Оптимизация режима движения автомобиля по разбитой грунтовой дороге с целью сохранности перевозимого груза

Иванкина Ольга Петровна, *кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Физика и прикладная механика» Рязанский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет»), 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская д.26/53, Рязанский институт (филиал) Университета машиностроения.*

Лебедев Борис Сергеевич, *кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Физика и прикладная механика» Рязанский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет»), 390000, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская д.26/53, Рязанский институт (филиал) Университета машиностроения.*

Ключевые слова: транспортировка грузов, вынуждение колебания автомобиля, микропрофиль дороги, динамическая модель автомобиля, вычислительный эксперимент.

В статье рассматриваются вынужденные колебания автомобиля. Получены дифференциальные уравнения вынужденных колебаний автомобиля, которые использованы для оптимизации скоростного режима движения транспортного средства, необходимого для обеспечения сохранности перевозимых грузов.

Optimization of the driving mode of the vehicle on bumpy dirt road for safety the cargo transported

Keywords: cargo transportation, forced vibrations of the car, the surface profile of the road, a dynamic model of the car, computational experiment.

The article deals with forced oscillations of the car. The differential equation of forced oscillations of the vehicle, which is used to optimize speed of movement of the vehicle, needed to ensure the safe delivery of goods.

Транспортирование картофеля и овощей в сельском хозяйстве производится в основном неприспособленными для этих целей транспортными средствами – тракторными прицепами и автомобилями. Одним из источников повреждения клубней картофеля и овощей является, в частности, вибрации, возникающие непосредственно в процессе транспортирования из-за неровностей дорожного полотна.

Так по статистическим данным более 80% дорог общего пользования не соответствуют требованиям по ровности дорожного покрытия. Это обусловлено целым рядом причин и, прежде всего, недостаточным финансированием на ремонт дорог и разрешением движения автомобилям по всем типам дорог с осевой нагрузкой 10 тонн.

Разработка методики оптимизации скоростного режима движения автомобиля с точки зрения сохранности груза (картофеля) является весьма актуальной задачей.

Рассмотрим случайные колебания автомобиля, который движется в течение достаточно большого промежутка времени по статически однородному участку дороги. При этом возбуждения от микропрофиля дороги представляет собой стационарный случайный процесс [1].

При выборе расчетной модели вводятся следующие допущения:

Автомобиль симметричен относительно продольной плоскости, поэтому рассмотрим плоскую

модель (рисунок 1).

Подрессоренные и неподрессоренные массы представляют собой недеформированные тела. Силы упругости, действующие в системе, пропорциональны деформации упругих элементов (шин, подвески автомобиля). Силы сопротивления пропорциональны первой степени скорости смещения масс [2].

Микропрофиль опорной поверхности дороги, по которой движется автомобиль, описывается уравнением (1) [3,4]

$$h = h_0\left(1 - \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{l_0}\right)\right), \quad (1)$$

где x = vt (v - скорость движения автомобиля).

Рассматриваемая система совершает сложное движение, представляющее собой результат наложения свободных и вынужденных колебаний. Для исследования движения выберем декартову Oxy систему координат жестко связанную с рамой автомобиля, начало системы поместим в центре тяжести автомобиля.

Положение системы определяется однозначно обобщенными координатами:

y_1, y_2 - вертикальные перемещения неподрессоренных масс соответственно переднего и заднего мостов автомобиля;

y_3 - вертикальные перемещения подрессоренных масс автомобиля, - угловое перемещение рамы автомобиля (рисунок 1).

Уравнения колебаний автомобиля составим в форме уравнений Лагранжа второго рода [5]

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = -\frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} \quad (2)$$

где T и П – кинетическая и потенциальная энергии системы;

Ф – диссипативная функция Релея;

q_i - обобщенные координаты системы;

i = 1,2,3,4 – число степеней свободы, рассматриваемой динамической системы.

Для рассматриваемой динамической модели кинетическая энергия колебаний имеет вид

$$T = \frac{1}{2}(m_3 + m_4)v^2 + \frac{1}{2}I_0\dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}(m_3 + m_4)\dot{y}_3^2, \quad (3)$$

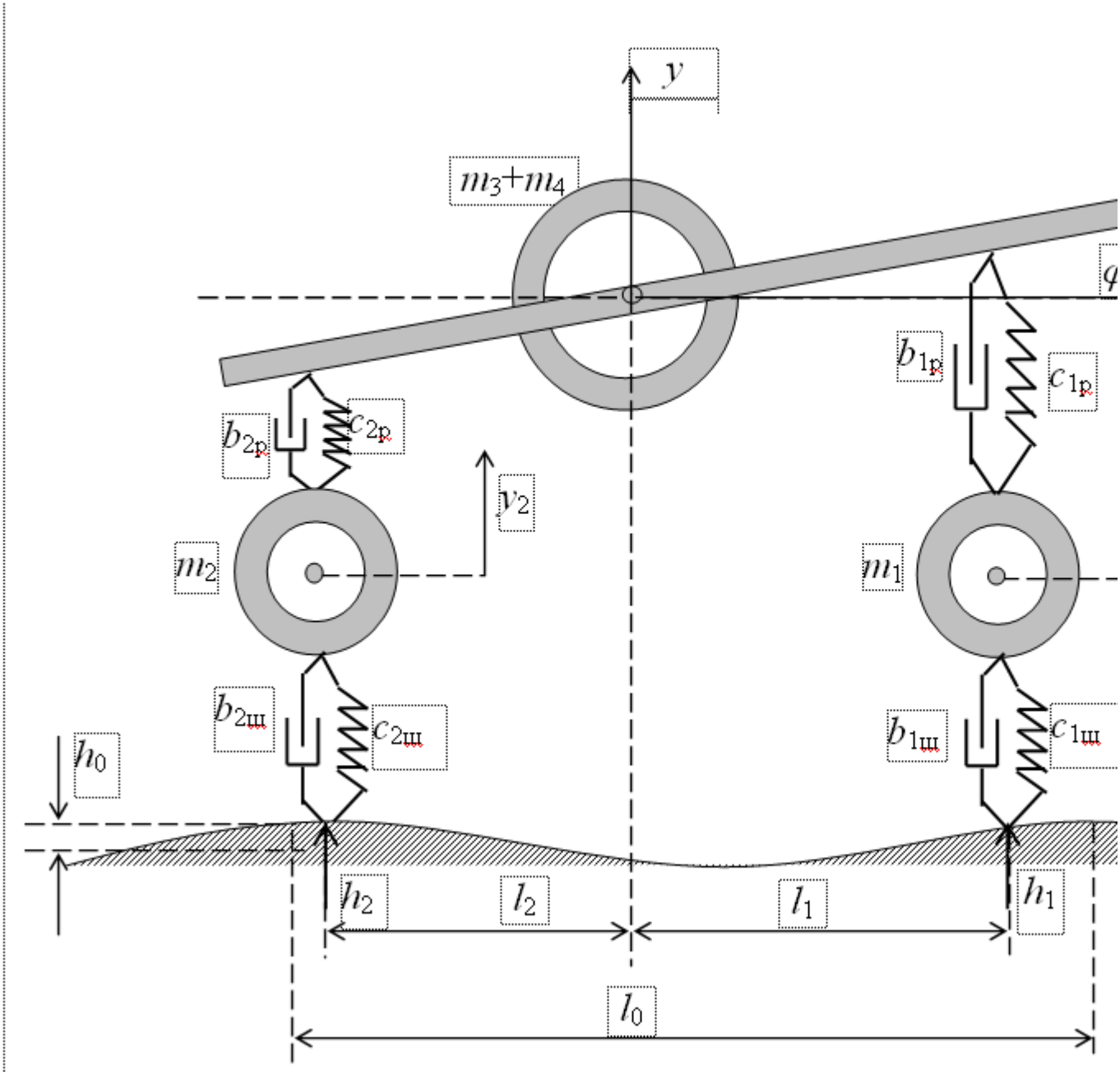

Рисунок 1 – Расчетная модель колебаний автомобиля при воздействии дорожных неровностей

где m_1 и m_2 - неподрессоренные массы автомобиля (массы переднего и заднего мостов);

m_3 – снаряженная масса автомобиля;

m_4 - масса груза (картофельный ворох);

I_0 - момент инерции относительно центральной поперечной оси; v - скорость движения автомобиля.

Потенциальная энергия деформации упругих элементов

$$\Pi = \frac{c_{1Ш}ш}{2}(y_1 - h_1)^2 + \frac{c_{2ш}}{2}(y_2 - h_2)^2 + \frac{c_{1р}}{2}(y_3 + \varphi \cdot l_1 - y_1)^2 + \frac{c_{2р}}{2}(y_3 - \varphi \cdot l_2 - y_2)^2. \quad (4)$$

где $c_{1ш}$, $c_{2ш}$, $c_{1р}$, $c_{2р}$ - жесткости шин и подвески автомобиля переднего и заднего мостов;

h_1 и h_2 - профиль дороги соответственно под передним и задним колесами автомобиля.

Учитывая, что положение автомобиля на дороге определяется координатой x = vt, а расстояние между осями машины $L = l_1 + l_2$, получаем

$$h_1 = h_0\left(1-\cos\left(\frac{2\pi\cdot v\cdot t}{l_0}\right)\right), \quad h_2 = h_0\left(1-\cos\left(\frac{2\pi(v\cdot t+l)}{l_0}\right)\right). \quad (5)$$

Диссипативная функция Релея для рассматриваемой системы имеет вид

$$\Phi = \frac{b_{1ш}}{2}\left(\dot{y}_1-\dot{h}_1\right)^2 + \frac{b_{2ш}}{2}\left(\dot{y}_2-\dot{h}_2\right)^2 + \frac{b_{1p}}{2}\left(\dot{y}_3+\dot{\varphi}\cdot l_1-\dot{y}_1\right)^2 + \frac{b_{2p}}{2}\left(\dot{y}_3-\dot{\varphi}\cdot l_2-\dot{y}_2\right)^2. \quad (6)$$

где $b_{1ш}$, $b_{2ш}$, b_{1p}, b_{2p} - коэффициенты сопротивления шин и амортизаторов подвески автомобиля.

Подставляя (3), (4) и (6) в уравнения Лагранжа (2), получим дифференциальные уравнения вынужденных колебаний автомобиля

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + \left(b_{1ш}+b_{1p}\right)\dot{y}_1 - b_{1p}l_1\dot{\varphi} - b_{1p}\dot{y}_3 + \left(c_{1ш}+c_{1P}\right)y_1 - c_{1p}l_1\varphi - c_{1p}y_3 \\ \qquad = b_{1ш}h_0\dfrac{2\pi v}{l_0}\sin\left(\dfrac{2\pi vt}{l_0}\right) + c_{1ш}h_0\left(1-\cos\left(\dfrac{2\pi vt}{l_0}\right)\right); \\ m_2\ddot{y}_2 + \left(b_{2ш}+b_{2p}\right)\dot{y}_2 + b_{2P}l_2\dot{\varphi} - b_{2p}\dot{y}_3 + \left(c_{2ш}+c_{2p}\right)y_2 + c_{2p}l_2\varphi - c \\ \qquad = b_{2ш}h_0\dfrac{2\pi v}{l_0}\sin\left(\dfrac{2\pi(vt+L)}{l_0}\right) + c_{2ш}h_0\left(1-\cos\left(\dfrac{2\pi(vt+L)}{l_0}\right)\right); \\ \left(m_3+m_4\right)\ddot{y}_3 + \left(b_{1p}+b_{2p}\right)\dot{y}_3 + \left(b_{1p}l_1 - b_{2p}l_2\right)\dot{\varphi} - b_{2p}\dot{y}_2 + b_{1p}\dot{y}_1 + \\ \qquad + \left(c_{1p}+c_{2p}\right)y_3 + \left(c_{1p}l_1 - c_{2p}l_2\right)\varphi - c_{2p}y_2 + c_{1p}y_1 = 0; \\ I_0\ddot{\varphi} + \left(b_{1p}l_1^2 - b_{2p}l_2^2\right)\cdot\dot{\varphi} - b_{1p}l_1\dot{y}_1 - b_{2p}l_2\dot{y}_2 + \left(b_{1p}l_1 + b_{2p}l_2\right)\dot{y}_3 + \\ \qquad + \left(c_{1p}l_1^2 - c_{2p}l_2^2\right)\cdot\varphi - c_{1p}l_1y_1 - c_{2p}l_2y_2 + \left(c_{1p}l_1 + c_{2p}l_2\right)y_3 = 0. \end{cases}$$

(7)

Полученные уравнения описывают вынуждение колебания при движении автомобиля. Первые три уравнения описывают вертикальные колебания подрессоренных и неподрессоренных масс автомобиля, а четвертое уравнение представляет собой «галопирование», при котором центр тяжести системы остается неподвижным, а угловые колебания происходят вокруг этой точки.

Интегрирование системы уравнений (7) проведено на ПК с применение пакета математических программ MathCAD. Зависимость перемещения центра масс от времени y(t) получена с помощью встроенной функции rkfixed, а спектральная плотность - с помощью функции cfft.

На рисунках 2 и 3 показаны характер колебаний центра масс автомобиля и спектральная плотность данного колебательного процесса автомобиля МАЗ – ММЗ – 554 при следующих параметрах: m_1 = 500 кг, m_2 = 800 кг, m_3 = 4270 кг,

m_4 = 3200 кг, I_0 = 30000 кг, $c_{1р}$ = 580 кН/м, $c_{2ш}$ = 680 кН/м, моста $c_{2р}$ = 250 кн/м,

$c_{2р}$ = 12 кНс/м, $b_{1ш}$ = 12 кНс/м, $b_{2ш}$ = 12кН/м, $b_{1р}$ = 16 кН/м, $b_{2р}$ = 22,5 кН/м,

l_1 =2,47м, l_2 = 1,33 м, h_0 = 0,1м, v = 6 м/с.

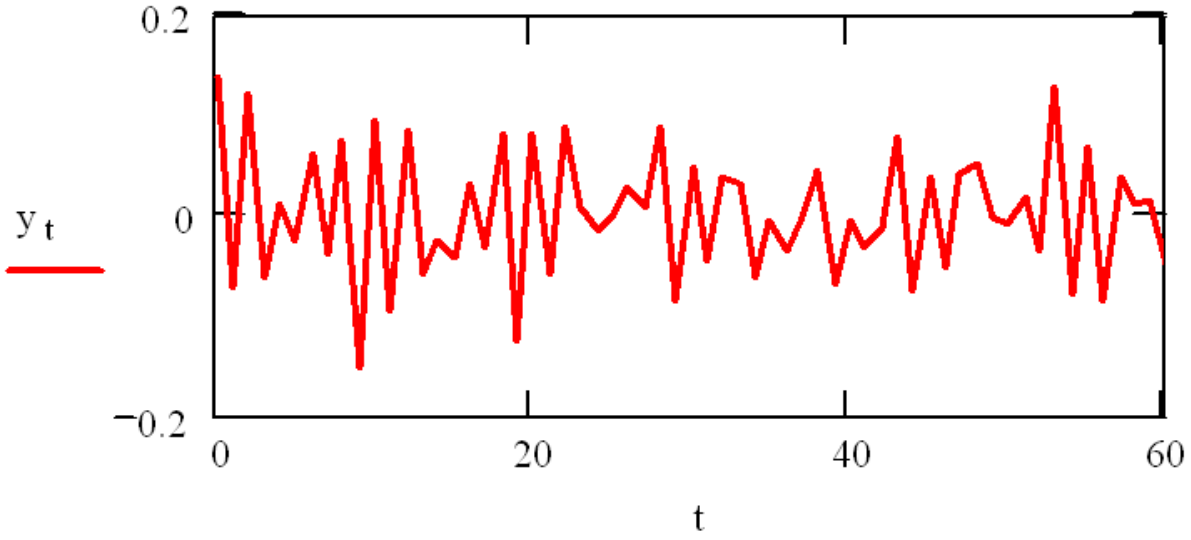

Рисунок 2 – Колебания центра масс автомобиля

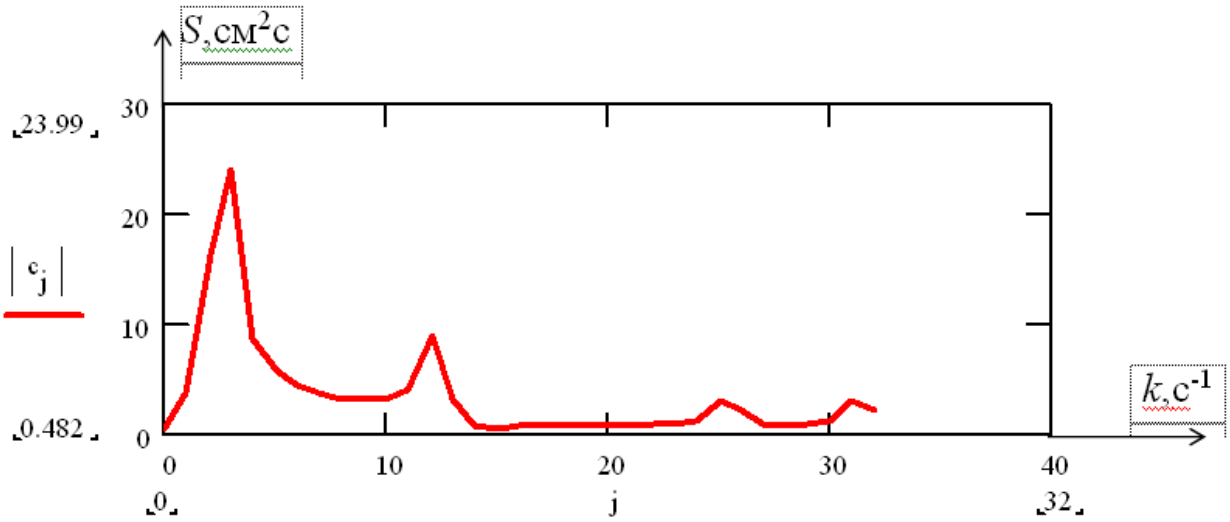

Рисунок 3 – Спектральная плотность колебательного процесса центра масс автомобиля

Как видно из рисунка 3 на частотах 2…4 и 12…15 спектральная плотность достигает максимального значения. Для того чтобы уменьшить максимальное значение спектральной плотности проведем непосредственно на математической модели (6) вычислительный эксперимент с применением методов планирования эксперимента.

В качестве факторов примем x_1 – жесткость шины, x_2 – жесткость рессоры, x_3 – скорость движения автомобиля.

За параметр оптимизации примем максимальное значение спектральной плотности y.

Уравнение модели будем искать в виде

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

	Жесткость шины, x_1, кН/м	Жесткость рессоры, x_2, кН/м	Скорость движения x_3, м/с
Основной уровень	600	550	5,5
Интервал варьирования	100	350	3
Верхний уровень	700	900	8,5
Нижний уровень	500	200	2,5

Таблица 2 – План и результаты вычислительного эксперимента

№ опыта	Факторы			Отклик
	x_1	x_2	x_3	y см/с^2
1	+	+	+	29,42
2	-	+	+	25,38
3	+	-	+	17,53
4	-	-	+	22,48
5	+	+	-	19,37
6	-	+	-	10,32
7	+	-	-	15,63
8	-	-	-	11,55

После определения коэффициентов уравнения регрессии методом наименьших квадратов, проверки их на значимость и проверки адекватности уравнения регрессии примет вид

$$y = 18,96 + 1,53x_1 + 2,16x_2 - 2,05x_3$$

Полученное уравнение показывает, что наибольшее влияние на параметр оптимизации оказывают скорость движения автомобиля и жесткость рессоры и в меньшей степени жесткость шины.

Используем полученное уравнение для определения оптимальных параметров рессоры, шины и скорости движения автомобиля.

Оптимизацию проведем методом наискорейшего спуска (градиентный метод). Градиентный метод изложен в таблице 3.

Таблица 3 – Градиентный метод

	x_1, кН/м	x_2, кН/м	x_3, м/с	у смс^2
Основной уровень	600	550	5,5	
Интервал варьирования, x_i	100	350	3	
Верхний уровень	700	900	8,5	
Нижний уровень	500	200	2,5	
Коэффициенты уравнения	1,53	2,16	2,05	
$x_i b_i$	153	754	6,15	
Шаг	15,3	75,4	0,615	
Округление	15,0	75,0	0,6	
Вычисление отклика 1	585	475	6,1	23,98
2	570	400	6,7	19,73
3	555	325	7,3	14,42
4	540	250	7,9	12,39
5	525	175	8,5	8,97
6	510	100	9,1	6,6

На рисунке 4 показан результат шестого вычисления спектральной плотности перемещения центра масс автомобиля.

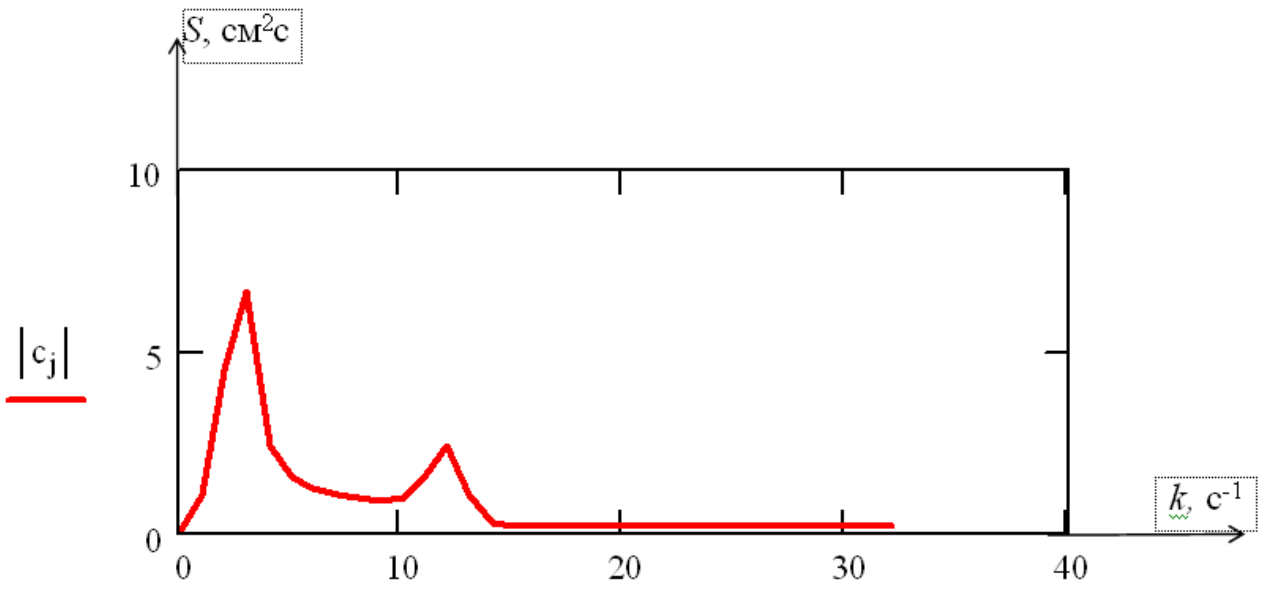

Рисунок 4 – Вычисление 6

Наилучший результат, проведенного вычислительного эксперимента получен в 5 и 6 вычислениях при следующих факторах:

- жесткость шины – 510…525 кН/м;

- жесткость рессоры – 110…175 кН/м;

- скорость движения автомобиля – 8,5…9,1 м/с или 31…33 км/ч.

Вывод

Используя предложенную методику для конкретных участков с определенной ровностью возможен выбор автомобиля с требуемыми или близкими характеристиками подвески и, что самое главное, определить оптимальный скоростной режим движения для обеспечения сохранности перевозимых грузов.

Литература

1. Лебедев Б.С., Медведев Е.В. Иванкина О.П. Пространственная модель системы подрессоривания автомобиля. Международный сборник научных трудов «Новые технологии в науке, образовании, производстве». Материалы международной научно-практической конференции 20 – 23 декабря 2014 г. /– Рязань: Изд-во ЧОУ ВО РИБиУ, 2015. С 443 … 449

2. Лебедев Б.С., Паршков А.В. Иванкина О.П. Особенность воздействия микропрофиля грунтовой дороги на скоростной режим движения автомобиля . Международный сборник научных трудов «Новые технологии в науке, образовании, производстве». Материалы международной научно-практической конференции 20 – 23 декабря 2014 г. /– Рязань: Изд-во ЧОУ ВО РИБиУ, 2015. С 450 … 453

3. Иванкина О.П., Лебедев Б.С., Особенности виброизоляции при упругой подвеске машин. Наука и образование XXI века: Материалы IX – й международной научно-практической конференции, том 1, 30 октября 2015 г., СТИ, г. Рязань/ под ред. А.Г. Ширяева, А.Д. Кувшинниковой; Негос. обр. учр-е высш. проф. образ-я «Совр. техн. ин-т». – Рязань, 2015. – 192 с. – ISBN 978-5-904221-16-4., С 35-37

4. Иванкина О.П., Лебедев Б.С. Метод оценки ровности грунтовой дороги. NovaInfo.Ru (Электронный журнал.) – 2015 г. – № 34; URL

5. Яблонский А.А. Курс теоретической механики: учебник – 15 – е изд., стер. –М.: КНОРУС, 2010. – 608 с.