

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_2\_32

УДК 629.3

*В. П. Тарасик*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ИСПЫТАНИЙ «РЫВОК РУЛЯ» ПРИ ОЦЕНКЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ АВТОМОБИЛЯ

*V. P. Tarasik*

## SIMULATION OF THE «STEERING WHEEL JERK» TEST MODE WHEN ASSESSING VEHICLE STEERABILITY AND STABILITY

### Аннотация

Предложена методика имитационного моделирования и исследования процесса движения автомобиля при выполнении маневра «рывок руля». Исследования выполнены на примере грузового автомобиля категории  $N_3$ . Приведены полученные графики, иллюстрирующие изменение параметров и характеристик, позволяющих оценить управляемость и устойчивость движения автомобиля при выполнении маневра.

### Ключевые слова:

автомобиль, рулевое колесо, маневр «рывок руля», боковой увод колес, боковое скольжение, кривизна траектории, характеристика траекторной управляемости, характеристика времени 90-процентной реакции автомобиля.

### Для цитирования:

Тарасик, В. П. Моделирование режима испытаний «рывок руля» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля / В. П. Тарасик // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 32–40.

### Abstract

A technique for simulation modeling and research on the process of vehicle movement during a «steering wheel jerk» maneuver is proposed. The research was carried out based on a truck of the  $N_3$  category. The resulting graphs are presented, illustrating the change in parameters and characteristics, which make it possible to assess vehicle steerability and stability while performing this maneuver.

### Keywords:

car, steering wheel, «steering wheel jerk» maneuver, wheel slipping, sidewise skidding, trajectory curvature, trajectory control characteristic, time characteristic of 90 per cent vehicle response

### For citation:

Tarasik, V. P. Simulation of the «steering wheel jerk» test mode when assessing vehicle steerability and stability / V. P. Tarasik // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 32–40.

Эффективность использования автомобиля для выполнения транспортной работы в реальных условиях определяется его потенциальными физическими свойствами и степенью полноты их реализации. Среди множества свойств автомобиля управляемость и устойчи-

вость представляют особую значимость, поскольку связаны с обеспечением безопасности движения при реализации высокой скорости и производительности выполнения транспортной работы.

Методы определения характеристик и параметров оценки функцио-

нальных свойств управляемости и устойчивости автомобиля подробно рассмотрены в [1–3]. Технические требования к управляемости и устойчивости автотранспортных средств изложены в ГОСТ 31507–2012 [4]. Показатели и характеристики исследуемых свойств определяются в критических (нештатных) режимах движения автомобиля, подвергаемого испытаниям, с выполнением соответствующих маневров: смена полосы движения («переставка»), вход в поворот, рывок руля и др.

В статье изложена методика имитационного моделирования тестового режима испытаний «рывок руля» и приведен пример ее использования.

### Цель исследования

На основе математического моделирования на начальной стадии проектирования автомобиля оценить возможности прогнозирования параметров и характеристик управляемого и устойчивого движения на режиме «рывок руля».

### Методика исследования

Исследования выполнялись с учетом предписаний стандарта [4]. Имитация поворота рулевого колеса производится с угловой скоростью  $\omega_{p0}$  не менее 400 град/с, и затем оно удерживается в конечном положении до окончания эксперимента. Опыты выполняются при различных конечных значениях угла поворота рулевого колеса  $\alpha_{pk}$ . В каждом последующем опыте значение  $\alpha_{pk}$  увеличивают ступенчато до достижения бокового ускорения автомобиля  $a_y$  для АТС категорий  $M_1$ ,  $M_2$  и  $N_1$  не менее  $4,5 \text{ м/с}^2$ , для АТС категорий  $M_3$ ,  $N_2$  и  $N_3$  не менее  $2,5 \text{ м/с}^2$ . Предельное значение  $a_y$  ограничивается условиями сцепления колес с опорной поверхностью дороги или отрыва колес от дороги.

Для моделирования режима испытаний «рывок руля» используются динамическая и математическая модели, разработанные для исследования управляемости и устойчивости автомобиля при выполнении маневра «переставка» [5]. Исследования проведены на примере грузового автомобиля МАЗ-5337 (категория  $N_3$ ). Параметры автомобиля приведены в [5].

Предельные углы поворота рулевого колеса  $\alpha_{pk}$ , град, для автомобилей  $N_3$  определяются по формулам [1–4]:

$$\alpha_{p \min} = \frac{180(0,72L + 0,2)u_p}{100\pi}; \quad (1)$$

$$\alpha_{p \max} = \frac{180(0,72L + 2,6)u_p}{100\pi}, \quad (2)$$

где  $L$  – база автомобиля, м;  $u_p$  – передаточное число рулевого привода.

У автомобиля МАЗ-5337  $L = 4,75 \text{ м}$ ,  $u_p = 23,6$ , в результате  $\alpha_{p \min} = 48,949 \text{ град}$ ,  $\alpha_{p \max} = 81,401 \text{ град}$ .

При испытаниях измеряют и регистрируют изменения во времени угла поворота рулевого колеса  $\alpha_p = f(t)$ , скорости автомобиля  $v_a = f(t)$ , угловой скорости его вращения  $\omega_z = f(t)$  относительно вертикальной оси  $Cz$ , бокового ускорения центра масс автомобиля  $a_y = f(t)$ .

При моделировании маневра «рывок руля» имитация скорости поворота руля  $\omega_p = f(t)$  выполнялась на основе выражения

$$\omega_p = \begin{cases} \omega_{p0} & \text{при } 0 \leq \alpha_p \leq \alpha_{pk}; \\ 0 & \text{при } \alpha_p > \alpha_{pk}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\omega_p$  – изменение угловой скорости вращения рулевого колеса в процессе осуществления маневра «рывок руля», рад/с;  $\omega_{p0}$  – значение угловой скорости

вращения рулевого колеса во время совершения рывка, рад/с;  $\alpha_p$  – текущее значение угла поворота рулевого колеса в период рывка, рад;  $\alpha_{pk}$  – конечное значение угла поворота, рад.

Функция изменения угла поворота рулевого колеса во времени  $\alpha_p = \int \omega_p dt$ .

При моделировании маневра «рывок руля» для исследуемого автомобиля МАЗ-5337 осуществлялось варьирование конечного значения угла поворота  $\alpha_{pk}$  в пределах 10...80 град с шагом 10 град при соответствующем контроле изменения параметров, характеризующих качество процесса управления и устойчивость движения автомобиля. Угловая скорость поворота рулевого колеса принималась  $\omega_{p0} = 450$  град/с. Рассмотр-

им ряд полученных при моделировании графиков, отображающих изменение исследуемых характеристик движения.

На рис. 1, а представлены графики изменения во времени угловой скорости вращения автомобиля  $\omega_z = f(t)$  относительно вертикальной оси  $Cz$ , на рис. 1, б – курсового угла поворота продольной оси  $\gamma = f(t)$ , на рис. 1, в – изменения бокового ускорения автомобиля  $a_y = f(t)$  при трех значениях угла поворота рулевого колеса  $\alpha_{pk}$ : 30, 60 и 75 град. Графики, полученные при этих значениях  $\alpha_{pk}$ , обозначены соответственно 1, 2 и 3. Очевидно, что  $\omega_z$ ,  $a_y$  и  $\gamma$  существенно зависят от величины рывка руля  $\alpha_{pk}$ .

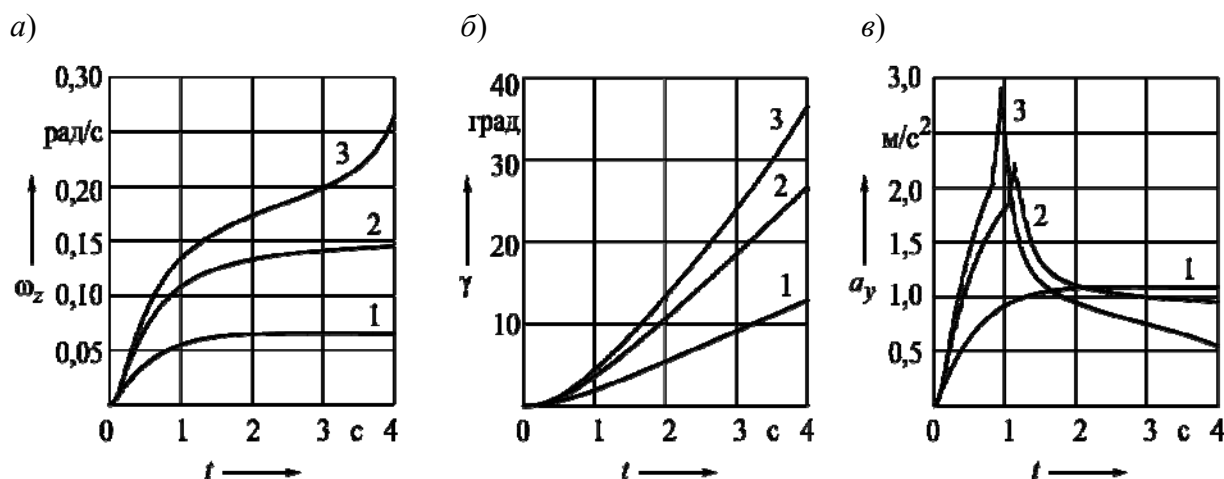


Рис. 1. Изменение угловой скорости вращения автомобиля  $\omega_z = f(t)$  (а), курсового угла поворота продольной оси  $\gamma = f(t)$  (б) и бокового ускорения автомобиля  $a_y = f(t)$  (в)

Согласно полученным результатам моделирования, при  $\alpha_{pk} \leq 70$  град достигается устойчивая конечная скорость вращения автомобиля. Превышение отмеченной величины  $\alpha_{pk}$  приводит к нарушению устойчивости параметров движения: угловая скорость вращения  $\omega_z$  при  $\alpha_{pk} = 75$  град не стабили-

зируется (см. рис. 1, а, график 3), на графиках ускорений  $a_y$  возникают пиковые всплески значений (см. рис. 1, в, графики 2 и 3). Причина этого заключается в возрастании бокового увода и скольжения колес автомобиля.

На рис. 2, а–в приведены графики изменения во времени углов бокового

увода передних и задних колес  $\delta_{yв1}$  и  $\delta_{yв2}$ , а на рис. 3, а, б – соответствующие им графики бокового скольжения

колес  $\lambda_{s1}$  и  $\lambda_{s2}$  при различных углах рывка руля.

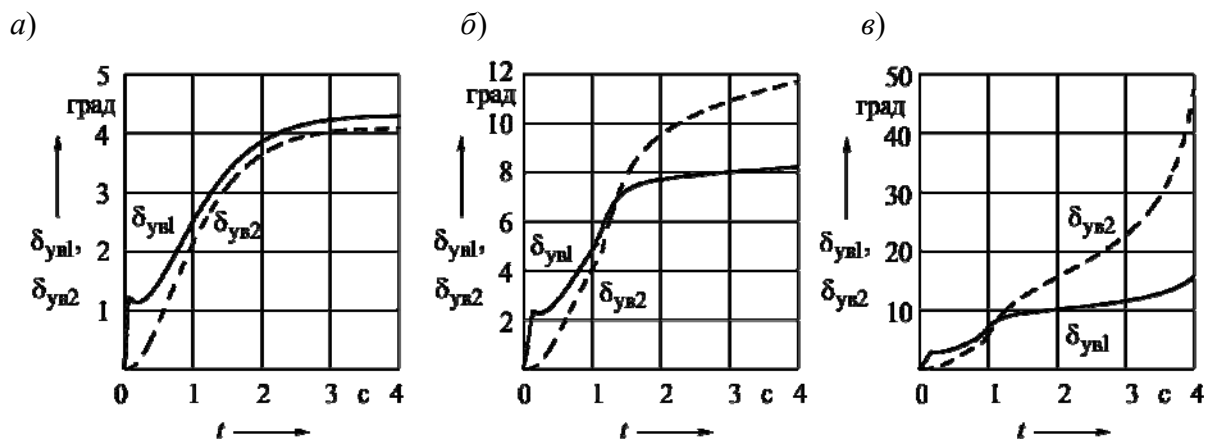


Рис. 2. Изменение углов бокового увода передних и задних колес  $\delta_{yв1}$  и  $\delta_{yв2}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

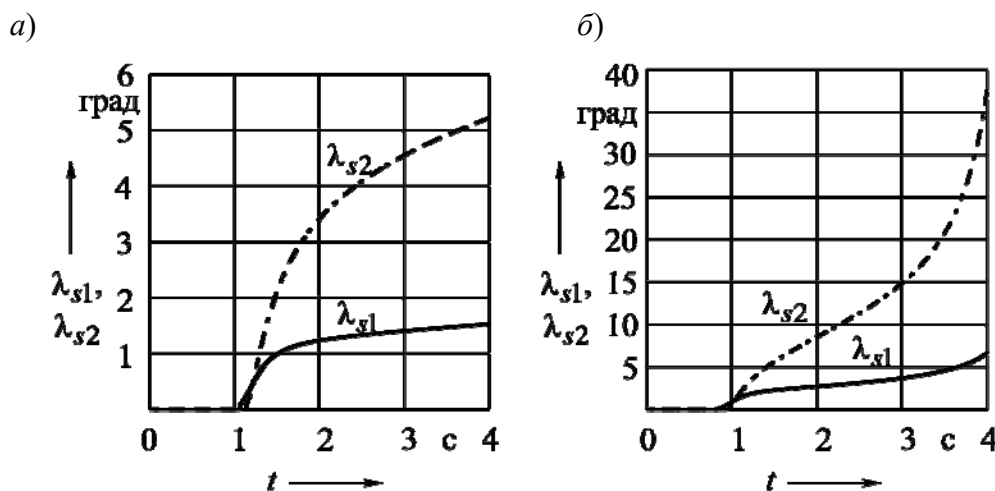


Рис. 3. Изменение бокового скольжения колес  $\lambda_{s1}$  и  $\lambda_{s2}$  при углах рывка руля 60 град (а) и 75 град (б)

Отметим, что углы увода  $\delta_{yвi}$  содержат две составляющие, обусловленные упругой деформацией колес  $\delta_{yвi}$  под воздействием боковой силы  $F_{yi}$  и скольжением колес относительно опорной поверхности  $\lambda_{si}$ , т. е.  $\delta_{yвi} = \delta_{yвi} + \lambda_{si}$ .

При  $\alpha_{рк} \leq 40$  скольжение колес незначительное, поэтому  $\omega_z$  и  $a_y$  плавно нарастают после осуществления рывка руля. При больших значениях  $\alpha_{рк}$  с увеличением ускорения  $a_y$ , примерно при  $t \approx 1$  с, начинается резкое нараста-

ние скольжения  $\lambda_{si}$ , а на графике ускорения возникает всплеск. Это отражается и на изменении протекания всех остальных исследуемых характеристик движения автомобиля. Значения  $\lambda_{si}$  определялись по уравнению регрессии, приведенному в [5].

На рис. 4, а–в показаны графики изменения кривизны траектории поворота

та автомобиля  $K_{tr} = f(t)$  вследствие рывка руля при  $\alpha_{рк}$ , равном соответственно 30, 60 и 75 град. При  $\alpha_{рк} = 75$  град кривизна траектории нарастает так интенсивно, что в результате автомобиль начинает раскручиваться на ограниченной площадке и происходит потеря устойчивости движения.

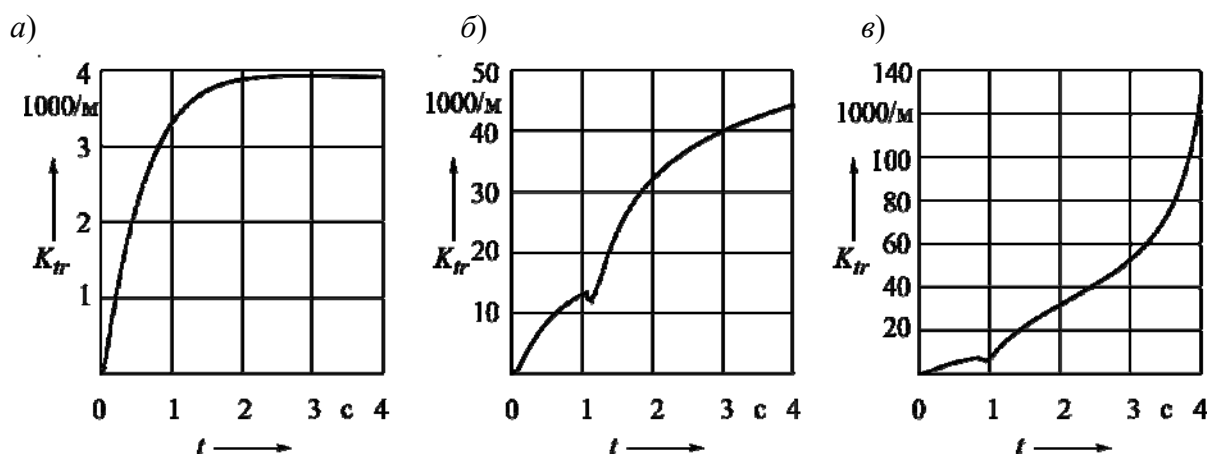


Рис. 4. Изменение кривизны траектории поворота автомобиля  $K_{tr}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

Вследствие рывка руля возникает крен кузова автомобиля, что приводит к перераспределению значений нормальных реакций между внутренними и внешними по отношению к центру поворота колес  $R_{z1в}$ ,  $R_{z1н}$ ,  $R_{z2в}$ ,  $R_{z2н}$ . На рис. 5, а–в приведены графики изменения угла крена  $\lambda_{кр}$  и скорости крена кузова  $\omega_{кр}$ , а на рис. 6, а–в – нормальных реакций на колеса. Значения нормальных реакций внутренних колес  $R_{z1в}$  и  $R_{z2в}$  существенно снижаются, и возможны условия, при которых может произойти их отрыв от дороги. Поэтому необходим их контроль в процессе моделирования. Значения нормальных реакций колес и бокового ускорения центра масс – основные источники информации, используемой в

автоматической системе стабилизации устойчивости движения автомобиля на виражах. На основе контроля за их изменением осуществляется управление ограничением скорости движения автомобиля.

Стандартом [4] предписано получение по результатам испытаний «рывок руля» характеристик траекторной управляемости  $K_{tr} = f(\alpha_p)$ , заброса угловой скорости автомобиля  $\Delta\omega_z = f(a_y)$  над установившимся значением и времени 90-процентной реакции автомобиля  $\Delta t_{90\%} = f(a_y)$ . Для определения этих характеристик и ряда других физических величин, существенных при оценке устойчивости и управляемости автомобиля, фиксировались значения следующих параметров при всех варьи-

руемых углах рывка руля  $\alpha_{рк}$ : боковое ускорение  $a_y$ ; конечная скорость вращения автомобиля  $\omega_{зк}$ ; момент времени  $t_\omega$  при  $0,9\omega_{зк}$ ; момент времени  $t_\alpha$  при  $0,5\alpha_{рк}$ ; конечные зна-

чения кривизны траектории  $K_{tr}$ , углов увода колес  $\delta_{уб1}$ ,  $\delta_{уб2}$  и бокового их скольжения  $\lambda_{s1}$ ,  $\lambda_{s2}$ , а также угла крена кузова  $\lambda_{кр}$ .

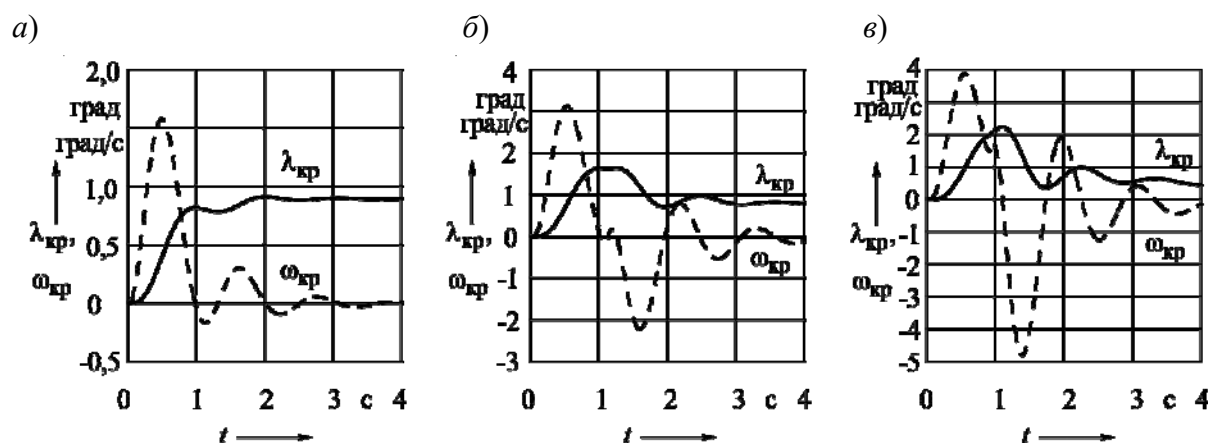


Рис. 5. Изменение угла крена кузова автомобиля  $\lambda_{кр}$  и скорости крена  $\omega_{кр}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

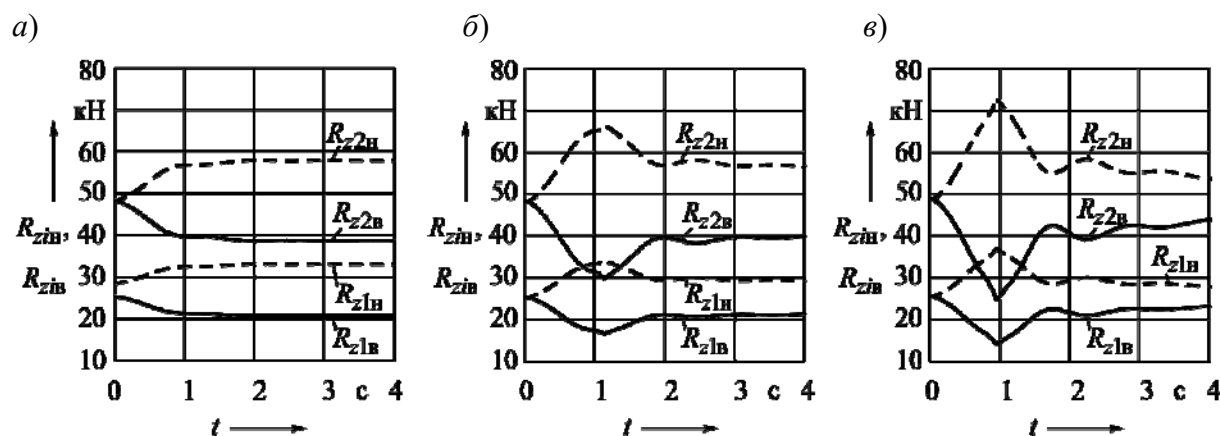


Рис. 6. Изменение нормальных реакций дороги на колеса  $R_{z1в}$ ,  $R_{z1н}$ ,  $R_{z2в}$ ,  $R_{z2н}$  при углах рывка руля 30 град (а), 60 град (б) и 75 град (в)

Координаты характеристики  $\Delta t_{90\%} = f(a_y)$  вычислялись по формуле [2, 3]

$$\Delta t_{90\%} = t_\omega - t_\alpha. \quad (4)$$

Полученные значения искомых параметров приведены в табл. 1. Значения  $K_{tr}$  умножены на 1000.

Представим результаты выполненных исследований в виде графиков.

На рис. 7, а приведена характеристика траекторной управляемости  $K_{Tr} = f(\alpha_p)$ , а на рис. 7, б – характеристика времени 90-процентной реакции

$\Delta t_{90\%} = f(a_y)$  моделируемого автомобиля МАЗ-5337. Получение этих характеристик предусмотрено стандартом [4].

Табл. 1. Результаты моделирования маневра «рывок руля»

Параметры	Значение параметров									
	10	20	30	40	50	60	70	75	80	
$\alpha_{pk}$ , град	10	20	30	40	50	60	70	75	80	
$a_y$ , м/с <sup>2</sup>	0,362	0,724	1,086	1,430	1,856	2,217	2,637	2,903	3,205	
$\omega_{zk}$ , рад/с	0,0217	0,0435	0,0653	0,0882	0,1140	0,1433	0,1909	0,228	0,350	
$t_{\omega}$ , с	1,177	1,202	1,213	1,276	1,449	1,736	2,751	2,912	2,619	
$t_{\alpha}$ , с	0,012	0,023	0,036	0,045	0,056	0,068	0,078	0,084	0,090	
$\Delta t_{90\%}$ , с	1,165	1,179	1,181	1,231	1,393	1,668	2,673	2,729	2,829	
$K_{Tr}$ , 1/м	1,304	2,607	3,920	6,250	11,580	28,080	50,0	100,0	1093,0	
$\delta_{ув1}$ , град	1,423	2,854	4,283	5,597	6,682	8,218	11,020	15,45	52,150	
$\delta_{ув2}$ , град	1,354	2,716	4,078	5,597	7,741	11,650	21,630	45,0	345,0	
$\lambda_{s1}$ , град	0	0	0	0,210	0,685	1,518	3,377	10,0	37,0	
$\lambda_{s2}$ , град	0	0	0	0,469	2,010	5,205	14,030	36,0	325,0	
$\lambda_{кр}$ , град	0,304	0,608	0,911	1,213	1,372	1,639	2,026	2,23	2,450	

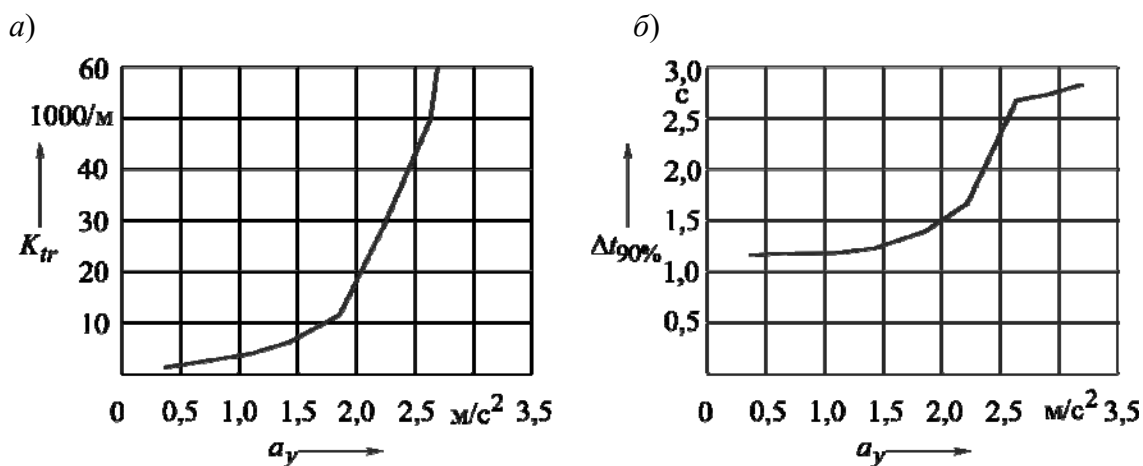


Рис. 7. Характеристики траекторной управляемости (а) и времени 90-процентной реакции автомобиля (б)

Из графика на рис. 7, а видно, что с увеличением бокового ускорения  $a_y$  кривизна траектории движения автомобиля  $K_{Tr}$  быстро возрастает, а при  $a_y > 2,5$  автомобиль раскручивается на опорной поверхности, т. е. происходит

потеря устойчивости и управляемости движения.

Время  $\Delta t_{90\%}$  в интервале боковых ускорений 2...4 м/с<sup>2</sup> для автомобилей категории  $N_3$ , к которой принадлежит МАЗ-5337, не должно превы-

шать 2 с. Предельное допустимое его значение 3 с [4]. Из рис. 7, б видно, что в целом эти требования у данного автомобиля выполняются.

Непосредственное влияние на кривизну траектории  $K_{tr}$  и характеристику  $\Delta t_{90\%}$  оказывает величина угла поворота руля  $\alpha_{рк}$ . На рис. 8, а, б отображены их зависимости от  $\alpha_{рк}$ . С уве-

личением  $\alpha_{рк}$  кривизна траектории прогрессивно возрастает, и при  $\alpha_{рк} > (70...75)$  град автомобиль теряет устойчивость управления и начинает раскручиваться на опорной поверхности (см. рис. 8, а и 4, в). Зависимость же  $\Delta t_{90\%}$  от  $\alpha_{рк}$  плавная и некритичная (см. рис. 8, б).

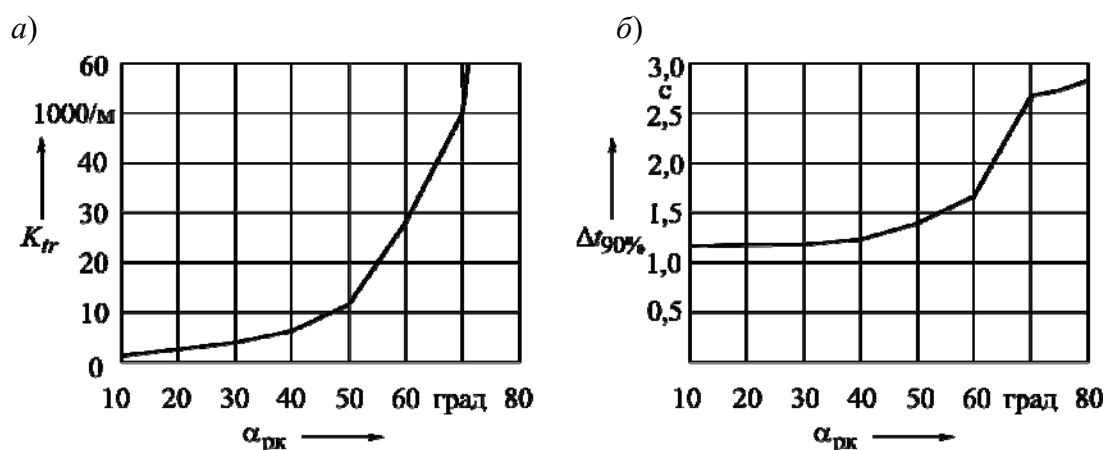


Рис. 8. Зависимости кривизны траектории (а) и времени 90-процентной реакции автомобиля (б) от угла заброса руля

Величина заброса угловой скорости вращения автомобиля  $\Delta\omega_z = f(a_y)$  над установившимся значением  $\omega_k$  не определялась, т. к. в использованной динамической модели не учитывались упругие свойства рулевого привода управляемых колес. Поэтому получаемые графики переходного процесса угловой скорости  $\omega_z = f(t)$  носили аперриодический характер.

Как отмечалось выше, причиной потери устойчивости движения при больших значениях угла заброса руля является значительное увеличение углов увода колес  $\delta_{ув1}$  и  $\delta_{ув2}$  и их бокового скольжения  $\lambda_{с1}$  и  $\lambda_{с2}$ . На рис. 9, а представлены графики зависимости уг-

лов увода колес, а на рис. 9, б – бокового скольжения от угла заброса руля.

При увеличении угла заброса  $\alpha_{рк} > 70$  град углы увода и скольжение колес катастрофически возрастают и происходит потеря устойчивости движения на повороте.

Рассмотренная методика исследования процесса выполнения маневра «рывок руля» позволяет выявить параметры, оказывающие существенное влияние на управляемость и устойчивость движения автомобиля, и подобрать наилучшее сочетание их проектных значений.



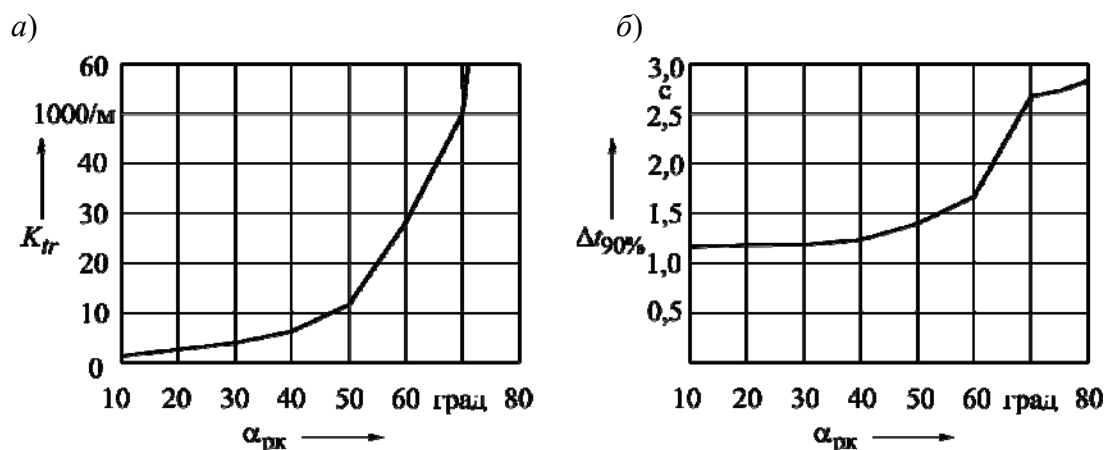


Рис. 9. Зависимости углов увода колес (а) и бокового скольжения (б) от угла заброса руля

### Заключение

1. Разработана методика моделирования и исследования процесса движения автомобиля при выполнении маневра «рывок руля», предназначенная для определения параметров и характеристик управляемого и устойчивого движения при заданных параметрах рулевого управления.

2. Приведены результаты моделирования движения грузового автомобиля

категории  $N_3$  при выполнении маневра «рывок руля», рассмотрено влияние параметров управления на характеристики движения при выполнении маневра.

3. Предлагаемая методика предназначена для использования на начальной стадии проектирования автомобиля при определении параметров, обеспечивающих выполнение технических требований на показатели управляемости и устойчивости.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов, Г. А. Теория движения колёсных машин: учебник для вузов / Г. А. Смирнов. – Москва: Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. Ларин, В. В. Теория движения полноприводных колёсных машин : учебник для вузов / В. В. Ларин. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 391 с.
3. Тарасик, В. П. Теория движения автомобиля : учебник для вузов / В. П. Тарасик. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
4. ГОСТ 31507–2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 42 с.
5. Тарасик, В. П. Моделирование режима испытаний «переставка» при оценке управляемости и устойчивости автомобиля / В. П. Тарасик, О. В. Пузанова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2022. – № 1 (74). – С. 76–86.

Статья сдана в редакцию 11 апреля 2022 года

**Владимир Петрович Тарасик**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-291-85-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.

**Vladimir Petrovich Tarasik**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Тел.: +375-291-85-36-45. E-mail: avtobru@gmail.com.