

УДК 629.3.027.3

## Активная подвеска мобильного робота

*Антонов Ф. А., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Специальное машиностроение»*

*Научный руководитель: Рубцов В.И., к.т.н, доцент  
кафедра «Специальное машиностроение»,*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[kafsm7@sm.bmstu.ru](mailto:kafsm7@sm.bmstu.ru)*

### Проектирование системы управления активной подвеской

#### Общие сведения об активной подвеске

Подвески транспортных средств подразделяются в основном на два относительно самостоятельных и весьма обширных класса: пассивные и активные [5].

На рис. 1 представлена схема для простейшего транспортного средства для случая, когда характеристики упругого и демпфирующего элементов приведены к колесу, что позволяет условно не изображать направляющее устройство. Здесь поддрессоренное тело **1** с массой  $m$  опирается на упругий элемент **2** с постоянной или меняющейся жесткостью  $c$ , связанный с осью колеса **3**. Параллельно упругому элементу **2** установлен демпфирующий элемент, в частном случае, гидравлическим амортизатор **4** с коэффициентом сопротивления, равным  $b$ .

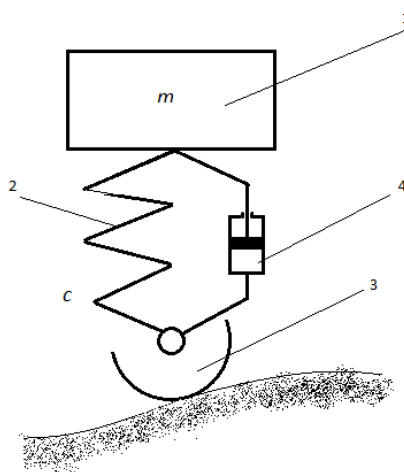


Рис. 1. Схема простейшей подвески

Пассивными подвесками называются подвески (с регулируемыми или нерегулируемыми характеристиками элементов), в которых не осуществляется компенсация отклонений от заданных значений величины текущих поверхностных сил, действующих на корпус транспортного средства.

Активными подвесками называются подвески (с регулируемыми или нерегулируемыми характеристиками элементов), в которых предусматривается комплекс технологических приемов для частичной или полной компенсации отклонений от заданных значений величины текущих вертикальных поверхностных сил, действующих через детали подвески на корпус движущегося по неровной дороге транспортного средства.

Так как активные подвески по сравнению с пассивными предназначены для радикального повышения плавности хода транспортных средств, то и принципиальные отличия следует искать в характере их влияния на основной измеритель плавности хода. Поэтому в данной статье было решено использовать систему активного поддрессоривания.

### **Моделирование активной подвески**

При отыскании структуры активной подвески можно сделать следующее допущение: для обеспечения высокой надежности поддрессоривания и высокой подвижности транспортного средства искомая система активной подвески должна быть способна работать в пассивном режиме, что существенным образом снизит максимальные значения мощности, отбираемой силовым приводом активной подвески.

Таким образом, задача синтеза активной подвески сводится к отысканию и построению дополнительных устройств, которыми оснащается пассивная подвеска с целью уменьшения вертикальных поверхностных сил, передаваемых на поддрессоренный корпус.

Если пренебречь массой гусениц, то структурная схема пассивной подвески в будет иметь следующий вид:

Структурная схема пассивной подвески[1]:

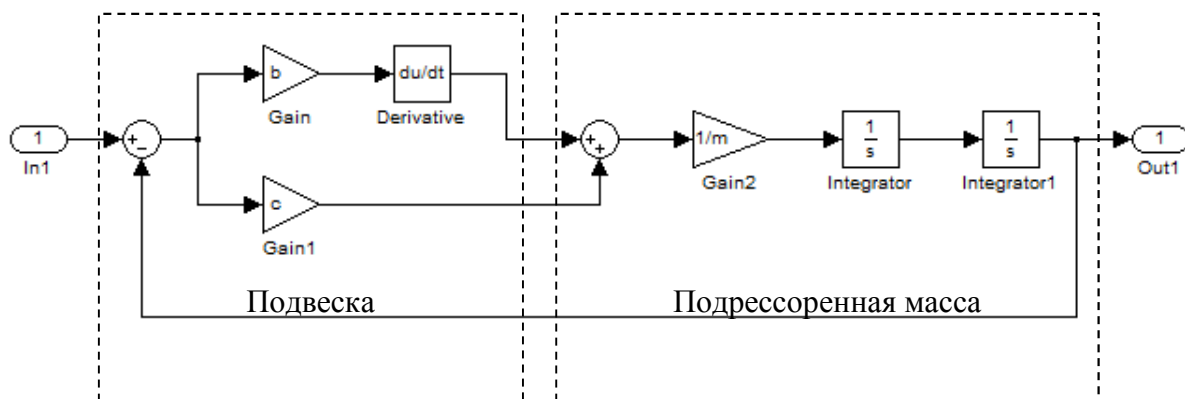


Рис. 2. Структурная схема пассивной подвески

Здесь упругий элемент подвески можно рассматривать как последовательно размещенные сумматор **1** и усилительное звено с коэффициентом усиления **c**, равным жесткости упругого элемента.

Демпфирующий элемент можно представить дифференцирующим звеном **bs**, где **b** – коэффициент сопротивления амортизатора; **s** – оператор дифференцирования.

Поддрессоренная масса изображается последовательно размещенными сумматором **2**, услителем  $\frac{1}{m}$  и двумя интегрирующими звеньями  $\frac{1}{s}$ .

Все звенья охвачены отрицательной обратной связью по перемещению[7].

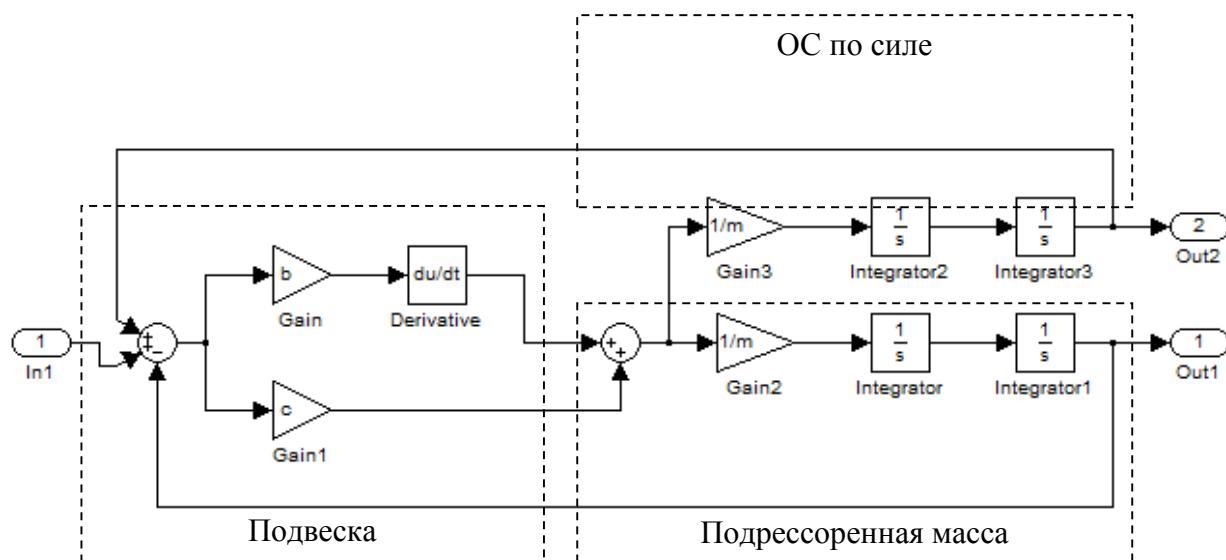


Рис. 3. Структурная схема пассивной подвески с обратными связями

Структурная схема, снабженная звеном обратной связи по силе:

При проектировании активной подвески необходимо учитывать условие инвариантности координаты подрессоренного корпуса транспортного средства от возмущения. Для этого необходимо включить в схему звено обратной связи по силе с передаточной функцией:

$$W_{oc1}^F = \frac{1}{ms^2}.$$

При этом достигается инвариантность координаты подрессоренной массы как от дорожного возмущения, так и от непосредственного силового возмущения, формируемого выходом сумматора 2.

Однако построить и включить в обратную связь звено с такой передаточной функцией в реальную механическую систему подрессорирования практически невозможно. Поэтому обратную связь следует представить в несколько другой форме.

Стоит обратить внимание на то, что по форме передаточная функция обратной связи по силе не отличается по абсолютной величине от общей передаточной функции звеньев, описывающих подрессоренную массу. Различие лишь в том, что на сумматор 2 их выходы подаются с разными знаками. Следовательно, выходные величины имеют противоположные знаки при одинаковых передаточных функциях[3].

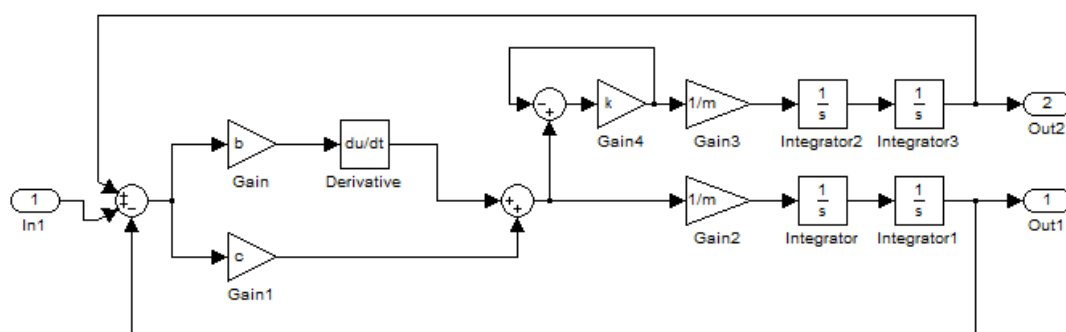


Рис. 4. Эквивалентная структурная схема

Здесь суммарное возмущение с выхода сумматора 2 воздействует на подрессоренную массу и одновременно на первичный измерительный преобразователь 3, измеряющий это возмущение. Далее он направляет сигнал, пропорциональный возмущению, в компенсирующее устройство с общим коэффициентом усиления  $K$ . Компенсирующее устройство, воздействуя в свою очередь на подрессоренную массу, вызовет уменьшение суммарной силы, действующей на нее. А это, следовательно, приведет к уменьшению входного сигнала в компенсирующее устройство. Значит компенсатор с общим коэффициентом усиления  $K$  охвачен обратной связью. При этом эквивалентный коэффициент усиления  $K$ , с учетом обратной связи будет равен:

$$K_9 = \frac{K}{K+1}.$$

С учетом введенного коэффициента  $K_9$  преобразуем схему к виду:

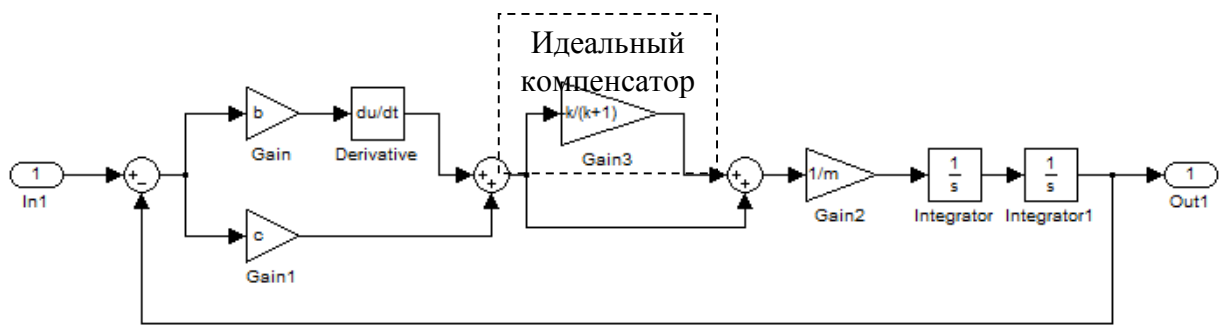


Рис. 5. Структурная схема подвески с идеальным компенсатором

В этом случае искусственно созданный второй канал воздействия на подрессоренную массу может обеспечить полную компенсацию возмущения лишь при коэффициенте усиления  $K$ , стремящемся к бесконечности. При конечном  $K$  полная компенсация возмущающего воздействия невозможна.

Таким образом, в рассматриваемой структурной схеме невозможна ни абсолютная, ни полная инвариантности. Но есть возможность реализовать инвариантность с точностью до малой величины  $\varepsilon$ .

В данной схеме второй канал воздействия назван идеальным компенсатором, потому что в нем не учитываются инерционных звеньев, в него входящих.

Но такое представление подрессоренной массы не совсем удобно для рассмотрения места компенсирующего устройства в структурной схеме подвески. Поэтому при помощи эквивалентных преобразований сведем к следующему виду:

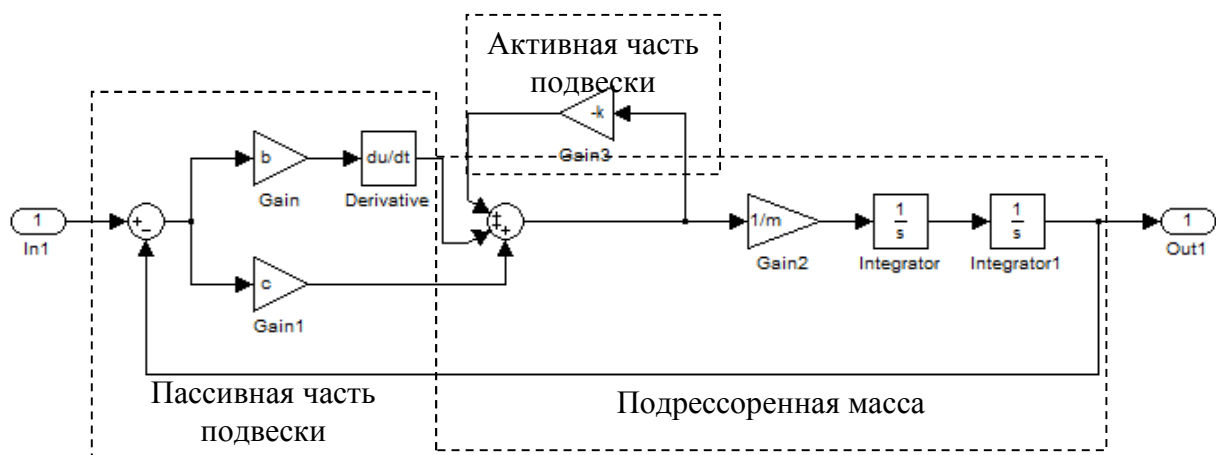


Рис. 6. Структурная схема подвески с активной частью

В данной схеме суммарное вертикальное возмущение с выхода сумматора 2 подводится к подрессоренной массе, одновременно это же возмущение поступает в активную часть подвески, которая представлена усилительным звеном с коэффициентом усиления  $K$ , включенным в отрицательную обратную связь по силе.

Таким образом, активная часть подвески с коэффициентом усиления  $K$  уменьшает суммарное воздействие на подрессоренную массу в  $(K+1)$  раз. При достаточно большом  $K$  возмущение, действующее на массу, становится весьма малым и, следовательно, весьма малыми будут ее колебания. Т.е. при большом  $K$  достигается инвариантность координаты от возмущающего воздействия с точностью до малой величины  $\varepsilon$ .

### Подбор коэффициента активной части подвески

На вход схемы, изображенной на рис. 6 подадим входное воздействие, моделируя движение робота по неровной дороге. Так же для этой подвески подберем все входящие в нее коэффициенты:

- коэффициент сопротивления амортизатора  $b = 300$ ;
- коэффициент упругости пружины  $c = 5700$ ;
- подрессоренная масса  $m = 90$  кг.

В итоге математическая модели подвески без и с активной частью выглядят следующим образом[2]:

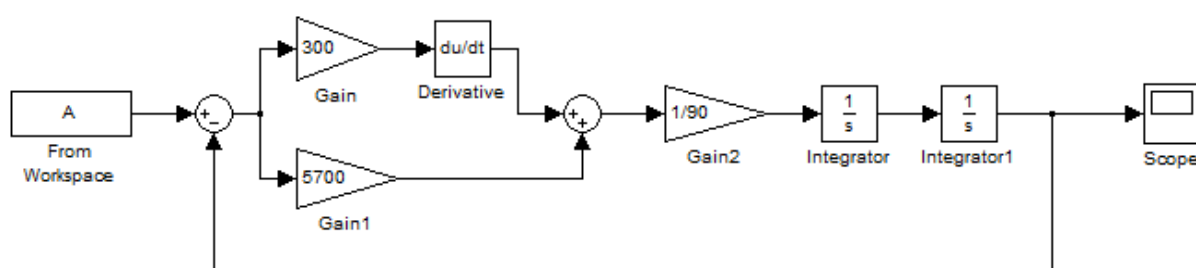


Рис. 7. Математическая модель подвески (без активной части)

Выходная характеристика имеет вид:

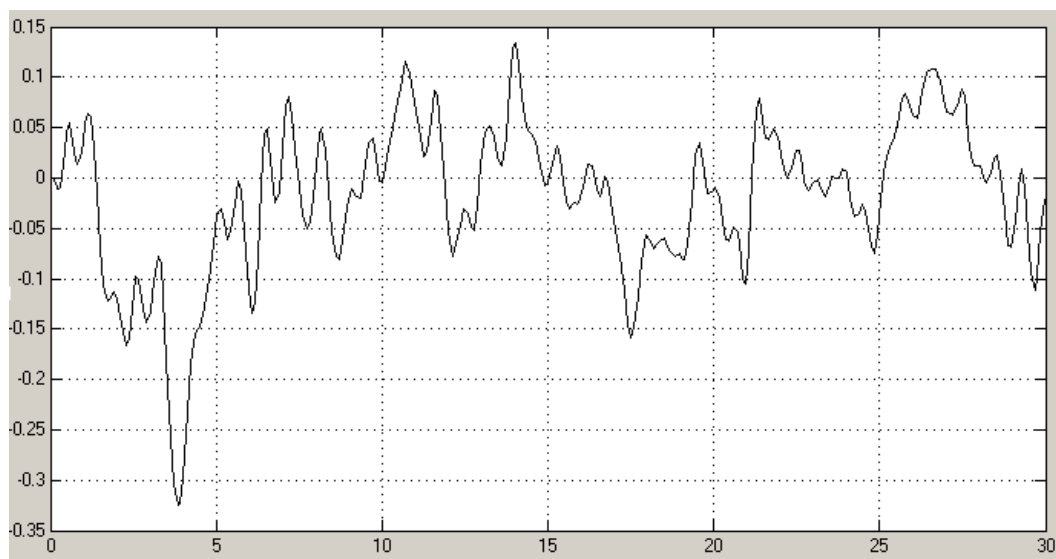


Рис. 8. Выходная характеристика подвески (без активной части)

Теперь нам надо подобрать коэффициент активной части подвески так, чтобы выходная характеристика сгладилась. Математическая модель подвески с активной частью при подстановке всех коэффициентов имеет вид:

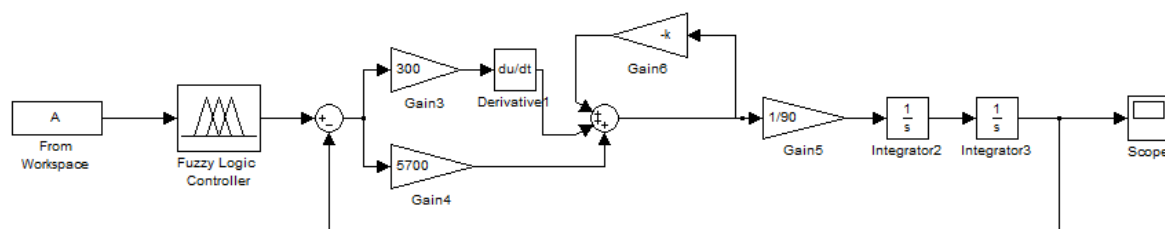


Рис. 9. Математическая модель подвески (с активной частью)

Выходная характеристика такой активной подвески будет выглядеть так:

– при  $k = 10$ :

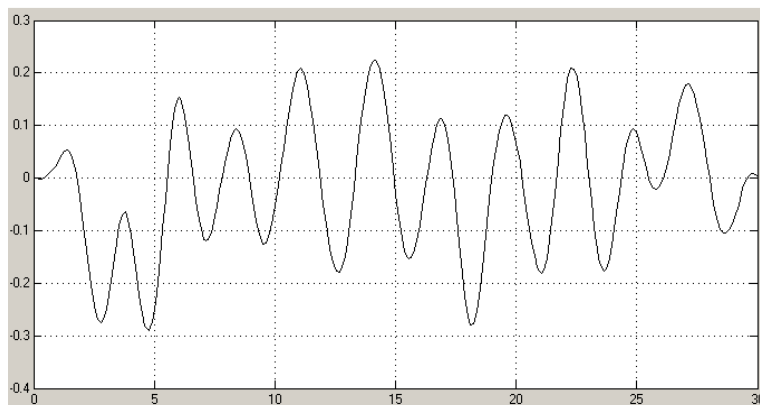


Рис. 10. Выходная характеристика активной подвески ( $k=10$ )

– при  $k = 100$ :

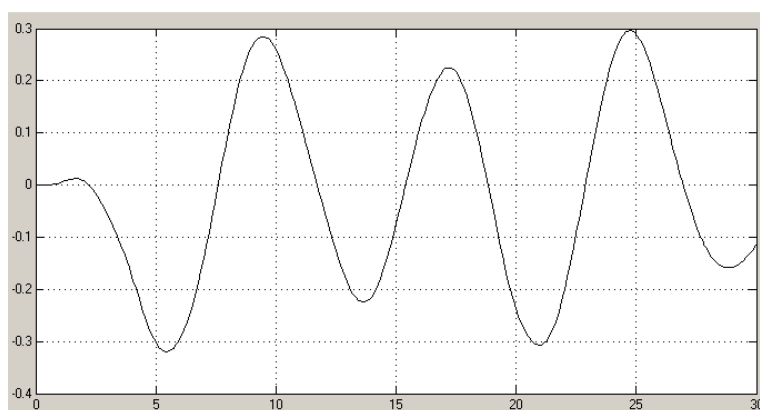


Рис. 11. Выходная характеристика активной подвески ( $k=100$ )

– при  $k = 1000$ :

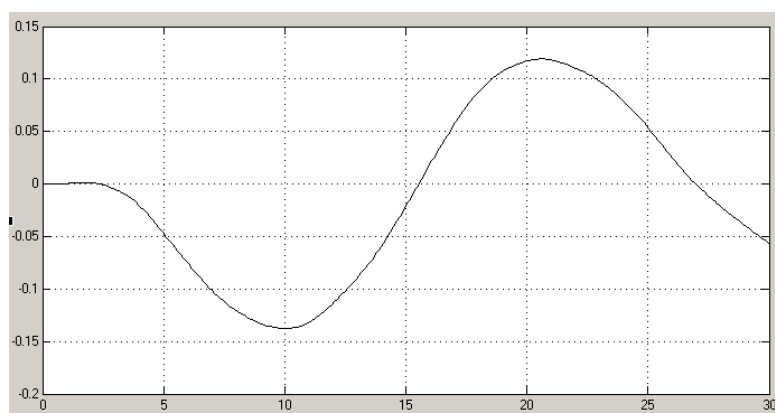


Рис. 12. Выходная характеристика активной подвески ( $k=1000$ )



Из рисунков видно, что при  $k = 1000$  амплитуда и частота колебаний значительно меньше, чем при  $k = 100$  и  $k = 100$ . Так же видно, что при  $k = 1000$  амплитуда колебаний равна  $0,23\text{м}$ , а период этих колебаний –  $27\text{с}$ , что выяснилось в ходе исследования.

Для наглядности изобразим выходные характеристики пассивной и активной подвесок на одном графике.

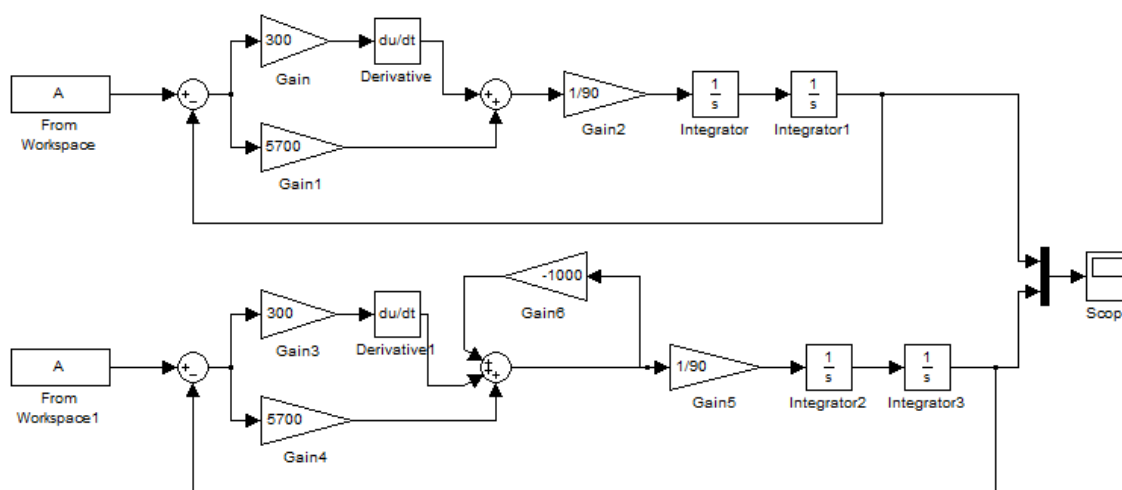


Рис. 13. Математические модели пассивной и активной подвесок

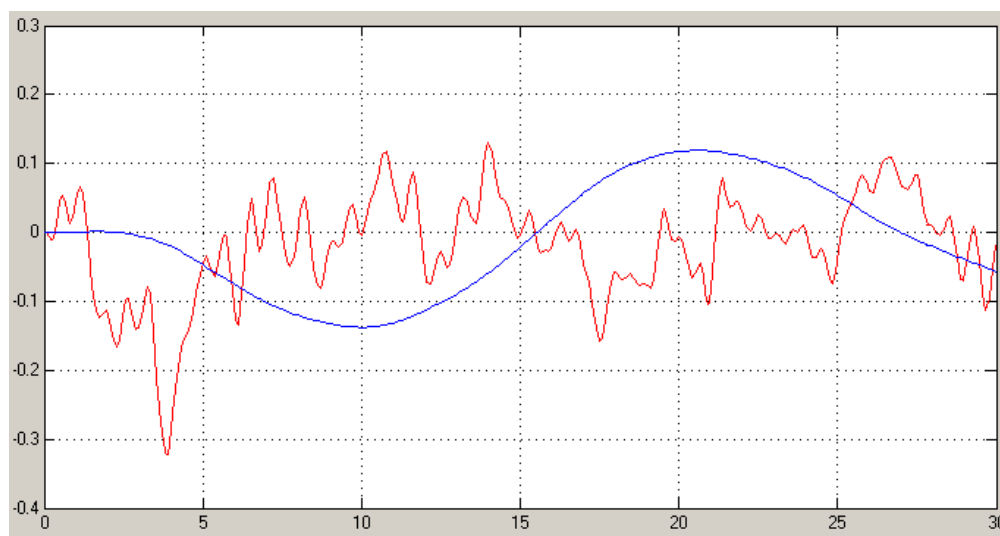


Рис. 14. Выходные характеристики пассивной (красный) и активной (синий) подвесок

Коэффициент активной части подвески подбираем так, чтобы выходная характеристика сгладилась ( $k=1000$ ).

Проведем моделирование движения мобильного робота по двум трассам:

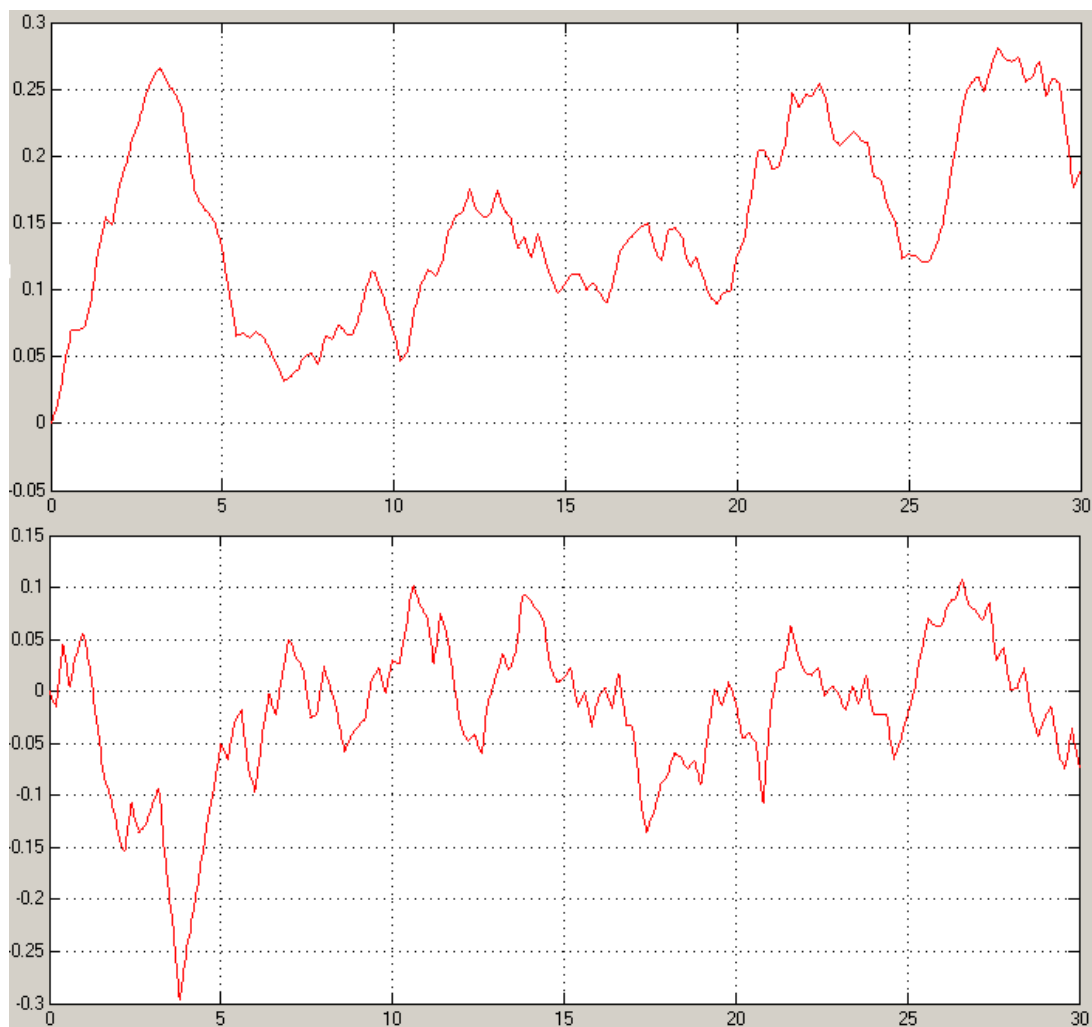


Рис. 15. Траектории моделирования движения мобильного робота  
(сверху – трасса 1, снизу – трасса 2)

## Управление активной подвеской мобильного робота при помощи нечеткой логики

### Определение логических переменных и их функций принадлежности

В данной статье решили использовать для управления активной подвеской нечёткую логику.

Было решено использовать 2 лингвистические переменные: скорость движения подвески *speed* и величина неровности трассы *nerov*, которая соответствует перемещению поддрессоренной массы робота.

Для снятия данных о неровности траектории движения используется дальномер, для данных по скорости – тахометр. Т.к. неровности на траектории движения робота могут быть как в виде ям, так и в виде бугров, то следует рассматривать их в положительном и отрицательном отклонениях от горизонта[4].

Введем следующие термы для этих переменных:

– *speed*:

- очень малая (veryLow)
- малая (Low);
- средняя (Medium);
- большая (High);
- большая (veryHigh).

– *nerov*:

- большая отрицательная (H-);
- средняя отрицательная (M-);
- малая отрицательная (L-);
- нулевая (Z);
- малая положительная (L+);
- средняя положительная (M+);
- большая положительная (H+).

Выходной лингвистической переменной будет перемещение подрессоренной массы робота *rodv*, для которой введем следующие термы:

- большая отрицательная (H-);
- средняя отрицательная (M-);
- малая отрицательная (L-);
- нулевая (Z);
- малая положительная (L+);
- средняя положительная (M+);
- большая положительная (H+).

Определение функций принадлежности – наиболее трудоемкий процесс, в наибольшей степени определяющий качество процесса управления системой. Так, для составления наиболее адекватной модели требуется не только знание характера поведения системы в целом, но и определенное число экспериментов, позволяющее определить недостатки нечеткой модели и устранить их, и, конечно, некоторый опыт построения таких систем[6].

Функции принадлежности для терм-множеств лингвистических переменных показаны на рис.16-18.

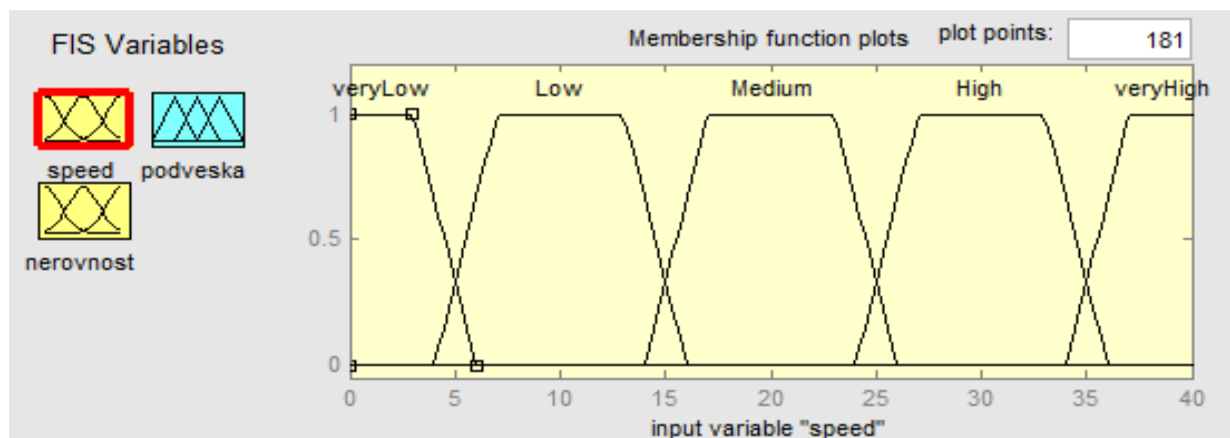


Рис. 16. Термы и функции принадлежности для входной лингвистической переменной *speed*

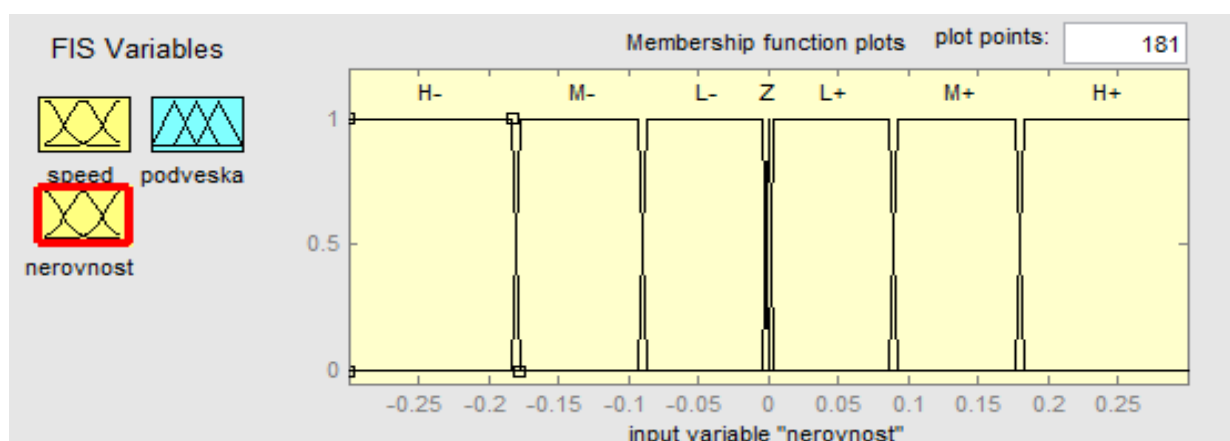


Рис. 17. Термы и функции принадлежности для входной лингвистической переменной *nerov*

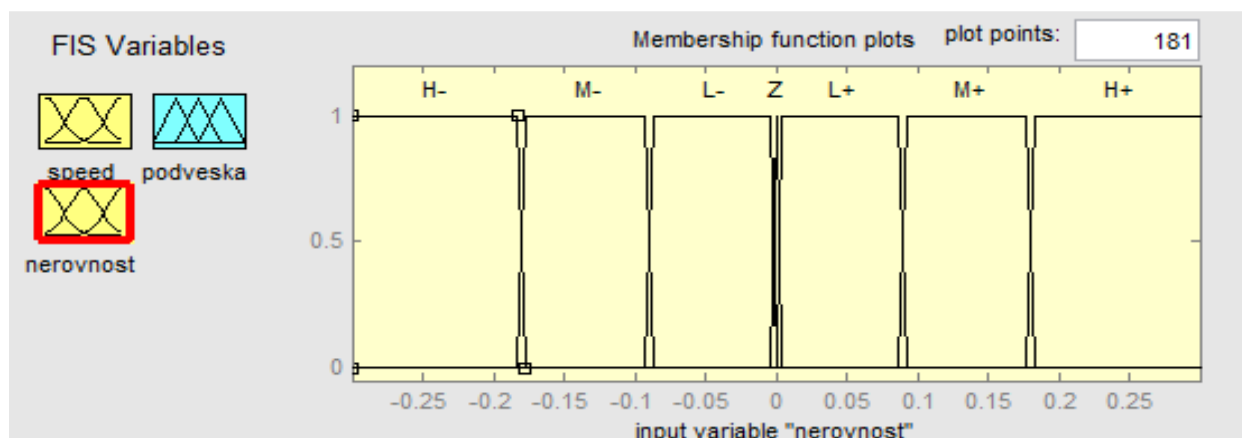


Рис. 17. Термы и функции принадлежности для входной лингвистической переменной *nerov*

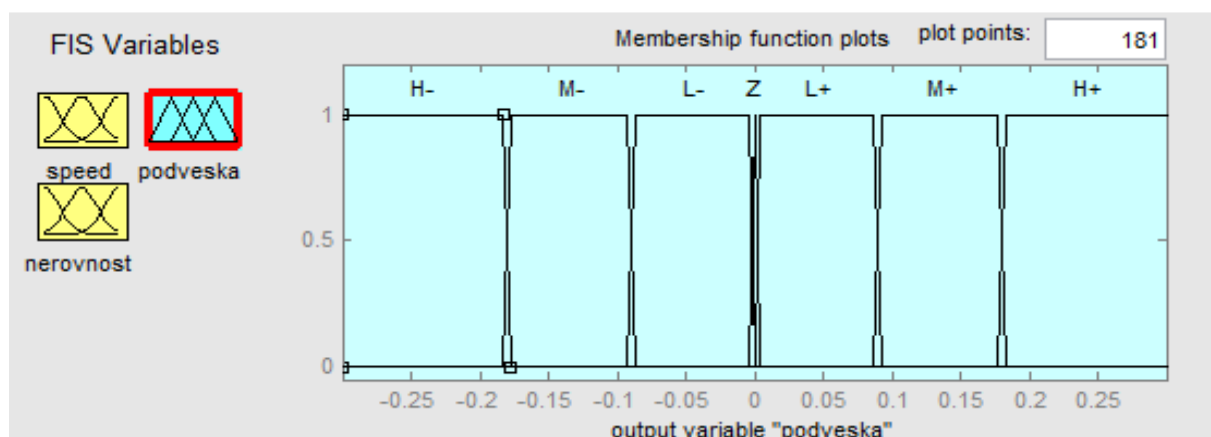


Рис. 18. Термы и функции принадлежности для выходной лингвистической переменной *podv*

После поступления входных сигналов на контроллер требуется процедура фазификации, т.е. преобразование конкретного числового значения входного сигнала в соответствующий терм, а для снятия выходного сигнала – процедура дефазификации (процедура, обратная фазификации).

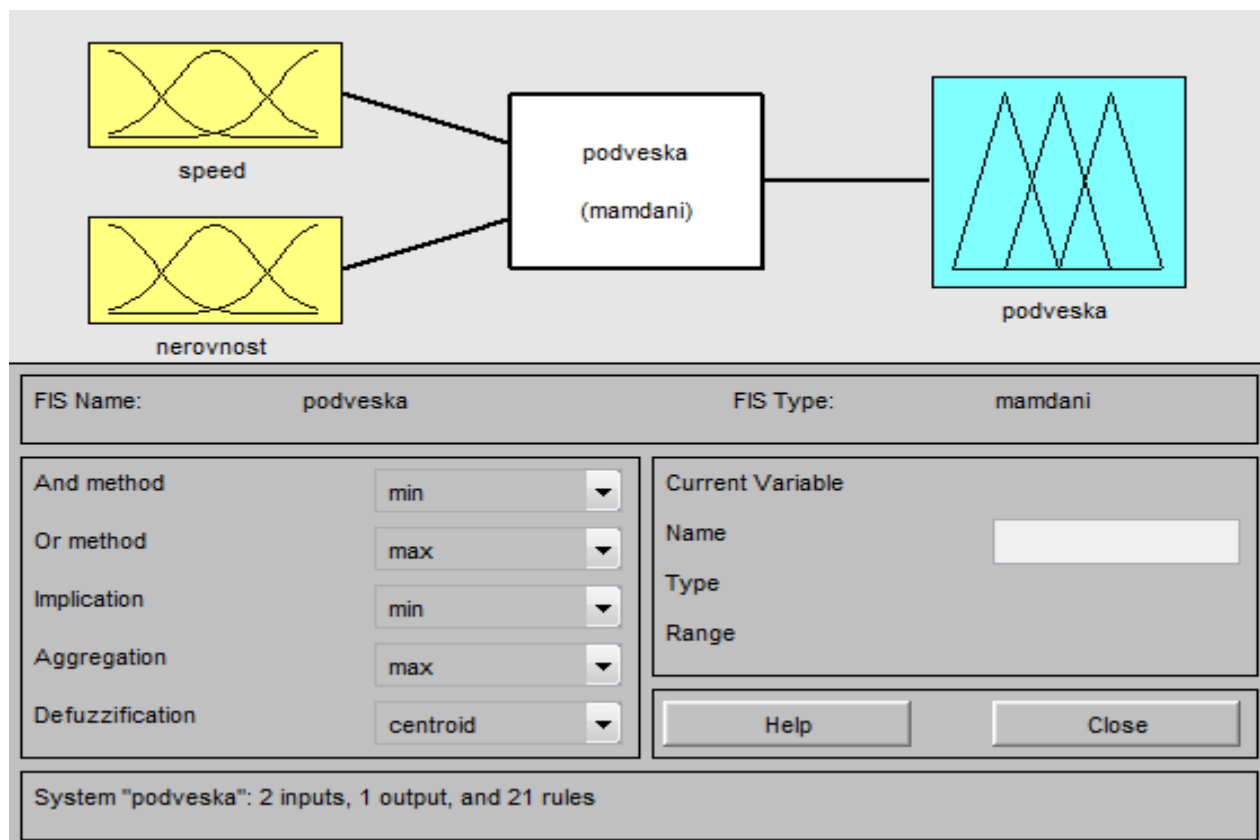


Рис. 19. Входные и выходные параметры

### Формирование нечеткой базы знаний

При формировании нечеткой базы знаний устанавливается взаимосвязь между входными (*speed*, *nerov*) и выходной (*podv*) лингвистическими переменными. Покажем эту взаимосвязь:

| <i>speed/<br/>nerov</i> | <i>H-</i> | <i>M-</i> | <i>L-</i> | <i>Z</i> | <i>L+</i> | <i>M+</i> | <i>H+</i> |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>veryLow</i>          | <i>M-</i> | <i>L-</i> | <i>L-</i> | <i>Z</i> | <i>L+</i> | <i>L+</i> | <i>M+</i> |
| <i>Low</i>              | <i>M-</i> | <i>M-</i> | <i>L-</i> | <i>Z</i> | <i>L+</i> | <i>M+</i> | <i>M+</i> |
| <i>Medium</i>           | <i>H-</i> | <i>M-</i> | <i>L-</i> | <i>Z</i> | <i>L+</i> | <i>M+</i> | <i>H+</i> |
| <i>High</i>             | <i>H-</i> | <i>M-</i> | <i>M-</i> | <i>Z</i> | <i>M+</i> | <i>M+</i> | <i>H+</i> |
| <i>veryHigh</i>         | <i>H-</i> | <i>H-</i> | <i>M-</i> | <i>Z</i> | <i>M+</i> | <i>H+</i> | <i>H+</i> |

В среде Matlab это выглядит следующим образом:

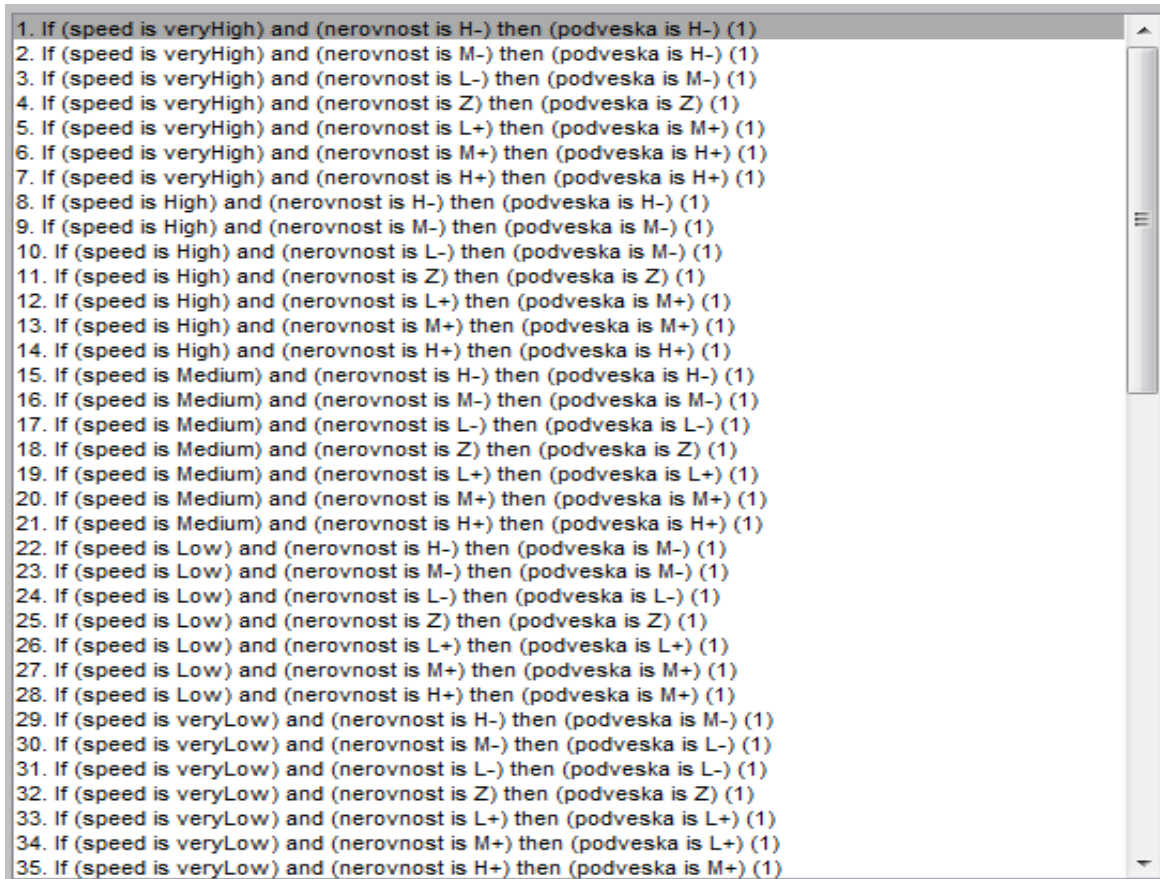


Рис. 20. Правила взаимосвязи между входными (*speed*, *nerov*) и выходными (*podv*) лингвистическими переменными

Для наглядности по этим правилам изобразим взаимосвязь этих входных и выходной лингвистических переменных на поверхности:

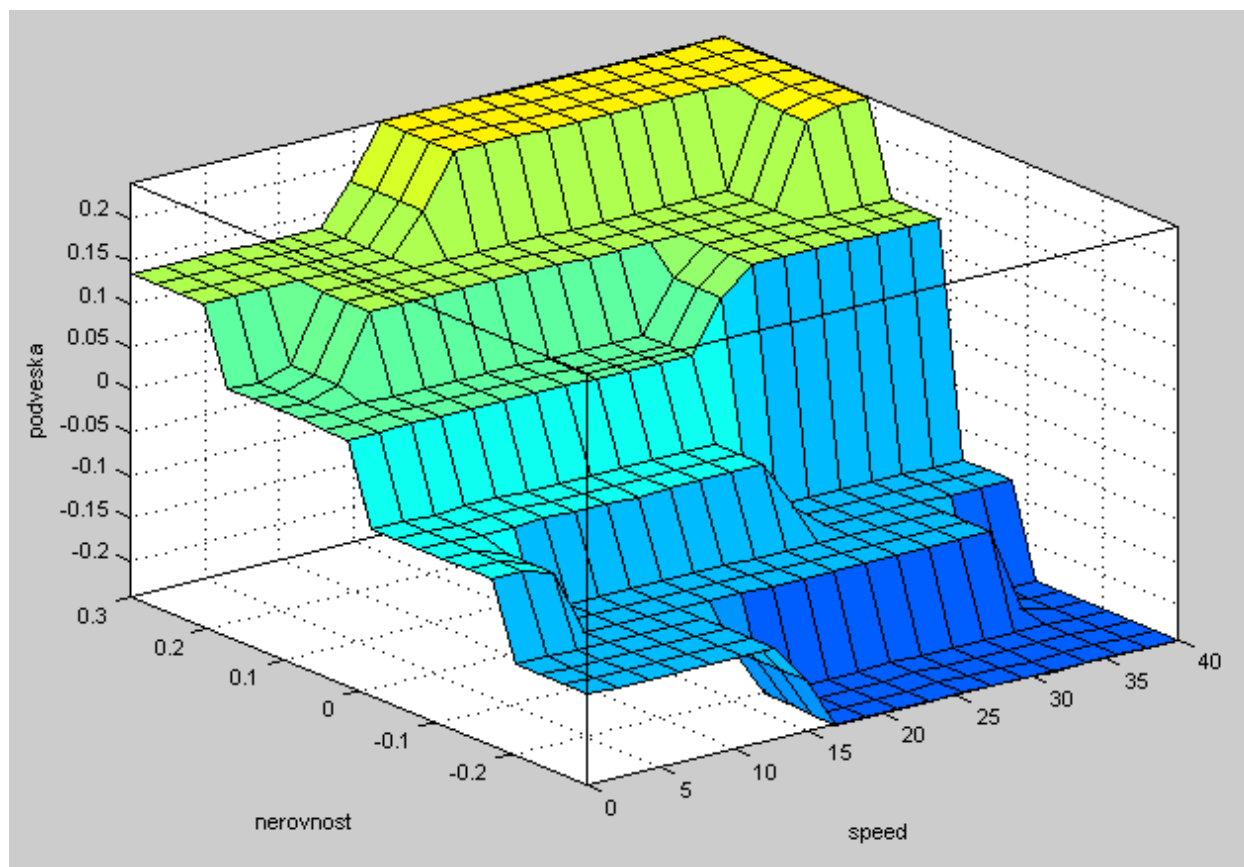


Рис. 21. Взаимосвязь лингвистических переменных на поверхности

### Моделирование работы активной подвески мобильного робота

Проверим работу Fuzzy-преобразователя, который отвечает за величину перемещения активной подвески в соответствии с введенными правилами, при разных скоростях движения мобильного робота, а также подвески в целом.

Сначала подадим на вход Fuzzy-преобразователя постоянные скорости: максимальную (40км/ч) и малую (1км/ч).

Начнем с первой трассы.

*Трасса 1.*



– 40км/ч (подаём постоянную скорость):

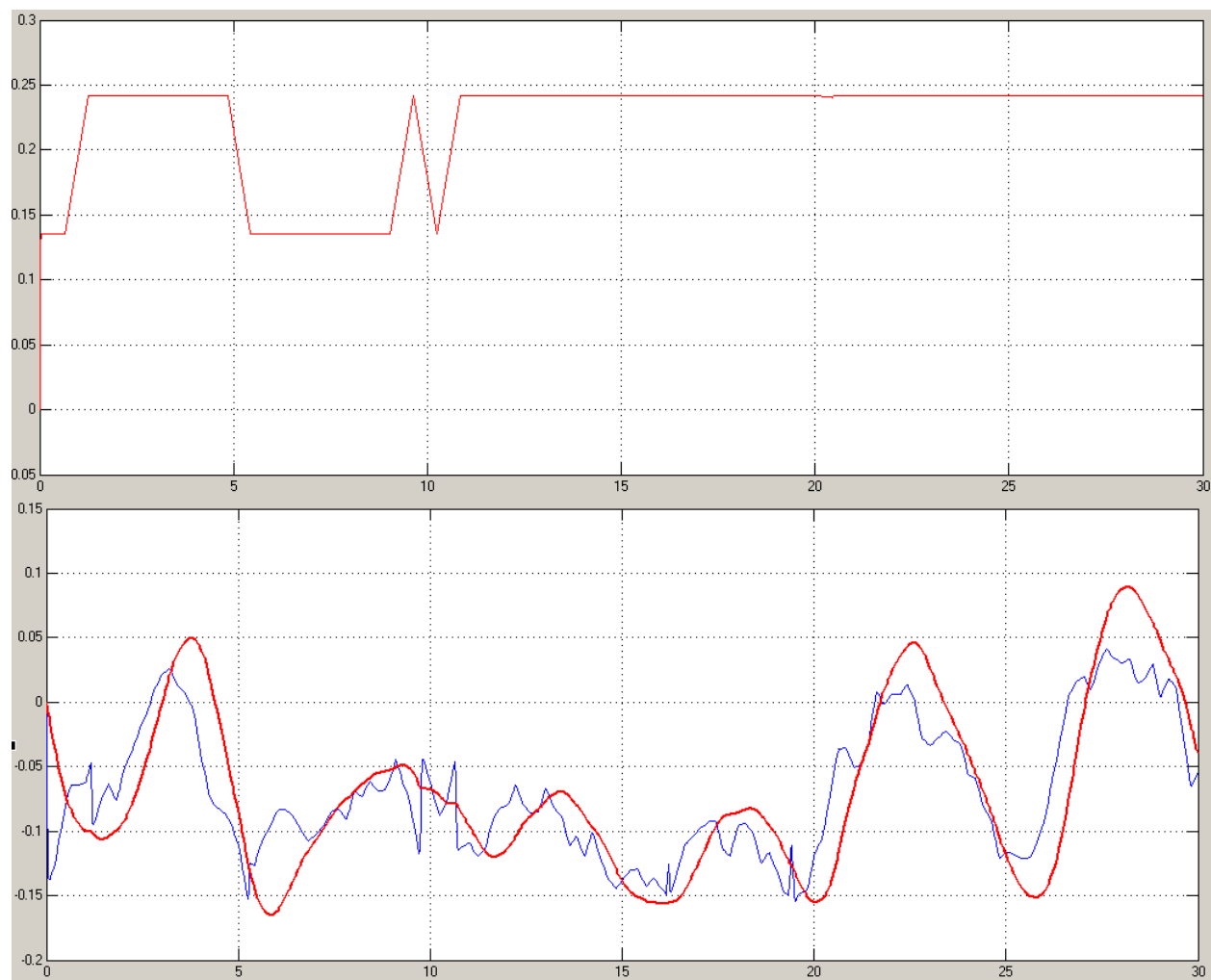
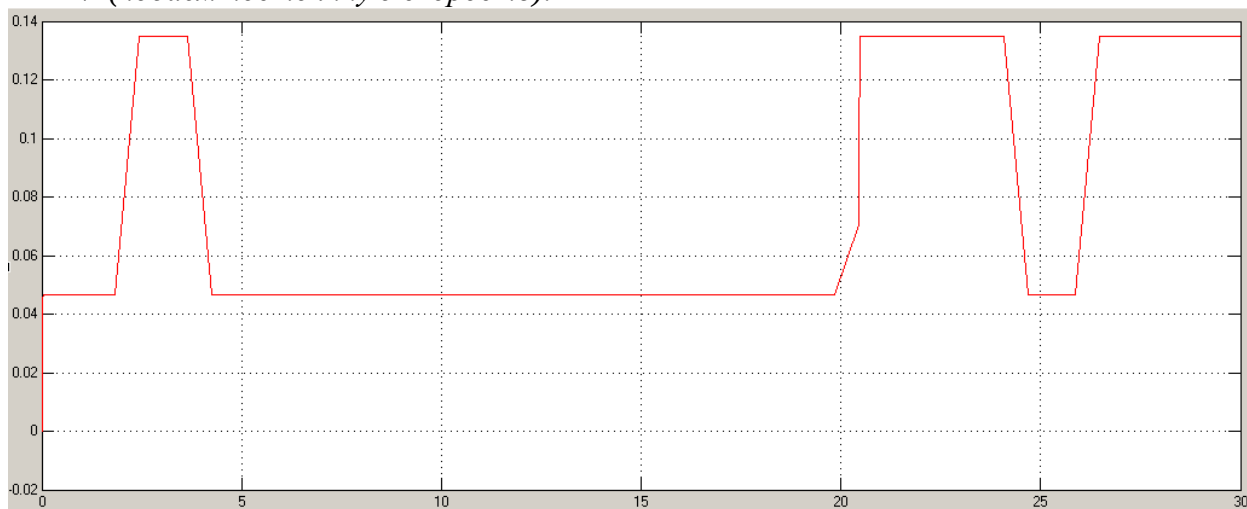


Рис. 22. Выходной сигнал с Fuzzy-преобразователя (сверху) и перемещения поддресоренной массы пассивной и активной подвесок (снизу) (при скорости 40км/ч на трассе 1)

– 1км/ч(подаём постоянную скорость):



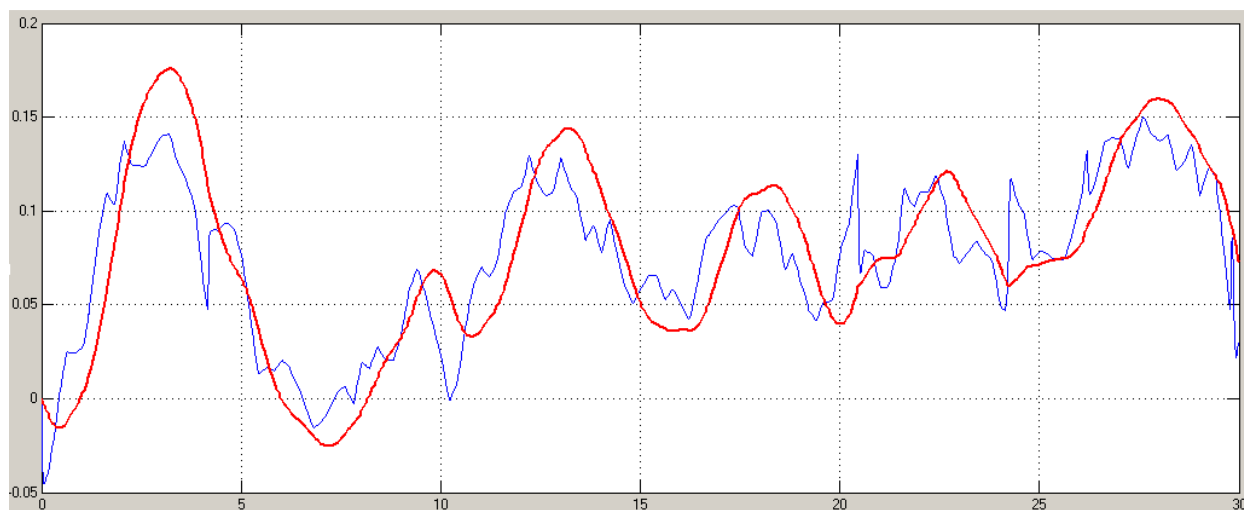


Рис. 23. Выходной сигнал с Fuzzy-преобразователя (сверху) и перемещения поддрессоренной массы пассивной и активной подвесок (снизу) (при скорости 1км/ч на трассе 1)

Теперь подадим на вход изменяющуюся скорость: разгон (0-40км/ч) и торможение (40-0км/ч).

– 0-40км/ч:

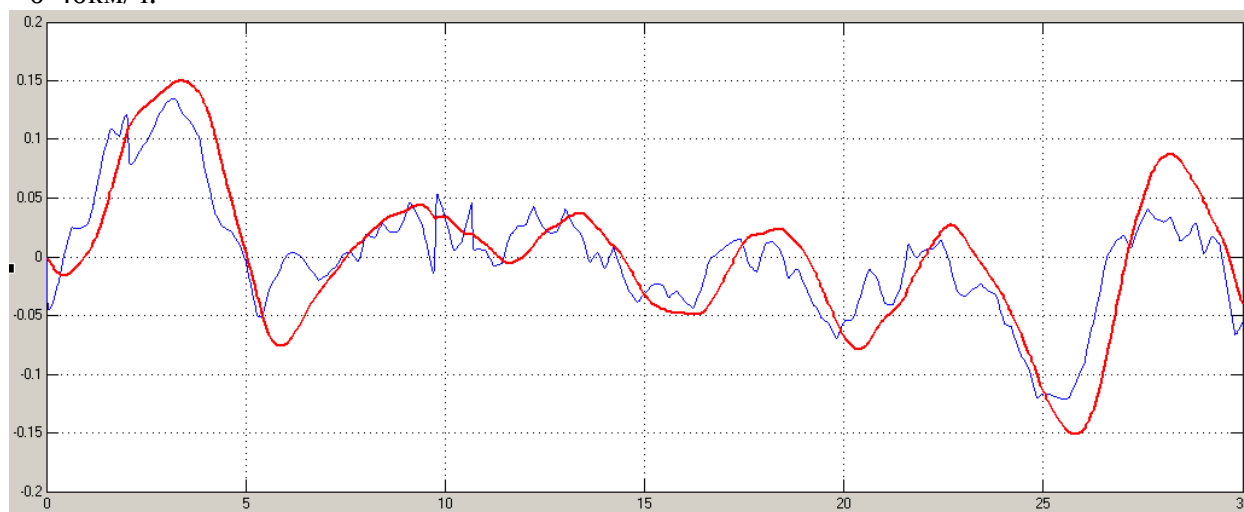


Рис. 24. Перемещения поддрессоренной массы пассивной и активной подвесок (при разгоне 0-40км/ч на трассе 1)

– 40-0км/ч:

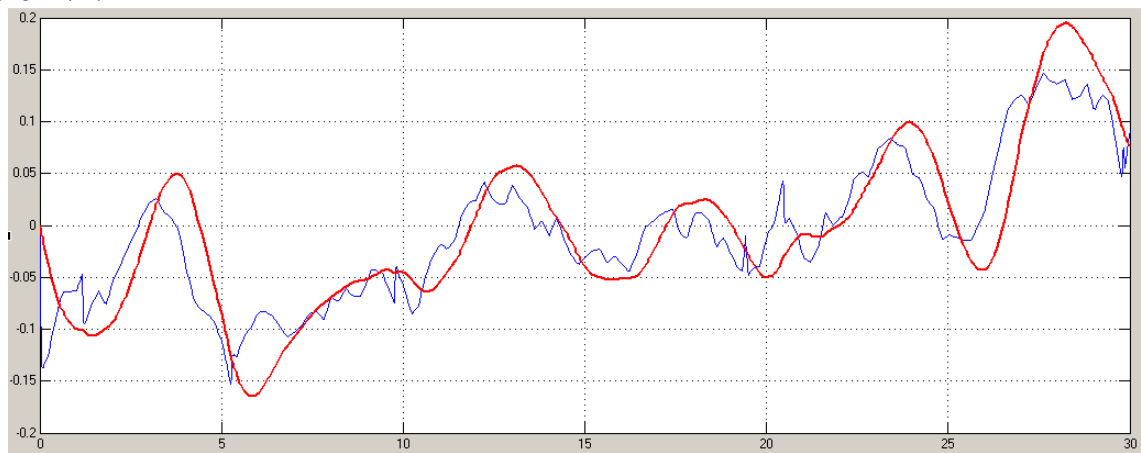


Рис. 25. Перемещения подрессоренной массы пассивной и активной подвесок (при торможении 40-0км/ч на трассе 1)

Теперь проведем те же испытания для второй трассы.

*Трасса2.*

– 40км/ч(подаём постоянную скорость):

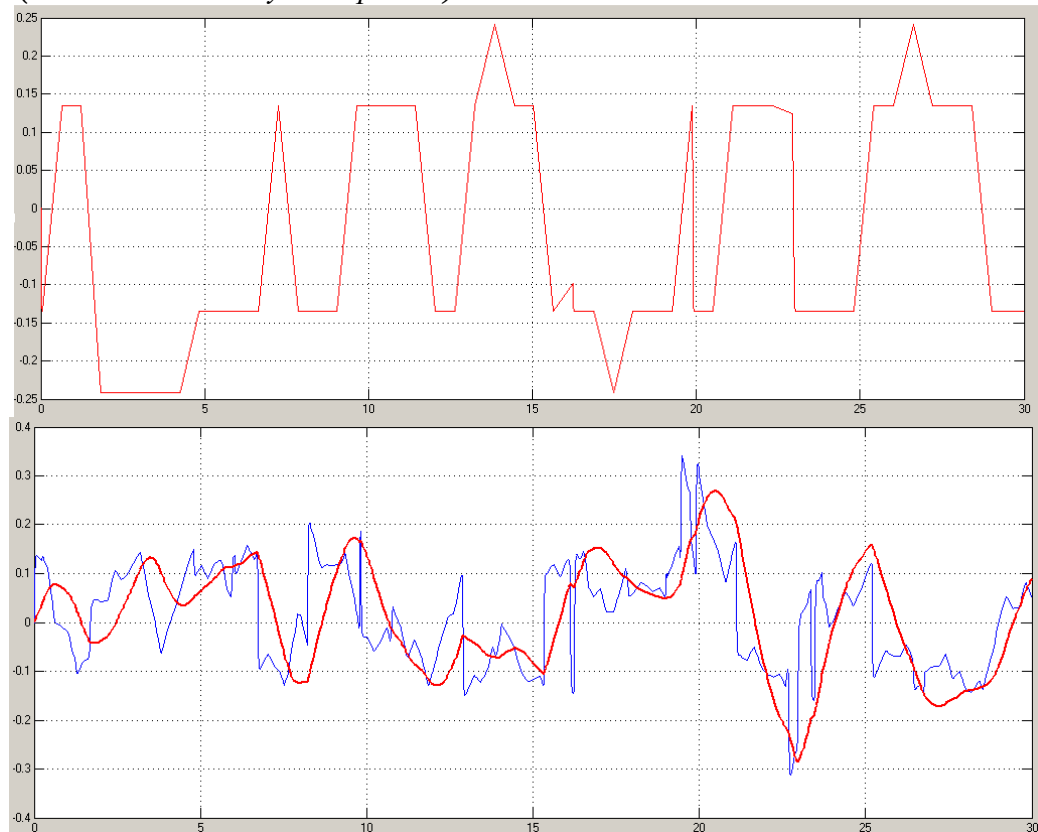


Рис. 26. Выходной сигнал с Fuzzy-преобразователя (сверху) и перемещения поддрессоренной массы пассивной и активной подвесок (снизу) (при скорости 40км/ч на трассе 2)

– 1 км/ч:

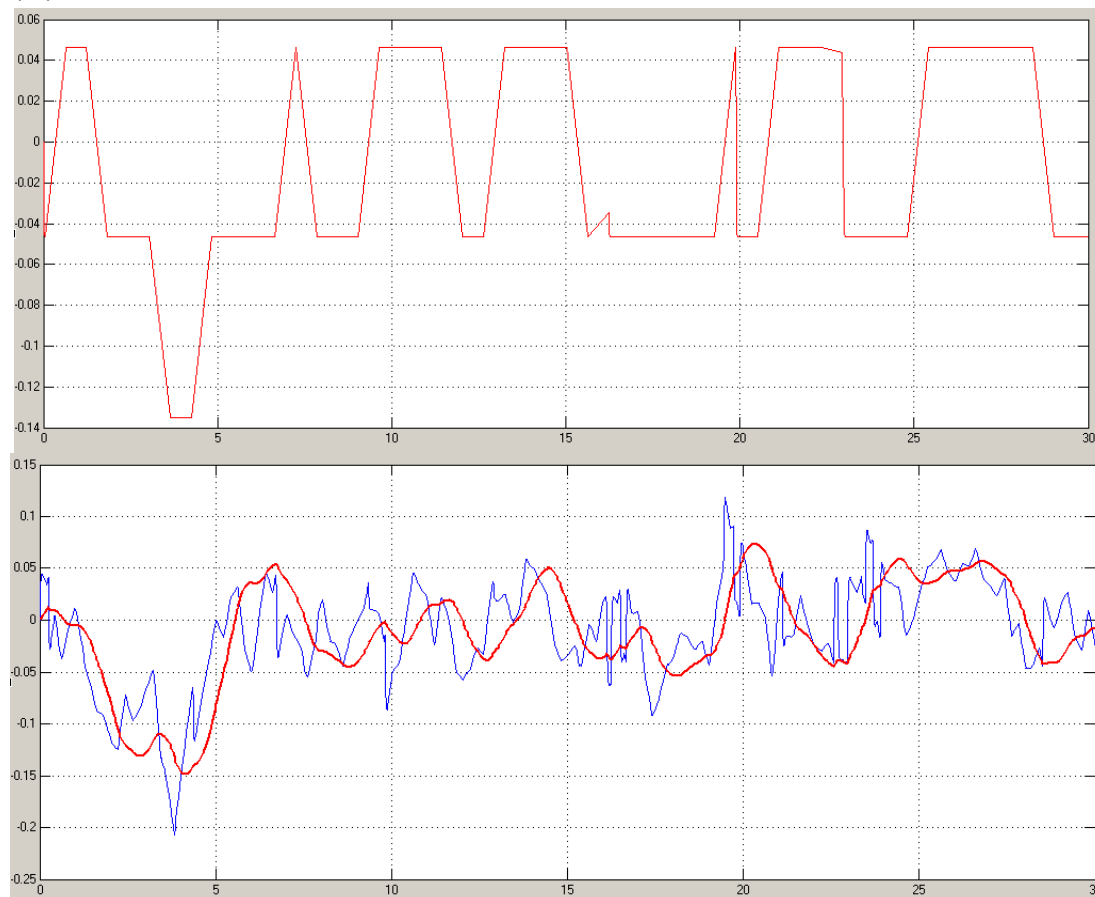


Рис. 27. Выходной сигнал с Fuzzy-преобразователя (сверху) и перемещения поддрессоренной массы пассивной и активной подвесок (снизу) (при скорости 1км/ч на трассе 2)

– 0-40 км/ч:

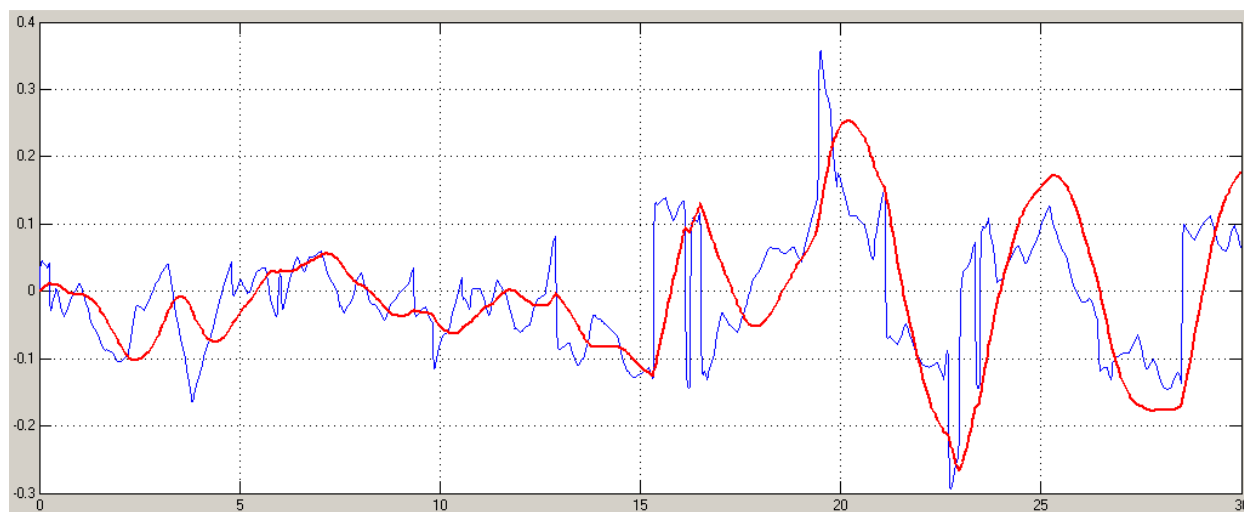


Рис. 28. Перемещения подрессоренной массы пассивной и активной подвесок (при разгоне 0-40км/ч на трассе 2)

– 40-0км/ч:

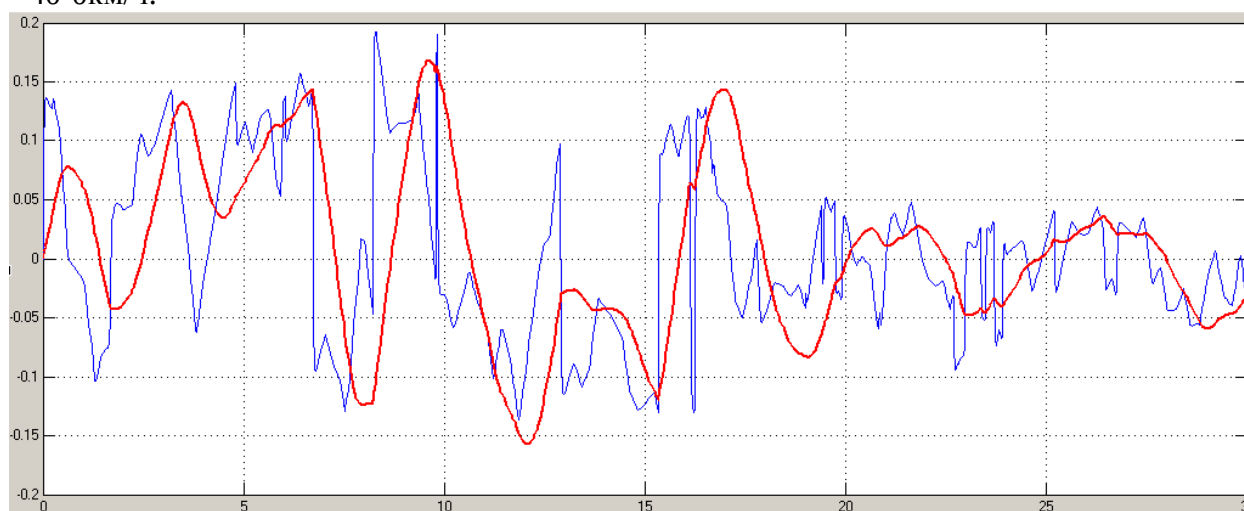


Рис. 29. Перемещения подрессоренной массы пассивной и активной подвесок (при торможении 40-0км/ч на трассе 1)

Таким образом, анализируя полученные результаты моделирования, можно сделать вывод, что Fuzzy-преобразователь системы в целом правильно работает при разных скоростях движения мобильного робота. Также из результатов моделирования можно отметить, что, во-первых, уменьшилась "тряска" подрессоренной массы мобильного робота при введении активной подвески в систему в сравнении с пассивной подвеской, во-вторых, уменьшилась колебательность подрессоренной массы

## **Заключение**

В ходе выполнения данной статьи была создана математической модели управления активной подвеской. Разработан алгоритм реализации корректирующего устройства с использованием нечеткой логики. Проведено математическое моделирование активной подвески мобильного робота с использованием данных с экспериментальных трасс.

## **Список литературы**

1. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс БХВ, 2005 СПб.: Питер, Издательская группа BHV. 512 с.
2. Попов П.Е. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. Учебное пособие для ВУЗов, 2-е изд. М.: Наука, 1989. 304 с.
3. Ротач Я.В. Теория автоматического управления: учебник для вузов М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
4. Жданов. А.А. Метод автономного адаптивного управления. М.: ИСП РАН, 1999. 134 с.
5. Шарапов В.Д. Активные подвески транспортных средств. Рига: РВВПКУ, 1980. 261 с.
6. Машков К.Ю. , Рубцов В.И. , Рубцов И.В Состав и характеристики мобильных роботов: учебное пособие для Вузов - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 59 с.
7. Поршнев С.В. MATLAB 7. Основы работы и программирования. М.:Бином-Пресс, 2010. 320 с.

