

Система управления адаптивной пневмогидравлической рессорой колёсной машины с изменяемой упругой характеристикой

11, ноябрь 2013

DOI: 10.7463/1113.0645542

Андреев М. А., Семенов С. Е.

УДК 62-522.2

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

andreev@e10-bmstu.ru

a1e10@rambler.ru

Введение

Одним из важнейших качеств автомобиля является плавность хода, характеризующая способность длительного движения в интервале эксплуатационных скоростей без неприятных ощущений и быстрой утомляемости людей или повреждений перевозимого груза, обусловленных колебаниями транспортного средства [1]. В особенности, вопросы плавности хода актуальны для многоосных колёсных машин (МКМ) [2]. Обзор литературы в [2] показал, что традиционные неуправляемые системы поддресоривания не позволяют получить приемлемые показатели плавности хода для всего многообразия условий эксплуатации МКМ, а также не позволяют разрешить противоречий между требованиями по плавности хода и повышению параметров профильной проходимости МКМ. Было доказано, что алгоритмы управления подвеской позволяют преодолевать единичные неровности в автоматизированном режиме, т.е. без участия водителя в процессе управления подвеской. Установлено, что для машины с колёсной формулой 8x8 с управляемой подвеской при заезде на эскарап пиковые значения сил, действующих на несущую систему со стороны подвески, снижаются на 30%, а углы продольного наклона корпуса уменьшаются на 50% по сравнению с неуправляемой подвеской [2]. Техническая реализация алгоритмов автоматизированного преодоления препятствий предъявляет высокие требования к точности и быстродействию управления вертикальным положением колёс, а также к стабильности упругой характеристики рессоры.

Немецкий учёный доктор Вольфганг Бауэр в своей книге [3] проводит сравнение механических, пневматических, пневмогидравлических систем подрессоривания и выделяет области их применения. В частности, для применения в машинах высокой проходимости, где строгие требования предъявляются к точности и быстродействию системы изменения дорожного просвета, наилучшие эксплуатационные характеристики демонстрируют системы с пневмогидравлической подвеской.

Основным элементом пневмогидравлической подвески является пневмогидравлическая рессора (ПГР), в которой роль упругих элементов выполняет сжимающийся газ. Жидкость выполняет функции промежуточного тела, отделяющего газ от движущихся металлических частей. Жидкость может выполнять не только роль промежуточного тела, но и средства регулирования упругого элемента; в этом случае пневмогидравлическая рессора называется регулируемой. В работе [3] приводятся описания серийно выпускаемых конструкций, а так же патентов на конструкции регулируемых пневмогидравлических рессор, которые в той или иной степени позволяют изменять упругие характеристики.

Интерес представляют также адаптивные пневмогидравлические рессоры, упругая характеристика которых изменяется в процессе движения машины в соответствии с управляющим воздействием или автоматически (по заранее заложенным алгоритмам). Фирма Citroen серийно выпускает полуактивную подвеску Hydractiv, которая позволяет реализовать два варианта упругой характеристики для каждой из осей легкового автомобиля [3]. Эта подвеска, однако, не удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к адаптивной подвеске многоосных колёсных машин. Существующие варианты активных подвесок с непрерывным управлением положением колёс машины не удовлетворяют требованиям по энергетической эффективности [2].

В данной статье демонстрируется система управления адаптивной пневмогидравлической рессорой с изменяемой упругой характеристикой. Она позволяет по показаниям датчиков идентифицировать текущую упругую характеристику, сопоставить её с желаемой (которая может меняться в процессе движения) и посредством гидравлической распределительной аппаратуры привести их, с заданной точностью, в соответствие.

1. Постановка задачи

Под *адаптивной пневмогидравлической рессорой с изменяемой упругой характеристикой* понимается пневмогидравлическая рессора способная изменять

параметры упругих элементов в зависимости от управляющих воздействий водителя и дорожных условий.

В зависимости от характера изменения параметров упругой характеристики, адаптивные пневмогидравлические рессоры разделяются на ПГР со *ступенчатым изменением упругой характеристики* (пример – система Hydractiv) и с *плавным изменением упругой характеристики*.

В рамках данной работы была поставлена задача разработать алгоритм управления адаптивной пневмогидравлической рессорой с возможностью плавного изменения параметров упругой характеристики в процессе воздействия различного рода динамических и кинематических возмущений.

Разработанный алгоритм должен быть универсален для применения в системах управления различными типами пневмогидравлических рессор.

2. Выбор объекта управления

При выборе структуры объекта управления примем во внимание следующие положения.

- На структуру системы управления ПГР и алгоритмы не влияет тип конструкции гидроаккумулятора, а так же его размещение в конструкции подвески.
- На структуру системы управления ПГР и алгоритмы не влияет способ её установки в системе подрессоривания, а так же сама конструкция подвески. Особенности проявляются на уровне генерации желаемой упругой характеристики ПГР.
- Система управления ПГР с упругими элементами в двух полостях гидроцилиндров, может быть адаптирован для ПГР с упругими элементами только в одной полости гидроцилиндра. Обратное утверждение не верно;
- Требование к возможности управления под воздействием динамических и кинематических возмущений подразумевает инвариантность системы управления к текущему уровню демпфирования ПГР.

Исходя из положения о возможности адаптации системы управления ПГР с одним и двумя упругими элементами, в качестве объекта управления выбирается пневмогидравлическая рессора, принципиальная схема которой (в составе подвески) показана на рисунке 1.

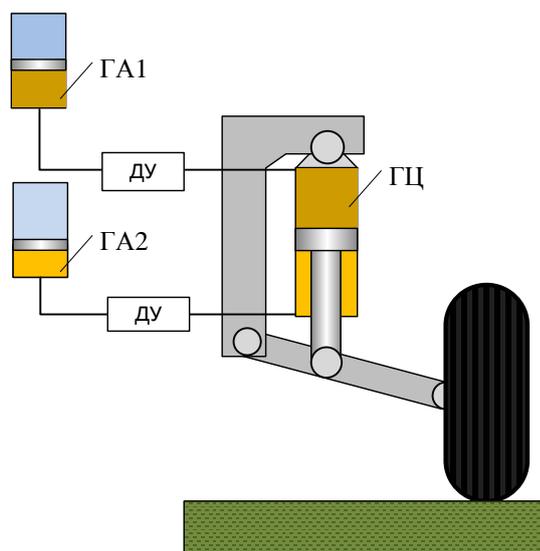


Рисунок 1 – Схема пневмогидравлической рессоры в составе подвески

Пневмогидравлическая рессора состоит из гидроцилиндра (ГЦ), гидроаккумуляторов поршневой (ГА1) и штоковой (ГА2) полостей, а также гидравлических демпфирующих устройств (ДУ).

Пример механической характеристики ПГР показан на рисунке 2.

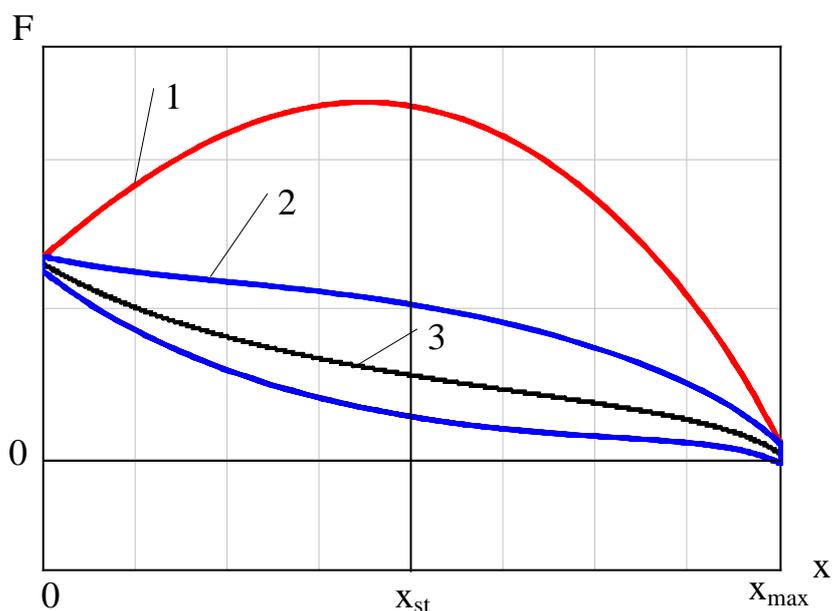


Рисунок 2 – Механическая характеристика ПГР

Линиями 1 и 2 показаны характеристики ПГР при различных уровнях демпфирования при одинаковой амплитуде скорости кинематического возмущения. Линией 3 показана упругая (статическая) характеристика ПГР, полученная при малых скоростях перемещения поршня гидроцилиндра.

Упругая характеристика ПГР формируется из характеристики гидроаккумуляторов поршневой и штоковой полостей. Пример таких характеристик показан на рисунке 3.

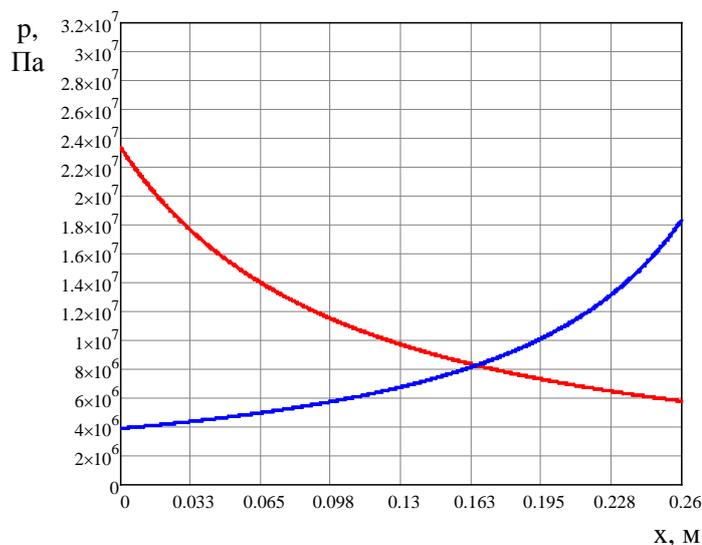


Рисунок 3 – Зависимость давления в полостях гидроаккумуляторов от перемещения поршня гидроцилиндра

Данные характеристики описываются уравнениями, полученными из уравнения политропного процесса для идеального газа [4]:

$$p_{aA}(x) = p_{0A} \cdot \left(1 + \frac{A_A}{V_A} \cdot \frac{p_{0A}}{p_{zA}} \cdot (x - x_0) \right)^{-n},$$

$$p_{aB}(x) = p_{0B} \cdot \left(1 - \frac{A_B}{V_B} \cdot \frac{p_{0B}}{p_{zB}} \cdot (x - x_0) \right)^{-n}.$$

Здесь x – положение поршня гидроцилиндра;

V – объём соответствующего гидроаккумулятора;

p_z – давление зарядки соответствующего гидроаккумулятора;

p_0 – давление в полости гидроаккумулятора при положении поршня гидроцилиндра x_0

A – площадь поршневой или штоковой полости;

n – показатель политропы.

Повторяемость этих характеристик продемонстрированная в работе [4], позволяет применить структуру системы управления, описанную в следующем разделе.

3. Система автоматического управления ПГР

Структурная схема системы автоматического управления адаптивной ПГР с изменяемой упругой характеристикой показана на рисунке 4.

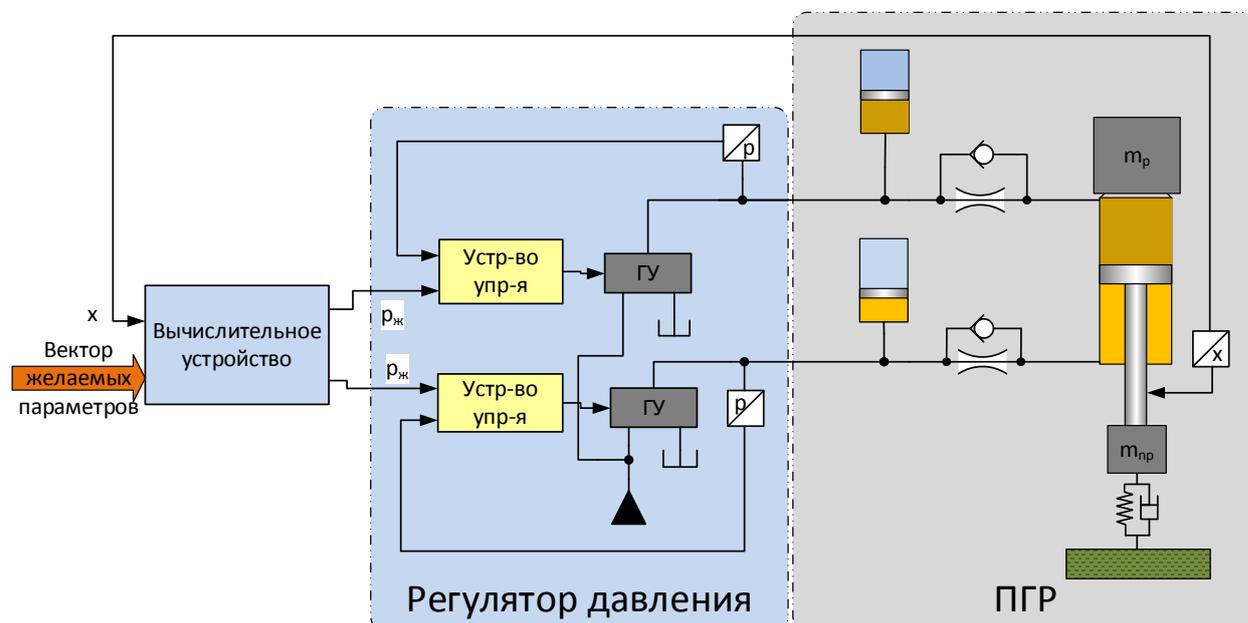


Рисунок 4 – Структурная схема системы автоматического управления ПГР

Система управления состоит из пневмогидравлической рессоры, регулятора давления в полостях гидроаккумуляторов ПГР, вычислительного устройства.

Принцип действия системы управления заключается в следующем. С верхнего уровня управления к вычислительному устройству поступает вектор желаемых параметров упругой характеристики ПГР, а также текущее значение перемещения поршня гидроцилиндра. Вычислительное устройство, исходя из конструктивных особенностей ПГР, генерирует желаемые функции давлений в зависимости от положения поршня гидроцилиндра. Выходом вычислительного устройства являются мгновенные желаемые значения давлений в полостях гидроаккумуляторов ПГР при текущем значении перемещения поршня. Эти значения обрабатываются регулятором давления, в состав которого входит гидравлический усилитель мощности (ГУ), а также средство измерения давления, на основе которого организована обратная связь.

Несложно заметить, что система управления будет потреблять мощность только в случае рассогласования желаемой характеристики ПГР с действительной характеристикой. В случае поддержания одной желаемой характеристики это может произойти только в случае перетечки рабочей жидкости из полостей ПГР в результате срабатывания предохранительных устройств либо по уплотнениям гидроцилиндра.

Процесс кинематического или динамического возбуждения (при движении машины по неровностям) не будет приводить к началу регулирования, что положительно сказывается на энергетической эффективности предлагаемой системы управления.

Таким образом, достигается цель управления, т.е. параметры упругой характеристики ПГР принимают желаемые значения, которые поступают от верхнего уровня управления.

4. Описание принципа управления

Как было отмечено выше, вычислительное устройство преобразует желаемые параметры упругой характеристики в желаемые значения давлений в полостях гидроаккумуляторов при текущем значении перемещения поршня. При разработке принципа управления важно выделить параметры упругой характеристики, которые, во-первых, однозначно определяют форму характеристики, а, во-вторых, отражают основные эксплуатационные параметры ПГР при движении машины по неровностям.

Уравнение упругой характеристики записывается следующим образом:

$$F_{\text{упр}}(x) = p_{0A} \cdot \left(1 + \frac{A_A \cdot p_{0A}}{V_A \cdot p_{zA}} \cdot (x - x_{\text{ст}}) \right)^{-n} \cdot A_A - p_{0B} \cdot \left(1 - \frac{A_B \cdot p_{0B}}{V_B \cdot p_{zB}} \cdot (x - x_{\text{ст}}) \right)^{-n} \cdot A_B.$$

По этому уравнению можно построить характеристику, вид которой показан на рисунке 5.

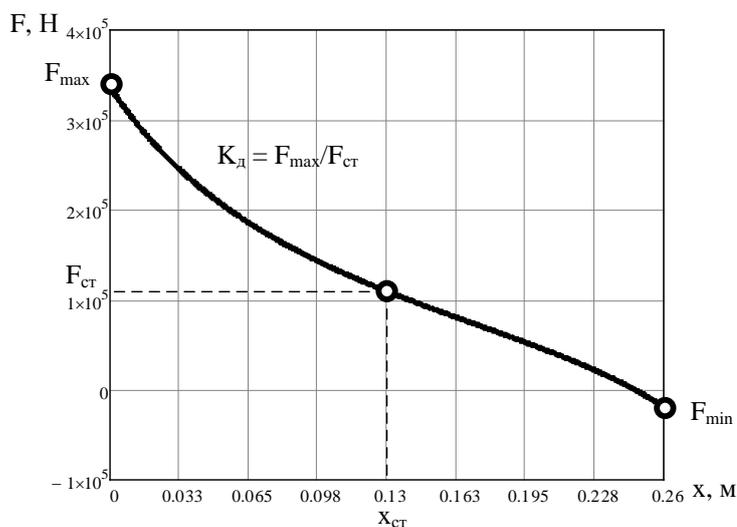


Рисунок 5 – Упругая характеристика ПГР

Необходимо отметить, что при управлении реальной конструкцией ПГР чаще всего является нецелесообразным варьировать давление зарядки гидроаккумулятора, а также его объём. Таким образом, характеристика может варьироваться только путём изменения давлений p_{0A} и p_{0B} .

Основными параметрами упругой характеристики в этом случае являются сила $F_{ст}$ в статическом положении $x_{ст}$, сила в полностью сжатом состоянии F_{max} , сила в положении отбоя F_{min} .

Сила в статическом положении определяется разностью давлений p_{0A} и p_{0B} и является главным параметром, определяющим положение подвески при отсутствии динамических возмущений.

Сила в сжатом состоянии ПГР F_{max} может быть выражена через т.н. коэффициент динамичности подвески:

$$K_D = \frac{F_{max}}{F_{ст}}$$

Коэффициент динамичности подвески определяет вероятность пробоя при движении по неровностям. Значение этого параметра в гидросистеме ПГР определяется преимущественно соотношением давлений в гидроаккумуляторе поршневой полости:

$$k_A = \frac{p_{0A}}{p_{zA}}$$

Сила при положении отбоя подвески F_{min} задаётся исходя из уменьшения вероятности ударов в отбойник при движении по неровностям и преодолении препятствий. Значение этой силы определяется преимущественно соотношением давлений в гидроаккумуляторе штоковой полости:

$$k_B = \frac{p_{0B}}{p_{zB}}$$

Таким образом, задание этих четырёх параметров полностью определяет упругую характеристику ПГР.

При синтезе желаемой упругой характеристики также важно учитывать ограничения, накладываемые конструкцией ПГР. Основными ограничениями являются:

- максимально допустимые давления в гидроаккумуляторах (требования безопасности работы с сосудами под давлением);
- минимально допустимые давления в гидроаккумуляторах (гидроаккумулятор при эксплуатации не должен полностью опорожняться);

- максимально допустимая сила со стороны ПГР (определяется прочностью элементов конструкции подвески);

5. Описание принципа действия и вариантов исполнения регулятора давления

Задачей регулятора давления является управление давлением в полости гидроаккумулятора в соответствии с входным воздействием, поступающим от вычислительного устройства. В связи со сложностью реализации вычислительного устройства каким-либо способом, кроме как на основе электрических компонентов, в рамках данной работы будут рассматриваться исключительно регуляторы давления с электрическим управлением.

По характеру управления регуляторы давления могут быть с дискретным или пропорциональным управлением.

По типу обратной связи регуляторы делятся на регуляторы с электрической или гидромеханической обратной связью.

В зависимости от типа электрогидравлического усилителя мощности, регуляторы давления делятся на регуляторы с дроссельным и объёмным управлением.

Основные варианты схем регуляторов давления представлены на рисунке 6.

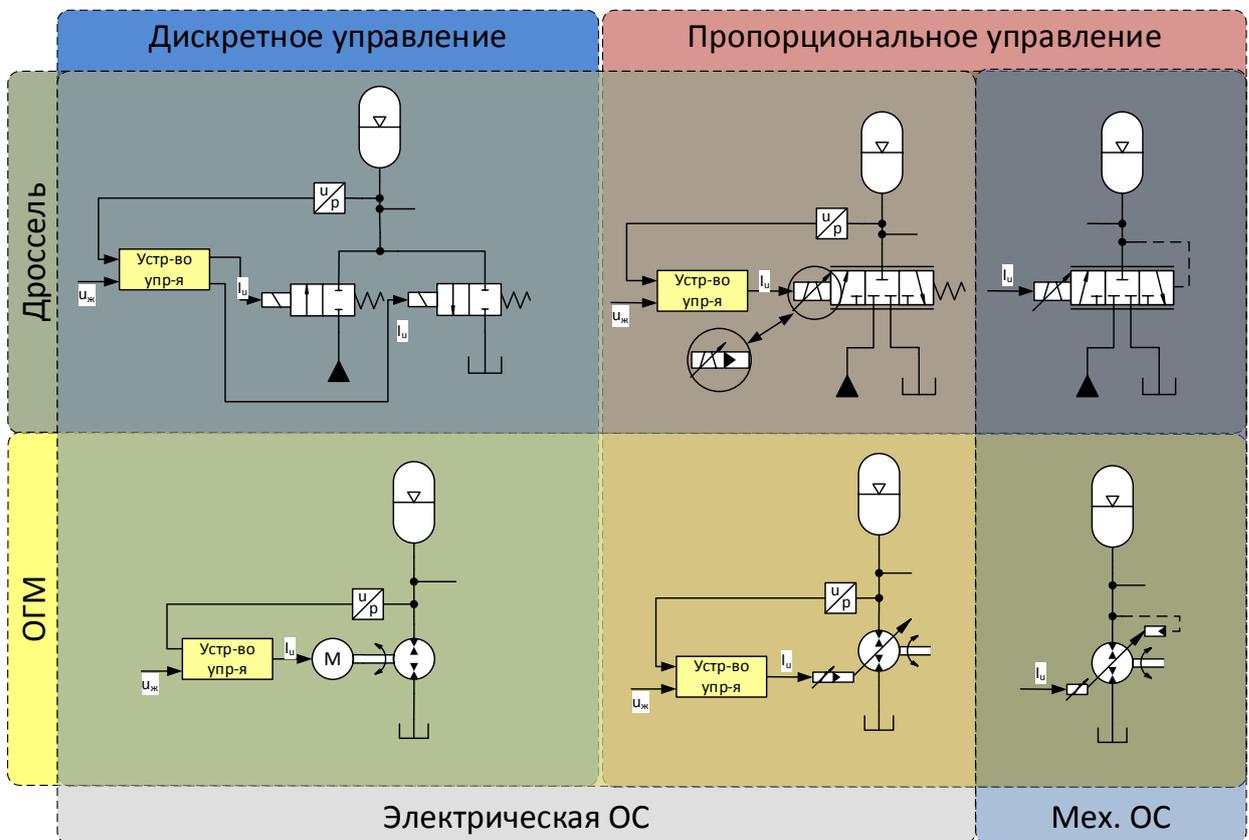


Рисунок 6 – Классификация регуляторов давления с электрическим управлением

При выборе конкретного вида регулятора, необходимо руководствоваться следующими критериями: точность управления, надёжность конструкции, энергетическая эффективность, стоимость конструкции, динамика управления, масса и габариты.

Касательно данных критериев можно отметить, что наиболее высокой точностью отличаются регуляторы с электрической обратной связью, однако для достижения того же уровня надёжности как у регуляторов с механической обратной связью, требуется многократное резервирование электрической части регулятора. Использование механической обратной связи так же положительно сказывается на быстродействии регулятора.

Отличительной особенностью регуляторов с объёмным типом управления является их повышенная энергетическая эффективность в сравнении с регуляторами с дроссельным управлением. В частности, использование обратимых гидромашин даёт возможность рекуперации энергии при управлении.

С экономической точки зрения, большей стоимостью обладают регуляторы с объёмным типом управления (по причине дороговизны самих объёмных гидромашин). Самой дешёвой конструкцией может считаться регулятор, выполненный по схеме с дискретными электромагнитами.

Очевидно, что окончательное решение по выбору типа регулятора должно определяться функциональным назначением системы управления ПГР в рамках всей машины. Для системы, где ПГР выполняет лишь функции изменения дорожного просвета в процессе движения, достаточным может оказаться экономически наиболее выгодный вариант с дискретными электромагнитами. Для работы в составе системы стабилизации кузова машины, быстродействия дискретного регулятора может оказаться недостаточно. Для машин, регулирование подвески которых является значительной частью выполняемого технологического процесса, целесообразным будет использование регуляторов объёмного типа.

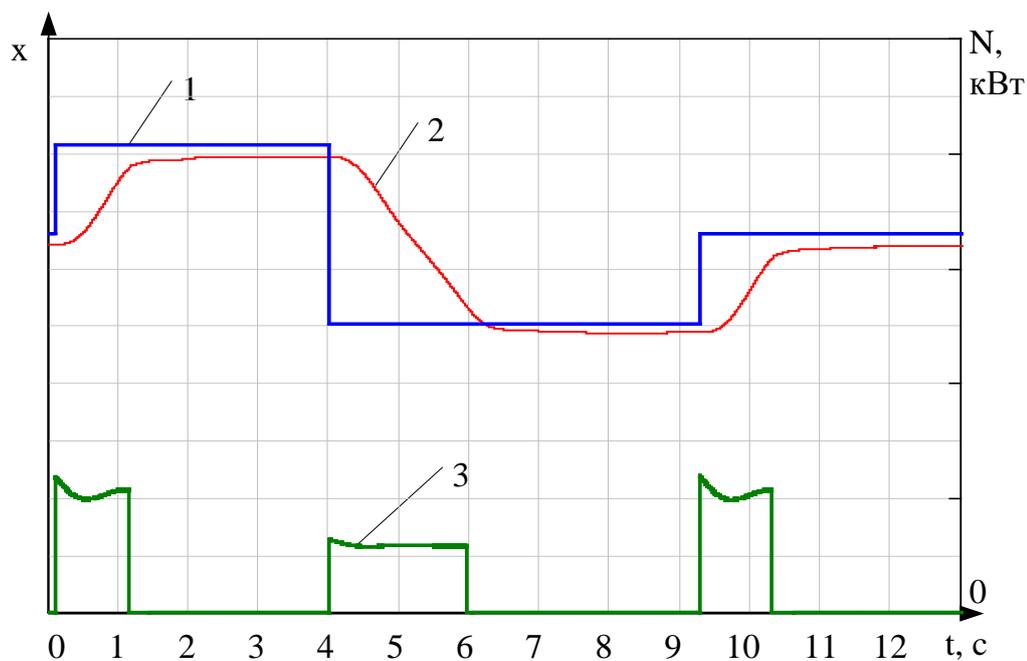
Выделение конкретных областей применения различных типов регулятора является предметом отдельного исследования и в рамках данной статьи не рассматривается.

6. Демонстрация работы системы управления

Проиллюстрировать преимущества представленной выше системы управления адаптивной ПГР можно на примере адаптивной пневмогидравлической рессоры с дискретным управлением. Для этого была составлена математическая модель пневмогидравлической подвески с учётом инерции подрессоренной и непрессоренной

масс, упругости шины, а так же основных гидромеханических процессов, имеющих место в гидросистеме ПГР. Так же была принята нелинейная модель трения в уплотнениях гидроцилиндра [5].

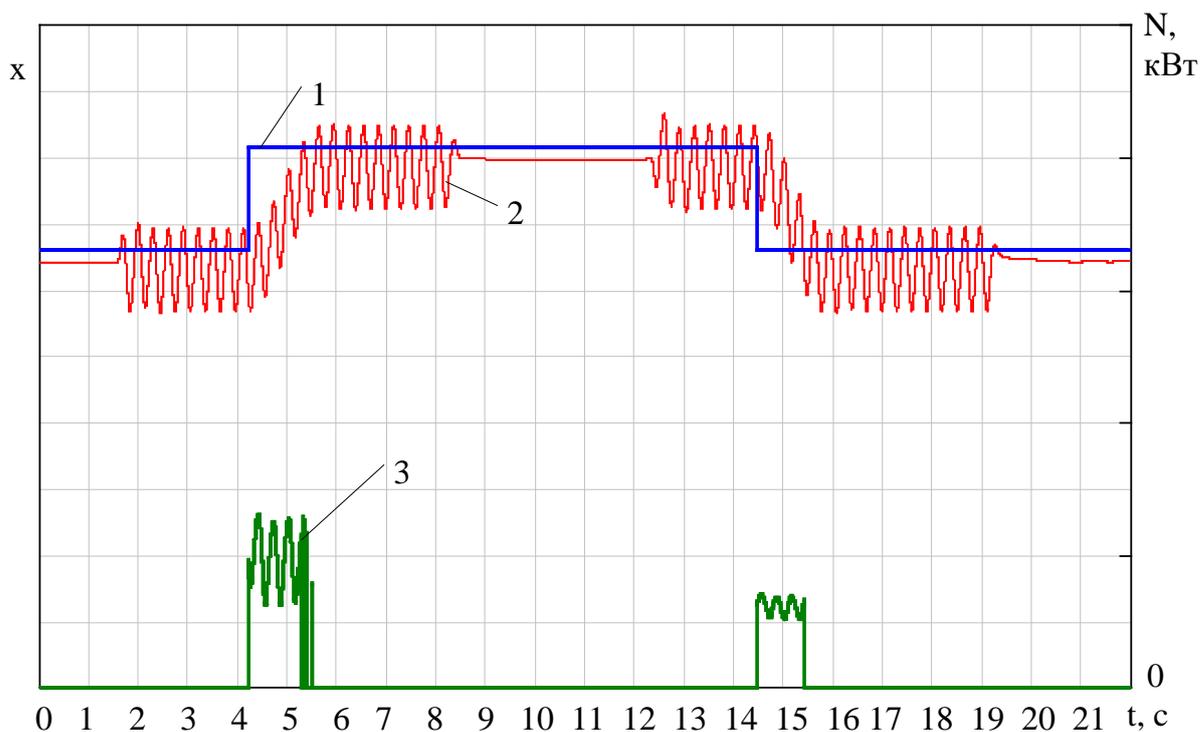
В качестве входного воздействия задаётся желаемое значение статического положения поршня гидроцилиндра. На рисунке 7 показан переходный процесс при отсутствии механических возмущений.



1 – желаемое значение статического положения поршня ПГР; 2 – положение поршня ПГР;
3 – потребляемая мощность системы управления.

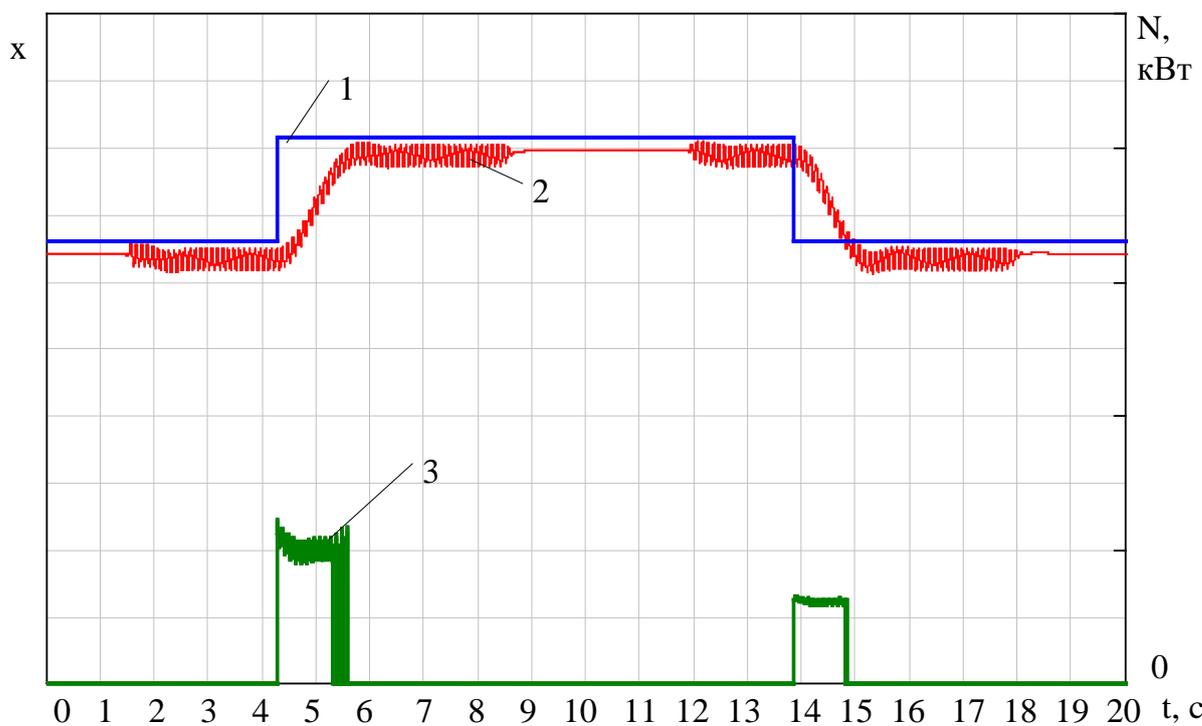
Рисунок 7 – Переходные процессы ПГР при отсутствии механических возмущений

Переходные процессы ПГР при воздействии кинематического возмущения на колесо с частотами 3 и 10 Гц, показаны на рисунках 8 и 9 соответственно.



1 – желаемое значение статического положения поршня ПГР; 2 – положение поршня ПГР;
3 – потребляемая мощность системы управления.

Рисунок 8 – Переходные процессы ПГР при динамическом возмущении колеса с частотой 3 Гц



1 – желаемое значение статического положения поршня ПГР; 2 – положение поршня ПГР;
3 – потребляемая мощность системы управления.

Рис. 9 – Переходные процессы ПГР при динамическом возмущении колеса с частотой 10 Гц

Переходные процессы на рисунках 8 и 9 демонстрируют способность системы управления изменять статическое положение ПГР в процессе движения машины по неровностям. При этом в отличие от активных систем (со слежением по положению) система управления потребляет мощность только в случае необходимости изменения характеристики ПГР (в данном случае – для изменения статического положения). Регуляторы давления не участвуют в процессе подрессоривания во время движения, т.е. требования по их быстродействию не связаны с динамикой механических возмущений, а, следовательно, и со скоростью движения машины по неровностям.

Заключение

В результате работы, была предложена новая структура системы управления адаптивной пневмогидравлической рессорой (ПГР), которая позволяет изменять ключевые параметры упругой характеристики, такие как статическое положение, сила в статическом положении, коэффициент динамичности, сила в положении отбоя. При этом, в отличие от традиционных активных систем, принцип работы которых основан на устранении рассогласования между желаемым и действительным положением ПГР, предлагаемая система обладает следующими преимуществами: управление может осуществляться в процессе движения по неровностям, быстродействие регуляторов давления не влияет на максимальную допустимую скорость движения машины по неровностям в процессе управления ПГР, изменение параметров состояния ПГР в процессе движения не приводит к потреблению мощности системой управления.

Данные преимущества достигаются путём включения в систему управления вычислительного устройства, которое по предложенному алгоритму формирует желаемые зависимости давлений в полостях гидроаккумуляторов от положения ПГР.

Были даны общие рекомендации по типам регуляторов давления, используемых в системе управления для поддержания заданного давления в гидроаккумуляторах. Вычисление чётких границ применения тех или иных типов регуляторов является объектом дальнейших исследований.

На основе разработанной структуры системы управления могут быть построены алгоритмы управления положением колёс и кузова колёсной машины в процессе движения по неровностям, что может существенно увеличить её проходимость.

Список литературы:

1. Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.Г. и др. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель / под ред. А.А. Хачатурова. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.

2. Жилейкин М.М. Повышение быстроходности многоосных колесных машин путем адаптивного управления упруго-демпфирующими элементами системы поддрессоривания: дис. ... докт. техн. наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2006. 280 с.
3. Bauer W. Hydropneumatische Federungssysteme. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 218 p. DOI: 10.1007/978-3-540-73641-7 [Бауер В. Пневмогидравлические системы поддрессоривания. Берлин, 2008. 218 с.].
4. Жилейкин М.М., Котиев Г.О., Сарач Е.Б. Экспериментальное исследование нагрузочных характеристик двухкамерной пневмогидравлической рессоры подвески автомобильных платформ нового поколения средней и большой грузоподъемности // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журн. 2011. № 12. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/346642.html> (дата обращения 11.11.2013).
5. Ломакин В.О., Шумилов И.С., Щербачев П.В. Математическое моделирование электрогидравлического следящего привода высокоточного регулирования вращательного движения // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. № 10. С. 38-45.

A control system for an adaptive hydro-pneumatic spring of a wheel machine with a variable elastic characteristic

11, November 2013

DOI: 10.7463/1113.0645542

Andreev M.A., Semenov S.E.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

andreev@e10-bmstu.rua1e10@rambler.ru

The paper presents a control algorithm for an adaptive hydro-pneumatic spring with smooth changes in the elastic characteristic during the impact of various kinds of dynamic and kinematic disturbances. Analysis of the control object, which allowed to propose a common structure of the automatic control system, was performed. Particular attention was paid to description of control principles inherent to the computing device; the main constraints in the synthesis of the desired elastic properties were also emphasized. Basic options for controlling electro-hydraulic equipment, which can be used in the control system, were described; their brief comparison was conducted. The final part of the article demonstrated working capacity of the developed algorithm by testing it on a mathematical model of a hydro-pneumatic spring. The authors draw a conclusion that the developed control method has several advantages over traditional control methods and could be implemented, using a hardware base available for the domestic industry.

Publications with keywords: [control system](#), [adaptive control](#), [Suspension bracket](#), [pneumohydraulic spring](#)

Publications with words: [control system](#), [adaptive control](#), [Suspension bracket](#), [pneumohydraulic spring](#)

References

1. Khachaturov A.A., Afanas'nev V.L., Vasil'ev V.G., et al. *Dinamika sistemy doroga – shina – avtomobil' – voditel'* [Dynamics of the system road - bus – car- driver]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 535 p.
2. Zhileikin M.M. *Povyshenie bystrokhodnosti mnogoosnykh kolesnykh mashin putem adaptivnogo upravleniia uprugo-dempfiruiushchimi elementami sistemy podressorivaniia. Dokt. diss.* [Increase

of speed of multiaxial wheeled machines through adaptive control of elastic damping elements of the system of cushioning. Dr. diss.], Moscow, Bauman MSTU, 2006. 280 p.

3. Bauer W. *Hydropneumatische Federungssysteme*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 218 p. DOI: 10.1007/978-3-540-73641-7

4. Zhileykin M.M., Kotiev G.O., Sarach E.B. Eksperimental'noe issledovanie nagruzochnykh kharakteristik dvukhkamernoy pnevmogidravlicheskoj resory podveski avtomobil'nykh platform novogo pokoleniya sredney i bol'shoj gruzopod'emnosti [Experimental research of loading characteristics of a two-chamber pneumo-hydraulic spring of a suspension bracket of new generation automobile platforms of average and big load-carrying capacities]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 12. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/346642.html>, accessed 11.11.2013.

5. Lomakin V.O., Shumilov I.S., Shcherbachev P.V. Matematicheskoe modelirovanie elektrogidravlicheskogo slediashchego privoda vysokotochnogo regulirovaniia vrashchatel'nogo dvizheniia [Mathematical modeling of the electrohydraulic rotary motion servo drive]. *Izvestiia VUZov. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2011, no. 10, pp. 38-45.