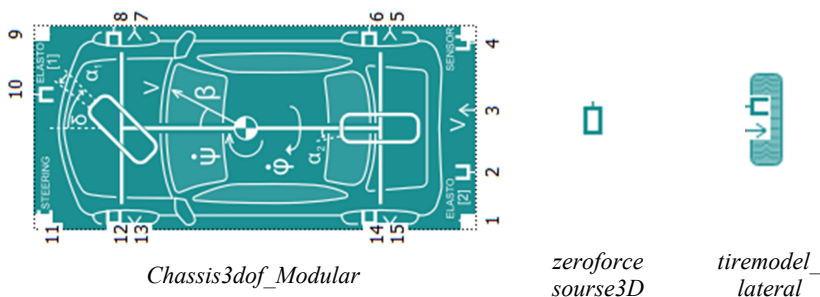


Рис. 69. Блоки модели из библиотеки *Vehicle Dynamics*

4. Далее в дереве библиотек выбираем блок реечной передачи *1D Mechanical* → *Translation* → *Transformers* → *rack2* (рис. 70).

5. Помещаем в рабочее поле блок преобразования сигнала во вращательное перемещение и скорость с использованием запаздывания первого порядка *1D Mechanical* → *Rotation* → *Sources, Sensors, Nodes* → *thetacn2* (рис. 70).

6. Далее помещаем в эскиз датчик усилия со смещением и коэффициентом усиления (смещение в портах) *1D Mechanical* → *Translation* → *Sources, Sensors, Nodes* → *forcesensor2* (рис. 70).

7. Помещаем в эскиз два источника нулевой скорости (скорость, смещение, ускорение), которые будут использованы при выборе режима «без учета эластостокинематики оси» для передней и задней осей *1D Mechanical* → *Translation* → *Sources, Sensors, Nodes* → *zerospeedsource* (рис. 70).



Рис. 70. Блоки модели из библиотеки *1D Mechanical*

8. Далее из раздела *Signal, Control* → *Sources, Sinks* помещаем в модель два элемента *piecwiselinear*, которые впоследствии будут

использоваться для задания значений угла поворота рулевого колеса и скорости движения КМ (рис. 71).

9. Аналогично из раздела *Signal, Control* → *Sources, Sinks* помещаем в модель один элемент *signalsink* и два элемента *constant*, и из раздела *Signal, Control* → *Match* один блок *gain* (рис. 71).

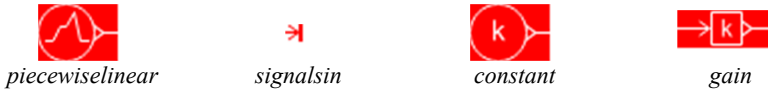


Рис. 71. Блоки модели из библиотеки *Signal, Control*

После задания связей получаем схему модели (рис. 72).

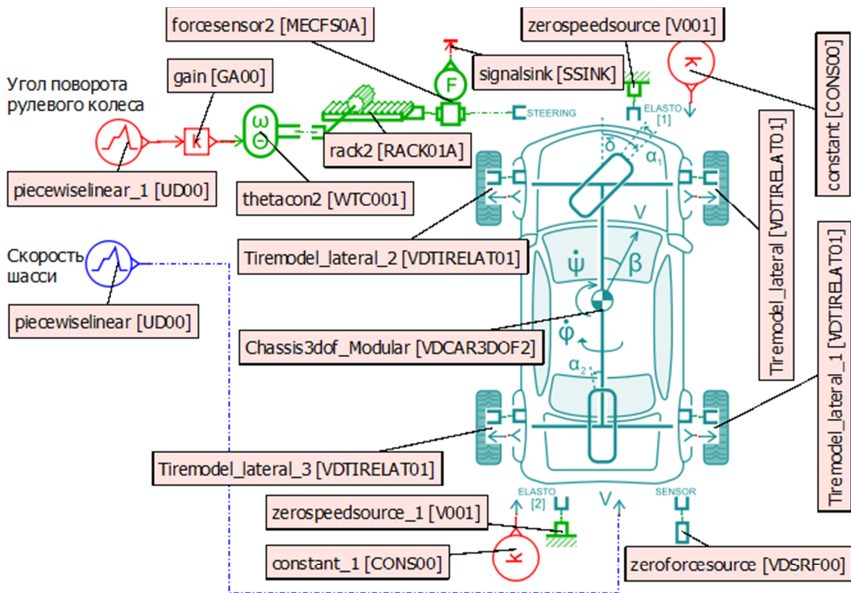


Рис. 72. Эскиз модели шасси

2.2. Определение субмоделей компонентов

Для всех компонентов в данном примере назначим субмодели по умолчанию, выбрав *Premier submodel*.

2.3. Задание параметров компонентов

2.3.1. Задание параметров шасси для модели VDCAR3DOF2

В зависимости от выбранного уровня моделирования кинематики оси (*axle kinematics effects*) изменяется содержание раздела *Axle characteristics*.

1. Простейший случай – неучет кинематики оси (*axle kinematics effects = no*).

Необходимо задать:

- 1) жесткость системы стабилизации передней и задней осей и номинальную величину системы демпфирования кузова КМ;
- 2) передаточное отношение рулевого привода: $\delta = \text{coeff} \cdot y_n$;
- 3) смещение (кастор) переднего колеса (*используется при расчете усилия на рулевую рейку*).

2. Выбор линейной кинематики оси (*axle kinematics effects = linear*) приводит к необходимости дополнительного задания коэффициентов схождения и развала, вызванных креном, соответственно ϵ_1, ϵ_2 и λ_1, λ_2 .

3. В случае выбора кинематики оси из таблицы данных 1D (*axle kinematics effects =from table(1D)*) дополнительно задаются:

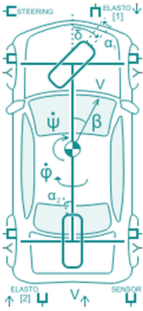
- 1) режим экстраполяции данных из файла: линейная или кубическая экстраполяция;
- 2) имена файлов с таблицами углов поворота колеса как функций перемещения рулевой рейки: $\delta_{11} = f(y_n)$ – переднее левое колесо; $\delta_{12} = f(y_n)$ – переднее правое колесо. Данные в файлах 1D таблиц должны храниться в определенном порядке (см. документацию Amesim).

4. В случае выбора кинематики оси из таблицы 3D-данных (*axle kinematics effects =from table(3D)*) дополнительно задаются:

– имена файлов с таблицами угла поворота колеса как функция поворота рулевого колеса, перемещения рулевой рейки и хода подвески для колес передней и задней осей: $\delta_{11} = f(z, y_n, z_{opp})$ – переднее левое колесо; $\delta_{12} = f(z, y_n, z_{opp})$ – переднее правое колесо; $\delta_{21} = f(z, z_{opp})$ – заднее левое колесо; $\delta_{22} = f(z, z_{opp})$ – заднее правое колесо.

Данные в файлах 3D-таблиц должны храниться в определенном порядке (см. документацию Amesim).

Для рассматриваемого примера задаем для шасси параметры (рис. 73).



The diagram shows a top-down view of a vehicle chassis with various parameters labeled: STEERING, ELASTO [1], ELASTO [2], SENSOR, and V. It also includes angles α , β , ψ , and ϕ .

Title	Value	Unit	Tags
axle kinematics effects			
Explicit state initial value			no
Masses and inertias			
mass of the vehicle		1000 kg	
yaw inertia		800 kgm**2	
roll inertia		600 kgm**2	
Geometry			
roll center definition	definition above center of gravity		
height of center of gravity (absolute)		0.5 m	
height of roll center (absolute)		0.035 m	
front wheelbase		1 m	
rear wheelbase		1.5 m	
front half track		0.7 m	
rear half track		0.7 m	
Axle characteristics			
front anti-roll stiffness		52000 N*/m/rad	
rear anti-roll stiffness		52000 N*/m/rad	
roll damper rating		1000 ...m/rad/s	
steer angle ratio (delta = ratio.Yn)		7 rad/m	
front castor offset		0.03 m	

Рис. 73. Параметры модели шасси

Начальные значения переменных состояния КМ *Explicit state initial value* устанавливаем равными нулю.

2.3.2. Задание параметров шин

Для шин (*VDTIRELAT01*) задаем параметры (рис. 74):

Передние шины			Задние шины		
Title	Value	Unit	Title	Value	Unit
cornering stiffness	65000	N/rad	cornering stiffness	55000	N/rad
camber stiffness	1750	N/rad	camber stiffness	1750	N/rad

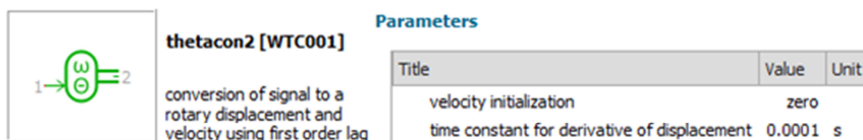
Рис. 74. Параметры шин

2.3.3. Задание входных параметров прочих компонентов модели

Для блока задания угла поворота рулевого колеса *piecwiselinear_1* и блока задания скорости *piecwiselinear* характеристики задаем согласно лабораторной работе № 4.

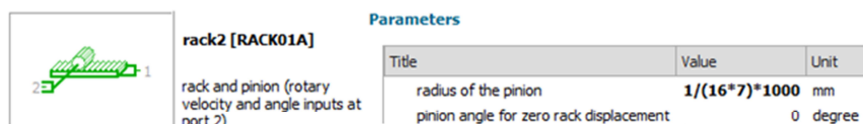
Для блока усиления *gain* задаем значение, равное -1 .

Параметры блоков *thetecon2* и *rack2* задаем согласно рисункам 75, 76.



Title	Value	Unit
velocity initialization	zero	
time constant for derivative of displacement	0.0001	s

Рис. 75. Параметры блока *thetecon2*



Title	Value	Unit
radius of the pinion	$1/(16*7)*1000$	mm
pinion angle for zero rack displacement	0	degree

Рис. 76. Параметры блока *rack2*

Для блоков **constant** задаем значения, равные 0.

2.4. Моделирование и постобработка результатов

После выполнения расчетов выводим полученные характеристики движения КМ по криволинейной траектории аналогично лабораторной работе № 4.

3. Дополнительные возможности модульной модели шасси

3.1. Учет эластокинематики

В рассмотренном примере не учитывалась эластокинематика осей КМ, т. е. с портами 2 и 10 связаны блоки **constant**, с параметром, равным 0.

Модульная модель шасси позволяет сформировать различные варианты исполнения транспортного средства, создаваемые путем подключения компонентов транспортного средства к модулю шасси.

1. Схождение только под действием боковых сил (рис. 77). С точки зрения неявной формулировки эластокинматики, угол схождения, обусловленный упругими свойствами осей, рассчитывается с учетом боковой силы и податливости C оси. Для этого необходимо дополнить модель, соединив механические порты (10 – передняя ось и 2 – задняя ось) с сигнальными портами (9 – передняя ось и 1 – задняя ось). Соединение может состоять из датчика усилия, значение которого, опять же, зависит от податливости оси.

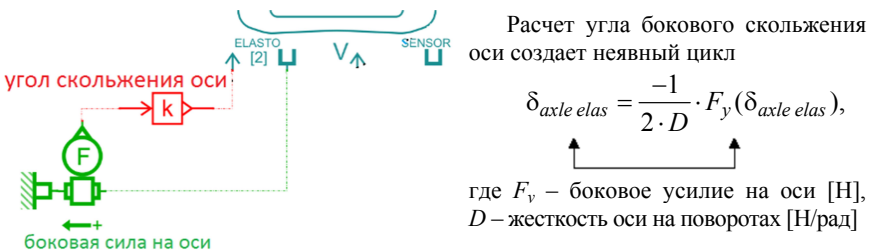


Рис. 77. Неявная формулировка задачи эластокинматики

2. Другим основным эффектом, учитываемым в подмодели VDCAR3DOF2, является боковая деформация оси (рис. 78). Может быть принята во внимание скорость поперечной деформации оси (под действием боковых сил). Эти скорости, V_{y1} и V_{y2} (передняя и задняя оси), влияют на расчет проскальзывания шин.

При моделировании боковой деформации оси используются также механические порты (10 – передняя ось и 2 – задняя ось).



Рис. 78. Задание боковой деформации оси

Эта модель не учитывает эффект схождения, а только боковую деформацию, определяемую поперечной податливостью C_y и массой оси m_y .

3. Объединение эффектов угла схождения под действием боковых сил и боковой деформации оси (рис. 79).

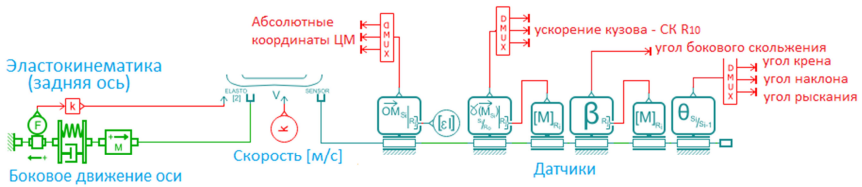


Рис. 79. Комплексная модель эластокинематики

3.2. Моделирование системы рулевого управления

VDCAR3DOF2 дает возможность смоделировать комплексную систему рулевого управления (варианты см. на рис. 80).

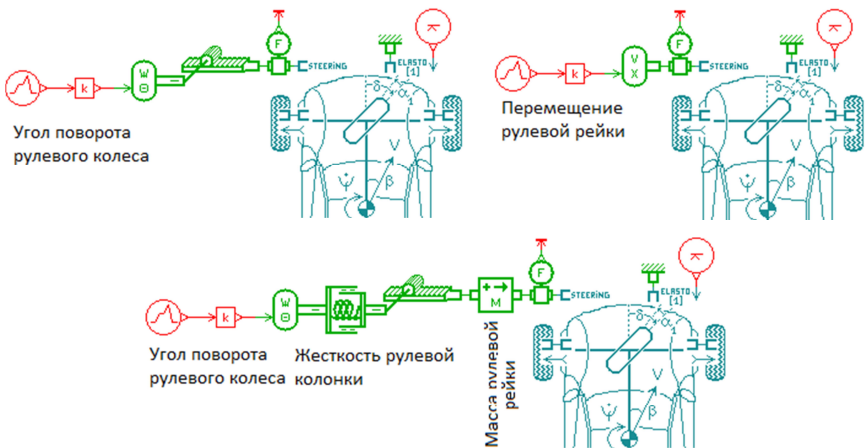


Рис. 80. Варианты моделирования рулевого управления

Задание

1. Составить 3D-модель движения двухосной машины на повороте в AMESim в соответствии с вариантом задания.
2. Выбрать соответствующие субмодели компонентов.
3. Задать параметры колесной машины согласно таблицам 7, 10.

4. Закон управления (поворот рулевого колеса) задать аналогично примеру, а параметр рулевого привода *radius of the pinion* принять равным $1 / (u_{np} \cdot Demul) \cdot 1000$, мм.

Коэффициент усиления блока *gain* принять равным -1 , учитывая, что реечная передача реверсирует направление движения.

Параметры шин выбираем аналогичные примеру.

5. По результатам моделирования построить зависимости бокового ускорения, угла дрейфа, угла рыскания кузова КМ и изменение положения центра масс КМ при движении на повороте.

6. Сравнить полученные зависимости с результатами лабораторной работы № 4.

7. Оформить отчет, содержащий расчетную модель и графики зависимостей согласно пунктам 4, 5.

Варианты заданий массо-геометрических характеристик шасси
и упругокинематических параметров его осей

№ вар.	b_1 , м	b_2 , м	h_g , м	h_0 , м	$I_{x_{гв}}$, кг·м ²	$bphi$, м/(рад·с)	$Demul$	Kr_1 , Н·м/рад	Kr_2 , Н·м/рад	ch , м
1	0,71	0,71	0,51	0,035	600	1000	7,0	52 000	52 000	0,03
2	0,71	0,81	0,55	0,04	630	950	6,8	55 000	50 000	0,028
3	0,81	0,72	0,61	0,045	650	900	6,7	53 000	49 000	0,031
4	0,75	0,75	0,62	0,045	650	1100	7,2	55 000	53 000	0,040
5	0,75	0,80	0,55	0,041	620	950	7,1	53 000	55 000	0,035
6	0,82	0,75	0,53	0,035	590	1200	6,9	60 000	65 000	0,033
7	0,72	0,70	0,62	0,045	600	1000	7,0	52 000	49 000	0,040
8	0,71	0,72	0,55	0,042	630	950	6,8	55 000	53 000	0,035
9	0,72	0,72	0,52	0,042	650	900	6,7	53 000	55 000	0,033
10	0,75	0,82	0,053	0,051	600	1000	7,1	62 000	52 000	0,030
11	0,82	0,75	0,64	0,028	630	950	6,9	70 000	50 000	0,028
12	0,72	0,70	0,55	0,033	650	900	7,1	55 000	49 000	0,031
13	0,71	0,72	0,61	0,015	650	1100	6,8	52 000	62 000	0,032
14	0,72	0,80	0,55	0,041	620	950	6,7	50 000	70 000	0,04
15	0,83	0,73	0,52	0,035	590	1200	7,2	49 000	55 000	0,035

Лабораторная работа № 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Цель работы: получение навыков построения математических моделей простейших гидравлических систем и реализации их на ЭВМ с помощью пакета Simcenter AMESim.

1. Общие сведения

В качестве объекта моделирования рассматривается гидравлическая система с питанием от насоса 1 постоянной производительности, имеющего предохранительный клапан 3. Исполнительным элементом, перемещающим груз 6 массой m , является гидроцилиндр 5, управляемый пропорциональным четырехлинейным трехпозиционным (4/3) распределителем 4 (рис. 81). Гидронасос приводится от двигателя 2. В соединительных трубопроводах установлены дроссели 7. В качестве реальной системы может быть принята навесная система трактора.

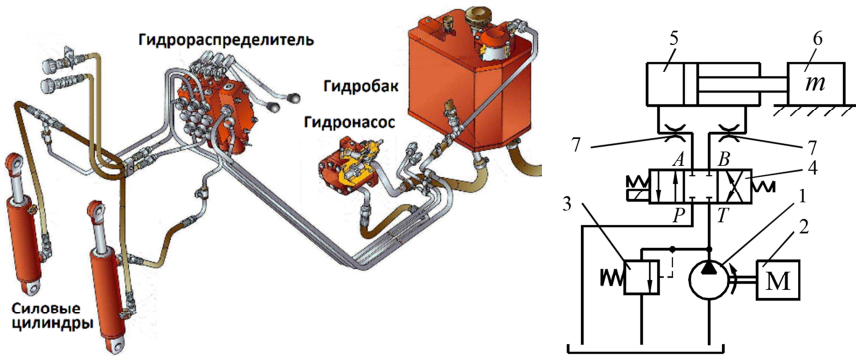


Рис. 81. Принципиальная схема гидропривода линейного перемещения

Целью является моделирование работы гидравлической системы при заданном законе управляющего воздействия на гидрораспределитель и построение соответствующих графических зависимостей.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Создание эскиза модели

В данной работе будут использоваться компоненты библиотеки *Mechanical, Hydraulic* и *Signal, Control*.

1. Переносим на рабочее поле гидравлический цилиндр двустороннего действия с односторонним штоком (*hydraulic actuator with single shaft and double flow ports*), выбрав **Hydraulic** → **Linear Actuators** → **actuator001**. У модели гидроцилиндра имеется три порта: два порта гидравлических и третий порт механический.

2. Переносим на рабочее поле элемент, имитирующий массу, учитывающую вязкое трение в подвижных частях и идеальные упоры (*linear mass with 2 ports and endstops*), выбрав **1D Mechanical** → **Masses** → **mass_friction_endstops**.

3. Поскольку второй порт у элемента массы оказывается свободным, нам необходимо его «закрыть», приложив силу, равную **0**. Это осуществляется типовым элементом механической библиотеки **1D Mechanical** → **Sources, Sensors, Nodes** → **zeroforce**.

4. Переносим на рабочее поле модели дресселей **Hydraulic** → **Pressure Losses, Volumes, Nodes** → **flowcontrol01** из гидравлической библиотеки, оставляя места для соединительных линий, которые впоследствии будут преобразованы в трубопроводы.

5. Аналогичным образом перемещаем на рабочее поле из гидравлической библиотеки модели:

– 4/3 распределителя с закрытым центром **Hydraulic** → **Directional Control Valves** → **hsv-3pos4port_01** (РВ-АТ || 0 || РА-ВТ);

– автоматического гидравлического предохранительного клапана **Hydraulic** → **Pressure Control Valves** → **presscontrol01**;

– гидравлического насоса постоянной производительности **Hydraulic** → **Pumps, Motors** → **pump01**;

– гидравлических разветвителей, имеющих 3 и 4 порта для подключения линий **Hydraulic** → **Pressure Losses, Volumes, Nodes** → **hydrnode3 (hydrnode4)**;

– источника нулевого давления (бак) **Hydraulic** → **Fluid, Source, Sensors** → **tank01**;

– элемента определения свойств жидкости (капля) *fluid properties* (поз. 7, рис. 82).

6. Из механической библиотеки переносим модель двигателя постоянной частоты вращения *1D Mechanical* → *Rotation* → *Sources, Sensors, Nodes* → *pmover01*.

7. Из библиотеки сигналов и систем управления *Signal, Control* переносим источник кусочно-линейного сигнала *piecewise linear signal source* (поз. 8, рис. 82).

8. Проводим соединительные гидравлические линии, которые впоследствии образуют соединительные трубопроводы.

Позиции на рисунке 82 соответствуют элементам рисунка 81.

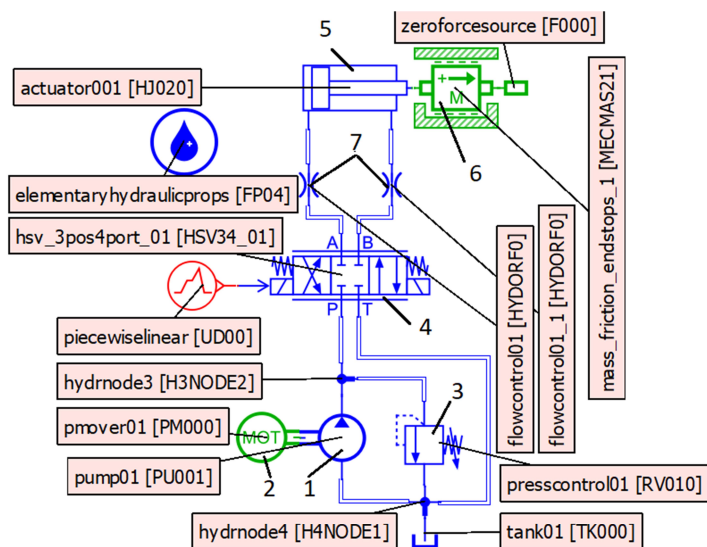


Рис. 82. Расчетная модель гидропривода

2.2. Определение подмоделей элементов

В гидравлических и пневматических системах определение моделей начинается с компонентов гидро- и пневмосистем, а в последнюю очередь определяются модели трубопроводов.

В данном примере воспользуемся простейшими субмоделями, нажав кнопку *Premier Submodel* (рис. 8).

Для трубопроводов зададим модели вручную. Выбираем модели с сосредоточенными параметрами – модель *hydraulic pipe-basic (C-R)* (или в зависимости от граничных условий *C-R-C*), учитывающие сжимаемость жидкости, податливость стенок и гидравлические потери по длине (рис. 83).

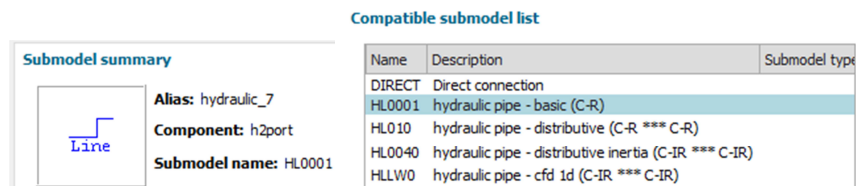


Рис. 83. Выбор субмоделей трубопроводов


2.3. Определение параметров элементов системы и начальных условий

Выбираем закладку *PARAMETER* и для компонентов расчетной схемы гидравлической системы в качестве исходных данных задаем:

- диаметр поршня гидроцилиндра $d_{\text{п}} = 40$ мм;
- диаметр штока гидроцилиндра $d_{\text{шт}} = 16$ мм;
- ход штока $S_{\text{шт}} = 200$ мм;
- масса нагрузки $m_{\text{н}} = 20$ кг;
- коэффициент вязкого трения нагрузки $k_{\text{тр}} = 100$ Н/(м·с);
- ход нагрузки от $S_{\text{н}} = -1$ м до 1 м;
- диаметры трубопроводов $d_{\text{тр}} = 8$ мм;
- длины каждого участка трубопроводов $l_{\text{тр}} = 0,2$ м;
- диаметры дросселей $d_{\text{д}} = 4$ мм;
- расходная характеристика распределителя: в линиях $P \rightarrow A$, $P \rightarrow B$, $B \rightarrow T$, $A \rightarrow T$ перепад давления составляет $\Delta p = 2$ атм. при расходе $Q_{\text{р}} = 1$ л/мин;
- рабочий объем насоса $V_{\text{н}} = 100$ см³/об.;
- частота вращения вала двигателя $\omega_{\text{дв}} = 1500$ об./мин;
- давление настройки предохранительного клапана $p_{\text{max}} = 150$ атм;
- градиент расхода предохранительного клапана $dQ_{\text{кл}} = 500$ л/мин/атм.

Определение параметров элемента массы осуществляется двойным кликом левой кнопкой мыши на элемент (рис. 84).

Submodel



mass_friction_endstops_1
[MECMAS21]
1D translation mass

Parameters

Title	Value	Unit
⊕ velocity at port 1	0	m/s
⊕ displacement at port 1	0	m
use friction	yes	
endstop type	ideal	
mass	20	kg
inclination (+90 port 1 lowest, -90 port 1 h...	0	degree

friction
 friction type: simple
 stiction force: 0 N
 Coulomb friction force: 0 N
 coefficient of viscous friction: **100** N/(m/s)
 coefficient of windage: 0 N/(m/s)**2

endstops
 higher displacement limit: 1 m
 lower displacement limit: -1 m

Рис. 84. Задание параметров элемента массы

Определение параметров всех остальных элементов осуществляется согласно исходным данным.

Закон изменения сигнала управления приведен на рисунке 85.

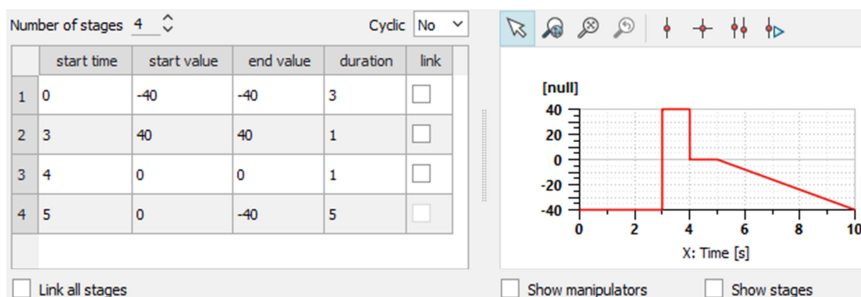


Рис. 85. Задание параметров сигнала управления

2.4. Выполнение расчета характеристик системы

Задаем шаг вывода результатов $Print\ interval = 0,01$ с, время окончания расчета $Final\ time = 10$ с.

Запускаем расчет, выбрав в панели инструментов **Run simulation**.

3. Просмотр результатов расчета

Ниже приведены некоторые из расчетных характеристик (рис. 86, 87).

Чтобы построить несколько кривых в различных осях на одном графике (например, перемещение поршня и сигнал управления), до-

бавим последний на ранее построенный график (рис. 86), а затем кликнем правой кнопкой мыши на вертикальную ось значений и выберем пункт контекстного меню *Separate*. Результат – на рисунке 87.

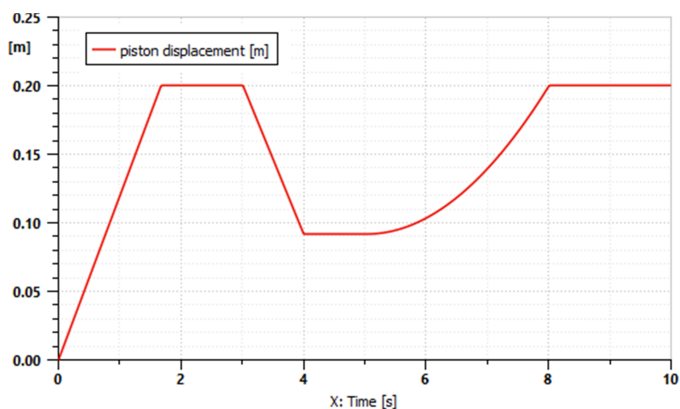


Рис. 86. График перемещения поршня гидроцилиндра

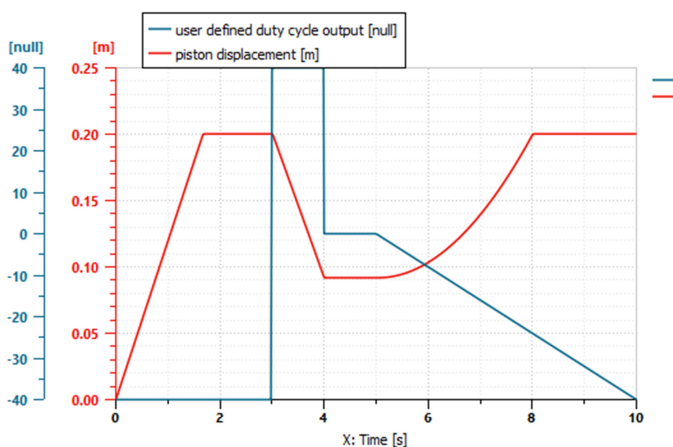


Рис. 87. Разделенные графики двух переменных

Из графика видно, что отрицательный сигнал управления соответствует положительному открытию распределителя, при котором происходит выдвигание штока цилиндра. Положительный сигнал управления соответствует отрицательному открытию распределителя, при котором происходит втягивание штока цилиндра.

Аналогичным образом производится анализ характеристик всей остальной части системы в режиме переходных характеристик.

Задание

1. Составить модель гидравлического привода согласно рассмотренному примеру или в соответствии со схемой, заданной преподавателем с помощью компонентов AMEsim.

2. Выбрать соответствующие субмодели компонентов.

3. Задать параметры гидравлической системы согласно таблицам 7, 11.

4. Закон управления гидравлическим распределителем задать аналогично примеру или в соответствии с заданием преподавателя.

5. По результатам моделирования построить зависимость перемещения груза, совмещенное с управляющим сигналом.

Построить зависимости изменения давления на портах гидроцилиндра, совмещенные с управляющим сигналом.

6. Оформить отчет, содержащий расчетную модель и графики зависимостей, согласно пунктам 4, 5.

Таблица 11

Варианты задания параметров гидросистемы

№ вар.	d_n , мм	$d_{шт}$, мм	$S_{шт}$, мм	m_n , кг	$k_{тр}$, Н/(м·с)	$d_{тр}$, мм	$l_{тр}$, м	d_y , мм	V_n , см ³ /об	$\omega_{дв}$, об/мин
1	50	16	220	40	90	8	0,35	4,0	95	1250
2	55	18	180	25	120	6	0,3	3,0	80	1200
3	45	20	210	30	150	5	0,5	2,5	120	1300
4	40	14	240	35	80	7	0,6	3,5	90	1400
5	35	15	205	25	200	5	0,45	3,0	100	1200
6	40	17	200	35	100	7	0,3	4,0	85	1000
7	35	15	190	30	140	6	0,4	3,5	95	1350
8	45	20	220	30	110	7	0,6	3,5	90	1400
9	45	20	210	30	150	5	0,4	3,5	95	1350
10	50	16	220	40	90	7	0,6	3,5	90	1400
11	55	18	180	25	120	5	0,5	2,5	120	1300
12	45	20	220	30	150	6	0,3	3	80	1200
13	40	14	240	35	80	8	0,35	4	95	1250
14	35	15	205	25	200	7	0,3	4,0	85	1000
15	40	17	200	35	100	5	0,45	3,0	100	1200

Литература

1. Проектирование полноприводных колесных машин: учебник для вузов : в 3 т. / Б. А. Афанасьев [и др.]; под ред. А. А. Полунгяна. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, – 2008. – Т. 2. – 528 с.
2. Шарипов, В. М. Конструирование и расчет тракторов : учебник для студентов вузов / В. М. Шарипов. – М. : Машиностроение, 2009. – 752 с.
3. ISO 8855:2011 - Road vehicles -- Vehicle dynamics and road-holding ability – Vocabulary. English language. – ISO. – 2011. – 42 p.
4. Thomas D. Gillespie. Fundamentals of Vehicle Dynamics Published by: Society of Automotive Engineers, Inc. 400 Commonwealth Drive Warrendale, PA 15096-0001. – Режим доступа: <http://dmilvdy.narod.ru/Translate/FVD/index.html>.
5. Динамика автомобиля, First Edition / Martin Meywerk. 2015. – John Wiley & Sons, Ltd. Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd. Companion Website: www.wiley.com/go/meywerk/vehicle.
6. Лата, В. Н. Основы моделирования управляемого движения автомобиля : учебное пособие / В. Н. Лата. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2012. – 67 с. : обл.

Учебное издание

ПОВАРЕХО Александр Сергеевич

**САПР МАШИН.
ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ
В СРЕДЕ SIMCENTER AMESIM**

Учебно-методическое пособие

для студентов специальностей

1-37 01 03 «Тракторостроение», 1-37 01 04 «Многоцелевые
гусеничные и колесные машины (по направлениям)»,
1-37 01 05 «Электрический и автономный транспорт»

Редактор *Е. О. Германович*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 15.02.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 4,36. Уч.-изд. л. 3,41. Тираж 100. Заказ 820.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.