

Е. Б. Сарач

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ЖЕСТКОСТЕЙ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ФРАКТАЛЬНОЙ ДВУХУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ ПОДРЕССОРИВАНИЯ БЫСТРОХОДНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ

Приведено обоснование выбора соотношения жесткостей упругих элементов фрактальной двухуровневой подвески быстроходной гусеничной машины на этапе проектирования (при использовании частотного анализа колебаний массы с линейной одноопорной системой подрессоривания).

E-mail: sarach@yandex.ru

**Ключевые слова:** система подрессоривания, подвеска, гусеничная машина, транспортная машина, релаксационная подвеска, фрактальная подвеска, плавность хода.

Воздействие неровностей пути (кинематическое возмущение) на движущуюся быстроходную гусеничную машину (БГМ) характеризуется широким частотным диапазоном. При решении задачи обеспечения плавности хода, как правило, рассматривают возмущения в полосе 0...25 Гц [1]. Кроме этого на корпус гусеничной машины передаются силовые возмущения (в том же диапазоне): от взаимодействия гусеничного движителя и опорного основания. Установленное на БГМ вооружение также вызывает колебания корпуса машины.

В результате многолетнего опыта создания гусеничных машин установлено, что традиционными техническими решениями (рис. 1, а) добиться существенного улучшения плавности хода гусеничной машины, а следовательно, и быстроходности при движении по неровно-

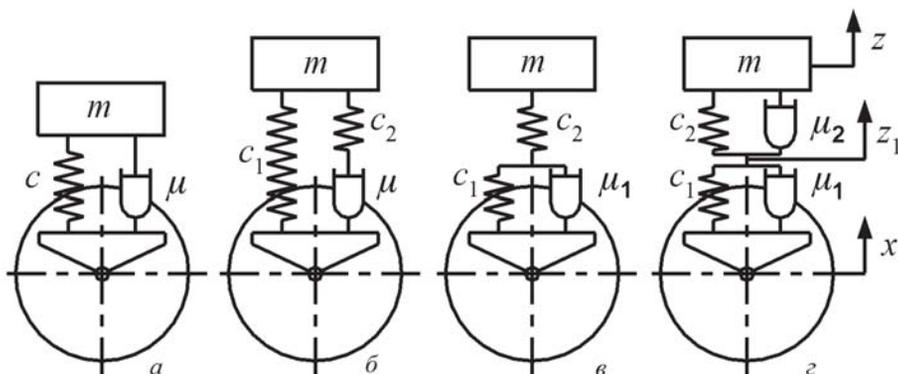


Рис. 1. Эквивалентные схемы одноопорных подвесок:

а — традиционная (одноуровневая); б и в — релаксационная с параллельным и последовательным соединением дополнительного упругого элемента; г — фрактальная двухуровневая

стям пути невозможно. Это объясняется увеличением сопротивления амортизаторов системы поддрессоривания, что дает выигрыш лишь в резонансной по колебаниям корпуса частотной области. В зарезонансной высокочастотной области колебаний установка таких амортизаторов крайне негативно сказывается на плавности хода гусеничной машины, так как резко возрастают ускорения тряски.

В этой связи дальнейшее повышение средней скорости требует применения нетрадиционных систем поддрессоривания: регулируемых (с переменными параметрами) и нерегулируемых. В работах [2–4] показано, что таковыми нерегулируемыми системами поддрессоривания являются многоуровневые подвески релаксационного и фрактального типов.

Подвеска релаксационного типа (рис. 1, б) имеет два упругих элемента и амортизатор [1, 2]. Один упругий элемент помещен между корпусом и катком последовательно с амортизатором и образует с ним так называемый релаксационный элемент. Второй упругий элемент соединяет корпус и каток параллельно релаксационному элементу и выполняет роль основного упругого элемента подвески.

Фрактальная подвеска состоит из ряда последовательно соединенных упругодемпфирующих элементов. На рис. 1, г приведена эквивалентная схема фрактальной двухуровневой подвески. Термин фрактал (лат. *frangere* — ломать, лат. *fractus* — дробный) впервые введен в 1975 г. Бенуа Мандельбротом — основоположником фрактальной геометрии [5]. Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому [6]. Поскольку каждый дробный элемент фрактальной подвески подобен всей подвеске в целом, то авторы работы [4] выбрали именно эту терминологию для обозначения таких подвесок.

Ввиду того что в многоуровневых системах поддрессоривания на различных частотах работают разные упругодемпфирующие элементы, машина, оснащенная такой подвеской, способна двигаться в самых разнообразных дорожных условиях с высокой плавностью хода. Однако аналитически подобрать параметры многоуровневой системы поддрессоривания невозможно из-за сложной взаимосвязи упругих и демпфирующих элементов, входящих в такую подвеску.

В работе [2] рассмотрена линейная релаксационная подвеска, а ее коэффициент демпфирования предложено выбирать по максимальному декременту затухания свободных колебаний поддрессоренной массы. При этом диапазон соотношения жесткостей упругих элементов должен быть таким, чтобы процесс движения поддрессоренной массы оставался колебательным. В заключение показано, что при релаксационной системе поддрессоривания путем постановки более мощных амортизаторов по сравнению с традиционной системой поддрессоривания значительно уменьшается амплитуда угловых колебаний корпуса

на резонансных и зарезонансных режимах движения машины при сохранении значений вертикальных ускорений на мелких неровностях при максимальных скоростях движения в допустимых пределах.

В работе [4] соотношения жесткостей упругих элементов и коэффициентов сопротивления амортизаторов соседних уровней фрактальной многоуровневой подвески выбираются следующим образом:

$$\frac{c_{i+1}}{c_i} = \eta, \quad \frac{\mu_i}{\mu_{i+1}} = \alpha, \quad (1)$$

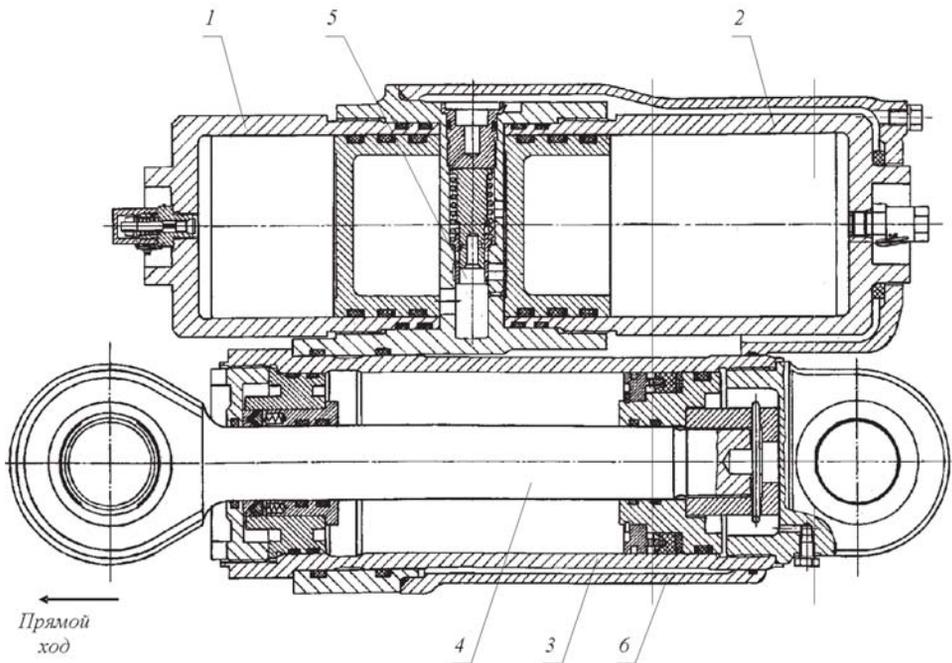
где  $\eta\alpha > 1$ .

В работе [3] проведено исследование линейной фрактальной двухуровневой системы подрессоривания гусеничной машины и показано, что если устремить к нулю коэффициент сопротивления амортизатора, соответствующий упругому элементу высокой жесткости, то фрактальная двухуровневая подвеска будет иметь свойства релаксационной подвески — невозрастание ускорений тряски с увеличением частоты возмущающего воздействия. Такую подвеску (рис. 1, в) также называют релаксационной с последовательным соединением дополнительного упругого элемента (по данным работ ВАБТВ).

Однако существуют элементы системы подрессоривания БГМ, которые по своим характеристикам могут быть названы устройствами фрактального типа. Например, пневмогидравлическая рессора (ПГР) с двумя ступенями давления (рис. 2) является двухуровневой ПГР фрактального типа. В этой конструкции добиться нулевого коэффициента сопротивления амортизатора, соответствующего уровню высокой жесткости, невозможно из-за наличия сопротивлений в трубопроводе, соединяющем цилиндры ПГР. Поэтому настоящая статья посвящена вопросу выбора соотношения жесткостей упругих элементов фрактальной двухуровневой подвески, коэффициент сопротивления амортизатора которой, соответствующий упругому элементу высокой жесткости, не равен нулю.

Для выявления общих, полезных для практических расчетов закономерностей рассмотрим линейные одноопорные системы подрессоривания. При анализе используем амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) вынужденных колебаний, как наиболее полно отражающие свойства одноопорных систем подрессоривания [2].

Пусть на двухуровневую подвеску (рис. 1, з) со стороны неровностей дороги действует кинематическое возмущение  $x$ , заданное гармонической функцией времени  $t$  с частотой  $\omega$ , радиан/с, и амплитудой  $h/2$ , где  $h$  — высота встречающихся периодических неровностей местности. Тогда амплитуда установившихся вертикальных колебаний подрессоренной массы  $m$  при допущении, что связь катка с грунтом не нарушается и ход подвески не ограничен, будет вычисляться по формуле [3]:



**Рис. 2. Конструкция ПГР с двумя ступенями давления:**

1 и 2 — пневмоцилиндры высокой и низкой жесткости; 3 — гидроцилиндр; 4 — шток с поршнем; 5 — дросселирующая система; 6 — кожух рубашки охлаждения рессоры

$$A_Z = \frac{h}{2} \times \sqrt{\frac{[c_1 c_2 - \mu_1 \mu_2 \omega^2]^2 + \omega^2 [c_1 \mu_2 + c_2 \mu_1]^2}{[c_1 c_2 - (m(c_1 + c_2) + \mu_1 \mu_2) \omega^2]^2 + \omega^2 [c_1 \mu_2 + c_2 \mu_1 - m(\mu_1 + \mu_2) \omega^2]^2}}, \quad (2)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — жесткости первого и второго упругих элементов;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — коэффициенты сопротивления амортизаторов.

Поскольку многоуровневые системы подрессоривания позволяют снизить ускорения тряски в зарезонансной области, получаем выражения для амплитуд ускорений вынужденных колебаний подрессоренной массы, умножая уравнение (2) на квадрат частоты возмущения:

$$A_{\ddot{z}} = \omega^2 \frac{h}{2} \times \sqrt{\frac{[c_1 c_2 - \mu_1 \mu_2 \omega^2]^2 + \omega^2 [c_1 \mu_2 + c_2 \mu_1]^2}{[c_1 c_2 - (m(c_1 + c_2) + \mu_1 \mu_2) \omega^2]^2 + \omega^2 [c_1 \mu_2 + c_2 \mu_1 - m(\mu_1 + \mu_2) \omega^2]^2}}. \quad (3)$$

Используя выражения (2) и (3), получаем АЧХ по перемещению и ускорению для фрактальной двухуровневой подвески, параметры которой определяются в соответствии с уравнением (1). Исследуем подвески с различными соотношениями жесткостей упругих элементов  $\eta = c_2/c_1$ , при этом принимаем допущение, что соотношение коэффициентов сопротивления амортизаторов  $\alpha = \mu_1/\mu_2$  равняется  $\eta$ .

Выбирать остальные характеристики элементов двухуровневых подвесок, таких как жесткость основного упругого элемента  $c_1$  и коэффициент сопротивления амортизатора  $\mu_1$ , будем сравнивая их с характеристиками традиционной подвески. Амплитуду перемещений и ускорений подрессоренной массы с традиционной подвеской легко получить, устремляя  $\mu_2$  к бесконечности в выражениях (2) и (3).

Анализируя АЧХ вынужденных колебаний одноопорных систем, отметим, что графики имеют один явно выраженный максимум на резонансной частоте, по которому и определяется качество системы подрессоривания в резонансной области. Учитывая это свойство, параметры исследуемых подвесок будем подбирать таким образом, чтобы максимумы их АЧХ на резонансной частоте совпадали. Это позволит сделать вывод, что БГМ, оснащенные исследуемыми системами подрессоривания, в резонансном режиме движения будут иметь одинаковую плавность хода.

Таким образом, были получены характеристики фрактальных двухуровневых подвесок для  $\eta = 2, 3, 4, 5, 6, 8$  и параметры соответствующей им традиционной подвески.

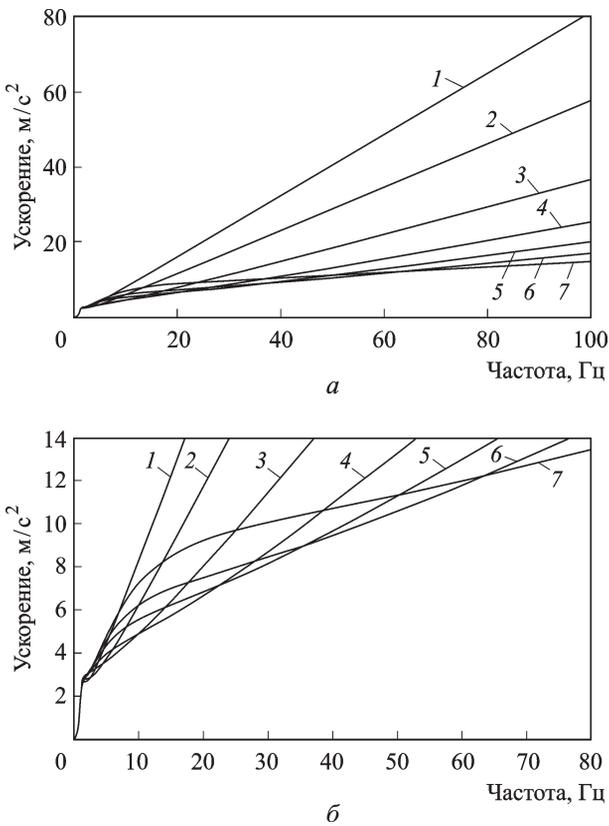
Полученные характеристики подвесок сведены в табл. 1, а АЧХ по ускорению для высот неровностей, вызывающих тряску ( $h = 0,05$  м), представлены на рис. 3. Для удобства здесь и далее частота на графиках указана в герцах.

Таблица 1

### Характеристики элементов одноопорных подвесок

Традиционная подвеска						
$m$ , кг (для всех подвесок)	3000					
$c$ , кН/м	160					
$\mu$ , кН·с/м	15,5					
Фрактальная двухуровневая подвеска						
$\eta = c_2/c_1$	2	3	4	5	6	8
$c_1$ , кН/м	210	180	170	170	170	170
$c_2$ , кН/м	420	540	680	850	1020	1360
$\mu_1$ , кН·с/м	33	28	24	22,3	21	19,7
$\mu_2$ , кН·с/м	16,5	9,333	6,0	4,46	3,5	2,463

Из графиков (см. рис. 3) видно, что для различных соотношений жесткостей упругих элементов  $\eta = c_2/c_1$ , рост ускорения в зарезонансной области с повышением частоты возмущающего воздействия происходит по-разному. Подвеска с  $\eta = 2$  в зарезонансной области до частоты 5 Гц вызывает меньшие ускорения тряски, чем подвески с



**Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики по ускорению для традиционной и фрактальной двухуровневой подвески:**

*a* — полный график; *б* — фрагмент графика; 1 — традиционная подвеска; 2... 7 — фрактальная двухуровневая подвеска с  $\eta = 2, 3, 4, 5, 6$  и 8 соответственно

другими значениями  $\eta$ . Подвеска с  $\eta = 3$  вызывает меньшие ускорения при частотах от 5 до 10 Гц, подвеска с соотношением жесткостей  $\eta = 4$  вызывает меньшие ускорения при частотах от 10 до 23 Гц, подвеска с  $\eta = 5$  вызывает меньшие ускорения при частотах от 23 до 36 Гц и т.д. На всех подвесках данного типа ускорения с увеличением частоты возрастают, вследствие того, что  $\mu_2 \neq 0$ . Если  $\mu_2 = 0$ , ускорение с повышением частоты возрастать не будет, но, как отмечалось ранее, добиться этого сложно с конструктивной точки зрения.

В работе [4] сказано, что  $c_2/\mu_2 = \omega_2$  — частота, до которой работает второй фрактальный элемент подвески. Вычислим значения данных частот для исследуемых подвесок, учитывая, что при принятых допущениях  $\omega_2 = \eta^2 c_1/\mu_1$ . Полученные значения частот представлены в табл. 2.

Сравнивая значения частот, полученных расчетным путем и графически, можно сделать вывод, что они коррелируют между собой.

Таким образом, изменяя соотношения жесткостей упругих элементов  $\eta$ , можно подобрать подвеску, эффективно снижающую ускорения

Значения граничных частот фрактальных двухуровневых подвесок

$\eta = c_2/c_1$	2	3	4	5	6	8
$\nu_2 = \omega_2/2\pi$ , Гц	4,05	9,21	18,0	30,3	46,4	87,9

тряски в определенной области частот. Например, в диапазоне частот 2...25 Гц, характерном для движения БГМ в резонансной области [1], достаточно фрактальной двухуровневой подвески с  $\eta = 4,5$ . Кроме того, можно отметить, что применение фрактальных подвесок с  $\eta < 3$  и  $\eta > 5$  нецелесообразно, так как  $\eta < 3$  дает незначительное расширение частотной области, а  $\eta > 5$  требует применения упругих элементов высокой жесткости, что сложно выполнить конструктивно. Следовательно, расширение частотного диапазона более 36 Гц требует применения фрактальной трехуровневой подвески.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев А. А., Чобиток В. А., Тельминов А. В. Теория и расчет нелинейных систем поддрессирования гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1976. – 207 с.
2. Дмитриев А. А. Теория и расчет линейной релаксационной системы поддрессирования // Вопросы поддрессирования танка и бронетранспортера – М.: ВА БТВ, 1959. – С. 46–76. (Труды семинара кафедры № 15).
3. Котиев Г. О., Сарач Е. Б., Сухоруков А. В. Повышение плавности хода транспортных машин путем использования системы поддрессирования с “нецелым числом степеней свободы” // Изв. вузов. Машиностроение. – 2002. – № 7. – С. 40–45.
4. Oustaloup A., Moreau X., Nouillant M. The CRONE suspension // Control Engineering Practice: Journal of the International Federation of Automatic Control. 1996. – Vol 4. No. 8. – P. 1101–1108.
5. Кроновер Р. М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории: Учебное пособие / Пер. с англ. Т.Э. Кренкиля, А.Л. Соловейчика; Под ред. Т.Э. Кренкиля. – М.: Постмаркет, 2000 – 350 с.
6. Федер Е. Фракталы / Пер. с англ. Ю.А. Данилова, А. Шукурова. – М.: Мир, 1991. – 260 с.

Статья поступила в редакцию 20.10.2009

Евгений Борисович Сарач родился в 1975 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1999 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 16 научных работ в области динамики управляемого движения, систем поддрессирования и тяговой динамики транспортных машин.

Ye. B. Sarach (b. 1975) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1999. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Multipurpose Caterpillar Vehicles and Mobile Robots” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 16 publications in the field of dynamics of controlled motion, systems of cushioning and traction dynamics of vehicles.

