

УДК 629.113

С.И. Малеев, С.М. Огороднов, Е.В. Степанов, А.В. Пинчин

**ОПТИМИЗАЦИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ПЕРЕДНИХ УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС
АВТОМОБИЛЯ ГАЗЕЛЬ NEXT**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена методика определения оптимальных значений кинематических характеристик поворотного устройства передних управляемых колес автомобиля с учетом вероятностного характера их изменения при случайном возмущении микропрофиля дороги. Установлено, что деформации упругого элемента подвески и обусловленные ими вертикальные перемещения колеса приводят к изменению кинематических характеристик установки управляемого колеса (угла развала и схождения). Проектирование поворотного узла (механизма) управляемого колеса автомобиля с учетом диапазона изменения кинематических характеристик при случайном возмущении микропрофиля поверхности дороги позволяет выбрать оптимальные значения углов установки управляемого колеса и увеличить долговечность шин.

Ключевые слова: угол развала, схождение, шина, колесо, качение, скольжение, возмущение, микропрофиль, дорога.

Значительную долю стоимости владения транспортным средством составляют расходы, связанные с приобретением шин, а также их сезонной смены. Помимо этого, качество и состояние шин оказывает непосредственное влияние на показатели активной безопасности: управляемость, курсовую и траекторную устойчивость, а также на проходимость автомобиля. Кинематические характеристики (угол развала и схождение) поворотного устройства передних управляемых колес существенно влияют на износ шин. При этом большее значение имеют не величины этих параметров, а их соответствие, обеспечивающее качение шины колеса без скольжения по опорной поверхности. Особую актуальность обретает в данном контексте задача выбора и обоснования оптимальных кинематических характеристик поворотного устройства и установки колеса. При ее решении должен быть выполнен анализ: соответствия углов установки колеса по условиям качения шины без относительного скольжения с учетом бокового увода шины при статической нагрузке; влияния динамических возмущений при движении в реальных дорожных условиях на кинематические характеристики подвески (изменение углов установки и колеи управляемых колес в диапазоне наиболее вероятных деформаций подвески).

В настоящей статье представлена методика определения оптимальных значений кинематических характеристик поворотного устройства передних управляемых колес автомобиля с учетом вероятностного характера их изменения при случайном возмущении микропрофиля дороги.

Соответствие углов установки колеса (развала и схождения) при выполнении условия качения шины без скольжения относительно опорной поверхности при статической нагрузке в прямолинейном движении определяется в соответствии с выражением (1):

$$\Delta u_{\alpha} = -\Delta u_{\gamma}, \quad (1)$$

где Δu_{α} – деформация шины вдоль оси Y при вращении колеса за счет «схождения» колес (рис. 1); Δu_{γ} – кинематический увод, обусловленный деформацией шины при вращении колеса за счет «угла развала» колес (рис. 2), α – «угол схождения» (рис. 1), γ – угол развала (рис. 2).

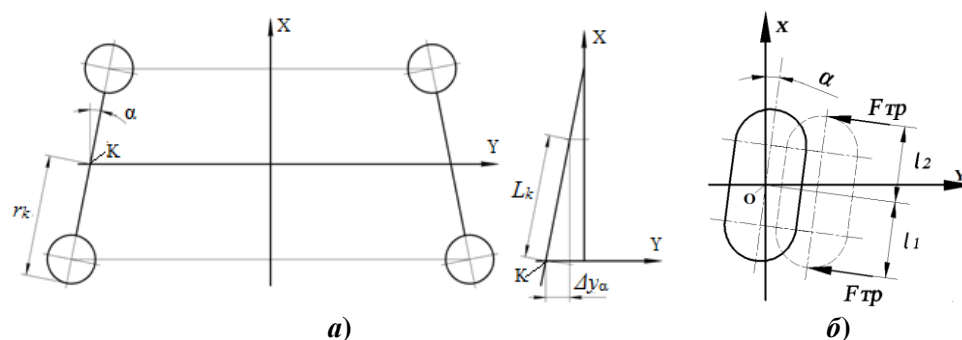


Рис. 1. Схема установки управляемых колес со схождением:
а) – деформация шины, б) – действующие силы

Деформация шины за один оборот колеса при установке управляемых колес со «схождением», при отсутствии относительного скольжения шины по опорной поверхности (рис. 1б), определяются в соответствии с выражениями (2):

$$\Delta y_\alpha = L_k \alpha, \quad \alpha = \arcsin \frac{(B-A)}{4r_k}, \quad L_k = 2\pi r_k, \quad (2)$$

где L_k – расстояние, на которое переместится точка K контакта колеса с опорной поверхностью за один оборот колеса; α – «угол схождения»; A, B – расстояния, определяемые при измерении схождения колес; r_k – радиус качения колеса; X – продольная ось автомобиля; Y – ось передних колес автомобиля.

При этом в контакте колеса с опорной поверхностью, за счет смещения пятна контакта вдоль оси X и изменения соотношения плеч l_1, l_2 сил трения $F_{тр}$, возникает момент, поворачивающий колесо (пятно контакта) относительно вертикальной оси по часовой стрелке (рис. 1б).

Деформация шины за один оборот колеса при установке управляемых колес с развалом равна (3):

$$\Delta y_\gamma = L_k \frac{\gamma}{k_\gamma}, \quad (3)$$

где Δy_γ – деформация шины за один оборот колеса при установке управляемых колес с углом развала; γ – угол развала; k_γ – коэффициент сопротивления боковому уводу шины колеса; $k_\gamma=4\dots6$.

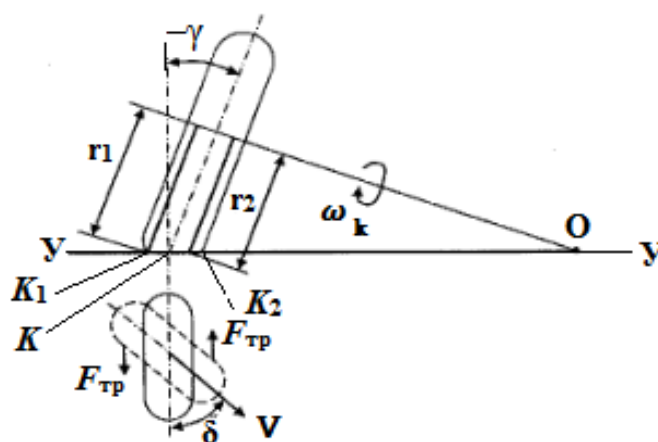


Рис. 2. Схема увода управляемого колеса, установленного с развалом

В контакте колеса с опорной поверхностью, установленного в соответствии с технической характеристикой автомобиля с отрицательным углом развала $-\gamma$, (рис. 2) возникает

момент, поворачивающий отпечаток относительно плоскости вращения колеса на угол δ , против часовой стрелки и компенсирующий поворот отпечатка контакта за счет угла схождения.

Допустимые значения углов схождения, обеспечивающие качение колеса без скольжения, в соответствии с выражениями (1), (3) определяются зависимостью (4):

$$\Delta y_{\alpha} = -\Delta y_{\gamma}, \quad \alpha = \frac{-Y}{k_{\gamma}}. \quad (4)$$

Расчетные значения угла схождения при возможных значениях угла развала γ при выполнении по условию качения колеса без осевой деформации (скольжения) и с учетом вариативности коэффициента сопротивления боковому уводу шины колеса k_{γ} ($k_{\gamma} = 4 \dots 6$) определяются в соответствии с выражениями (5), (6):

$$\alpha_{dmin1} = \frac{\gamma_{min}}{k_{\gamma min}}, \quad \alpha_{dmin2} = \frac{\gamma_{min}}{k_{\gamma max}}, \quad (5)$$

$$\alpha_{dmax1} = \frac{\gamma_{max}}{k_{\gamma min}}, \quad \alpha_{dmax2} = \frac{\gamma_{max}}{k_{\gamma max}}, \quad (6)$$

Где α_{dmin1} , α_{dmin2} – минимальные значения допустимых углов схождения при минимальном значении угла развала γ_{min} и соответственно минимальном и максимальном возможных значениях коэффициента сопротивления боковому уводу шины $k_{\gamma min}$, $k_{\gamma max}$, α_{dmax1} , α_{dmax2} – максимальные значения допустимых углов схождения при максимальном значении угла развала γ_{max} и соответственно минимальном и максимальном возможных значениях коэффициента сопротивления боковому уводу шины $k_{\gamma min}$, $k_{\gamma max}$.

Например, конструктивные значения углов установки управляемых колес α_k и γ_k , с учетом допустимых предельных отклонений, приведенные в технической документации автомобиля Газель Next составляют: угол развала $\gamma_k = (0^{\circ}20' \pm 15')$, $\gamma_{max} = (0^{\circ}35')$, $\gamma_{min} = (0^{\circ}05')$, угол схождения $\alpha_k = (0 \dots 7')$. Выбранные для указанного автомобиля кинематические параметры установки колес приводят к быстрому износу шин.

Расчетные допустимые значения углов схождения α по условию качения колеса без скольжения, формулы (1) – (4) при конструктивно заданных минимальном и максимальном значениях угла развала и вариациях значений коэффициентов сопротивления боковому уводу шины приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные допустимые значения углов схождения α_d автомобиля ГАЗель Next
(по условию качения колеса без скольжения)

Обозначение	Значения параметров									
	0°5'		0°35'		– 0°20'		– 0°30'		– 0°40'	
γ	0°5'		0°35'		– 0°20'		– 0°30'		– 0°40'	
k_{γ}	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
$\alpha_{d, мин}$	-0°1'15//	-0°0'50//	-0°8'45//	-0°5'50//	0°5'	0°3'20//	0°7'30//	0°5'	0°10'	0°6'40//

В соответствии с результатами расчетов выполнены построения границ области расчетных допустимых значений углов схождения α_d , в пределах которой качение колеса осуществляется без скольжения, при конструктивно установленных значениях минимальных γ_{kmin} , максимальных γ_{kmax} и рекомендованном γ_p значениях углов развала и минимальном и максимальном возможных значениях коэффициента сопротивления боковому уводу (рис. 3).

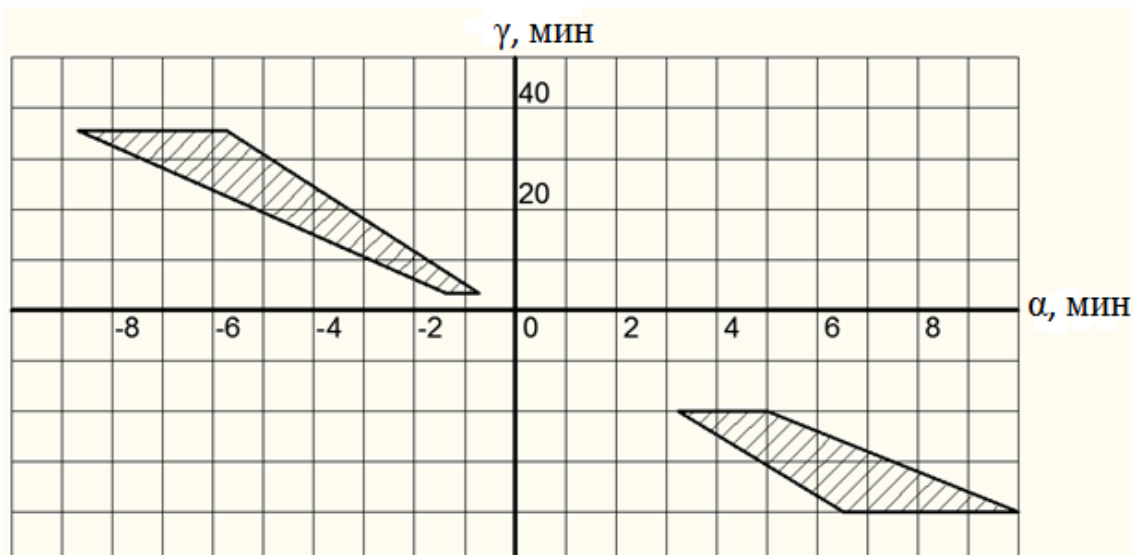


Рис. 3. Области расчетных допустимых значений углов схождения и развала:
1 - $k_{\gamma\max}$, 2 - $k_{\gamma\min}$

В результате расчетов установлено:

- условие качения колеса без скольжения при положительных значениях угла развала γ выполняется только для отрицательных значений угла схождения α , что не соответствует конструктивно заданным значениям $\alpha = (0 \dots 7/)$;
- условие качения колеса без скольжения выполняется для конструктивно заданных значений $\alpha = (0 \dots 7/)$ только при отрицательных значениях угла развала γ и для ограниченного диапазона изменения угла схождения α ;
- диапазон изменения угла схождения α , обеспечивающий выполнение условий качения колеса, расширяется при увеличении угла развала γ .

Для исследования характера изменения угла развала при деформации упругого элемента подвески в пределах от снаряженной нагрузки $f_{\text{сн}}$ до максимального динамического «прогиба» f_{max} был разработан алгоритм и реализована программа, позволяющая выполнить расчет массива параметров γ и α при первоначально установленных значениях угла развала при расчетной статической нагрузке $\gamma = -20^\circ$ с последующим увеличением его значения и интерпретировать массив графически.

На рис. 4 (кривая 1) показан график зависимости величины угла развала γ при первоначальном (конструктивно заданном) его значении под расчетной статической нагрузке $\gamma_{\text{ст}} = 20^\circ$. В этом случае с учетом возможных и наиболее вероятных деформаций упругого элемента подвески при движении по дороге отклонения угла развала от установленного для статического положения будут преимущественно находиться в области положительных значений, не соответствующих условиям качения колеса без скольжения. В случае первоначального положительного значения угла развала γ его знак меняется лишь при достаточно больших деформациях, значительно превосходящих статическую. Поэтому можно предположить, что при случайном возмущении от микропрофиля дороги существенную часть времени или пути движения значения углов развала не будут принадлежать области оптимальных значений. При отрицательных значениях угла развала имеет место тенденция сохранения отрицательного значения угла развала при колебаниях деформаций относительно положения под статической нагрузкой. В этом случае можно предположить, что условие качения колеса без скольжения (сохранение отрицательного значения угла развала γ при заданных положительных значениях угла схождения α) будет сохраняться в большем диапазоне колебаний деформации подвески относительно положения при статической нагрузке (рис. 4, кривая 2).

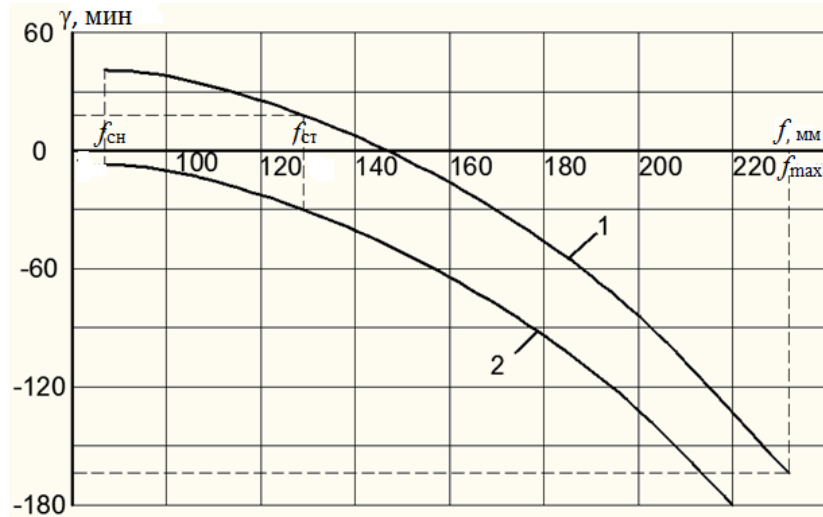


Рис. 4. Зависимость угла развала колеса от деформации подвески:
1 - $\gamma_{ст} = 20'$, 2 - $\gamma_{ст} = -30'$

При движении по дорогам со случайными характеристиками микропрофиля наиболее вероятные средние значения кинематических параметров и характеристик определяются с учетом действующего возмущения микропрофиля опорной поверхности, вызывающего изменения величин нормальной реакции и деформации подвески. Необходимо отметить, что экспериментальные выборочные реализации процессов изменения нормальной реакции, действующей в пятне контакта шины колеса с опорной поверхностью на переднем колесе легкого коммерческого грузовик ГАЗель с дизельным двигателем CUMMINS ISF 2.8, однозначно определяют процессы изменения деформации упруго элемента и моментные функции случайных выборочных реализаций перемещений колеса.

Испытания проводились на полигоне ООО «Автомобильный завод «ГАЗ» при полной загрузке автомобиля на дороге с асфальтобетонным покрытием (асфальт) и булыжной дороге ровного замощения (булыжник) с различными скоростями. Установлено, что распределения случайных величин нормальных реакций, при движении автомобиля по дорогам удовлетворительно описываются нормальным законом. Средние значения величин приведенных деформаций подвески и нормальной реакции в этом случае рассматриваются как наиболее вероятные для заданных эксплуатационных режимов, и в первом приближении могут считаться соответственно равными статическим величинам приведенной деформации подвески и нагрузке на ось (колесо). Отклонения нормальной реакции (силы) N_z от среднего значения описываются с помощью средних квадратических величин. С вероятностью $P = 0,9973$ значения нормально распределенной случайной величины « x » стандартного отклонения « s », полученные в результате обработки выборки лежат в интервале $(\bar{x} - 3s; \bar{x} + 3s)$ (6):

$$s = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sigma^2}, \quad (6)$$

где s – стандартное отклонение; n – число измерений значений непрерывного процесса при обработке выборочной реализации; σ – среднее квадратическое значение выборочной реализации.

С учетом вида функции плотности вероятности нормально распределенной случайной величины, отклонения случайной величины от среднего значения в пределах $\pm 1\sigma$ составляют от 68,2 до 72 % и считаются наиболее вероятными. В табл. 1 приведены значения средних квадратических величин (СКВ) нормальной реакции σ_{R_z} , полученные экспериментально при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ и соответствующие им расчетные значения СКВ приведенных деформаций подвески σ_f .

Наиболее вероятные значения углов развала при отклонении случайной величины приведенной деформации подвески от среднего значения в пределах $\pm \sigma_f$ определяются в соответствии с зависимостью угла развала колеса от деформации подвески, полученной при моделировании положения элементов направляющего устройства (рис. 4).

Расчет вероятных максимальных значений угла развала, соответствующих отклонениям угла развала γ от среднего значения m_γ (при статическом положении) в пределах средних квадратичных значений приведенной деформации $\pm 1\sigma_f$, выполняются графически. В табл. 2 приведены значения граничных величин области вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ. Расчетные вероятные максимальные значения углов развала, полученные для режимов движения с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные вероятные максимальные значения углов развала

Скорость, км/ч	Булыжник			Асфальт		
	30	40	50	60	75	90
СКВ σ_f , м	0,0389	0,0430	0,0452	0,0109	0,0145	0,0152
Вероятные границы угла развала γ , мин	-12,5; -77,5	-12,5; -81,3	-12,5 -91,3	-22,5; -41,3	-20,0 -43,8	-17,5; -45,0

На рис. 5 приведены границы области наиболее вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ.

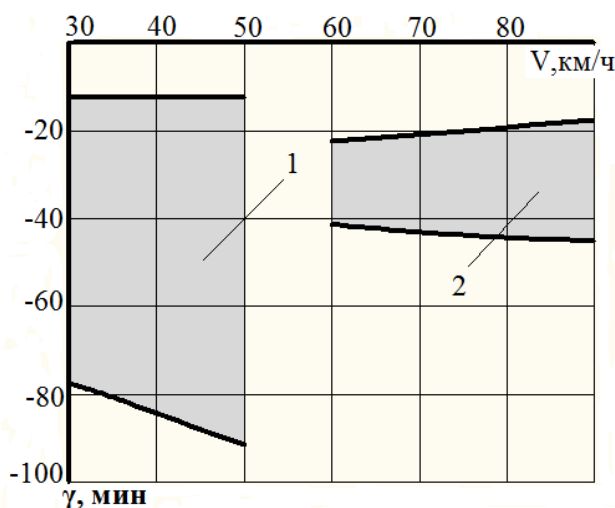


Рис. 5. Расчетные вероятные максимальные значения углов развала γ :
1 – скорость 30-50 км/ч, булыжник,
2 – скорость 60-90 км/ч, асфальт

Наиболее вероятные максимальные значения углов развала определяются при отклонении случайной величины приведенной деформации подвески в пределах $\pm \sigma_f$ от среднего значения m_γ , приблизительно равном приведенной деформации при статическом положении.

Расчет вероятных максимальных значений угла развала, соответствующих его отклонениям от среднего предела средних квадратичных значений приведенной деформации \pm

$1\sigma_f$, выполняются графически. На рис. 5 приведены границы области наиболее вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ и при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ. В табл. 3 приведены значения средних квадратических величин (СКВ) нормальной реакции σ_{Rz} , полученные экспериментально при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ и соответствующие им расчетные значения СКВ приведенных деформаций подвески σ_f . Приведенная к колесу деформация подвески определяется как отношение вертикальной (нормальная) силы N_z , действующей на колесо со стороны опорной поверхности к приведенной к колесу жесткости подвески (7):

$$f_{пр} = \frac{N_z}{C_{пр}}, \quad (7)$$

где $f_{пр}$ – приведенная к колесу деформация подвески; N_z – нормальная реакция опорной поверхности; $C_{пр}$ – приведенная к колесу жесткость подвески.

Таблица 3

Значения средних квадратических величин нормальной реакции σ_{Rz}
и приведенных деформаций σ_f подвески

Наименование	Значения параметров					
	Булыжник			Асфальт		
Тип покрытия	Булыжник			Асфальт		
Скорость, км/ч	30	40	50	60	75	90
СКВ σ_{Rz} , Н	1745,2	1931,1	2029,7	488,2	649,1	682,0
СКВ σ_f , м	0,0389	0,0430	0,0452	0,0109	0,0145	0,0152

На рис. 6 приведены границы области вероятных значений углов развала γ , соответствующие значениям СКВ приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, при значении угла развала в статическом положении $\gamma_{ст} = -30'$ при движении с различными скоростями по дорогам с асфальтовым и булыжным покрытием автополигона ГАЗ.

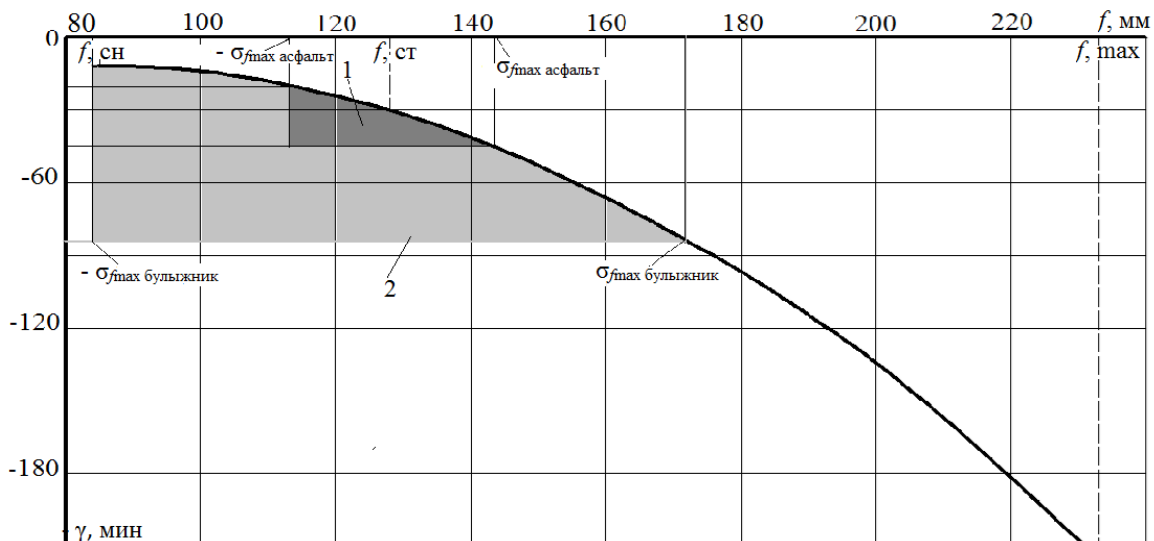


Рис. 6. Вероятные границы области значений углов развала γ в пределах приведенных деформаций подвески $\pm 1\sigma_f$, $\gamma_{ст} = -30'$ при движении по дороге:
1 – скорость 60-90 км/ч, асфальт; 2 – скорость 30-50 км/ч, булыжник

Основные выводы по результатам выполненной работы:

- деформации упругого элемента подвески и обусловленные ими вертикальные перемещения колеса приводят к изменению кинематических характеристик установки управляемого колеса (угла развала и схождения);
- проектирование поворотного узла (механизма) управляемого колеса автомобиля с учетом диапазона изменения кинематических характеристик при случайном возмущении микропрофиля поверхности дороги позволяет выбрать оптимальные значения углов установки управляемого колеса и увеличить долговечность шин.

Библиографический список

1. ГОСТ 12.1.012 – 90. Вибрационная безопасность. Общие требования / Госкомитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 46 с.
2. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
3. Мусарский, Р.А. Математические модели колесных экипажей / Р.А. Мусарский. – Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, 2008. – 164 с.
4. Кравец, В.Н. Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 413 с.
5. Технический регламент о безопасности колесных транспортных средств / Утвержден постановлением Правительства РФ №720 от 10.09.2009.
6. Исследование и определение характеристик микропрофиля автомобильных дорог автотрека Горьковского Автозавода / Отчет № гос. регистрации 78055862, научный руководитель к.т.н. С.В. Руквишников, Горький, 1978.

*Дата поступления
в редакцию: 13.05.2019*

S.I. Maleev, S.M. Ogorodnov, E.V. Stepanov, A.V. Pinchin

OPTIMIZATION OF KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE ROTARY DEVICE OF THE FRONT DRIVEN WHEELS OF THE CAR GAZELLE NEXT

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Purpose: to study the parameters of optimization of the kinematic characteristics of the rotary device of the front driven wheels of the car Gazelle Next.

Methodology: this article presents a method for determining the optimal values of the kinematic characteristics of the rotary device of the front driven wheels of the car, taking into account the probabilistic nature of their changes in the random disturbance of the microprofile of the road.

Findings: 1) deformation of the elastic element of the suspension and the resulting vertical movement of the wheel lead to a change in the kinematic characteristics of the installation of the driven wheel (camber and convergence); 2) design of the rotary unit (mechanism) of the driven wheel of the car, taking into account the range of kinematic characteristics in case of accidental perturbation of the microprofile of the road surface allows you to choose the optimal values of the angles of installation of the driven wheel and increase the durability of tires.

Keywords: camber angle, convergence angle, tire, wheel, wheel rolling, slip, microprofile, road.