



# ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.03

С.И. МЕДВЕДИЦКОВ, канд. техн. наук; Р.С. ВАРДАНЯН, д-р физ.-мат. наук  
Бобруйский филиал Белорусского государственного экономического университета

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ВЕЛИЧИН ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ ШИНЫ ПО МЕРЕ ЕЕ ИЗНОСА

*Получены зависимости изменений величин проскальзывания легковых шин различных моделей в ведущем режиме по мере увеличения малых углов увода вследствие износа рисунка протектора.*

**Ключевые слова:** шина, проскальзывание, углы увода, износ протектора, модель шины, ведущий режим

Изучению взаимодействия шины с дорожной поверхностью посвящено достаточно много работ [1, 2, 3]. Особое значение это направление приобретает в связи с ростом скоростей движения автомобилей и разработкой математических моделей, которые должны учитывать надежную связь шины с дорогой. Однако многие математические модели основаны на некоторых допущениях, что приводит к отклонению экспериментальных данных от результатов математического моделирования. Поэтому актуальной темой является повышение точности результатов математического моделирования. Большой вклад в разработку теории качения колеса внес Д.А. Антонов. Учитывая большой опыт в стендовых и дорожных испытаниях, Д.А. Антонов в работах [4, 5] предложил нелинейную теорию увода. Им было установлено, что при использовании упрощенной математической модели автомобиля и нелинейной теории увода, результаты более близки к экспериментальным данным, чем при применении сложной математической модели автомобиля с существенно меньшим числом допущений и линейной теории увода. Однако Д.А. Антоновым не был учтен коэффициент коррекции по износу шин. В другой работе [6], где была разработана методика расчета оценки параметров управляемости и устойчивости автомобиля на основе результатов полигонных испытаний автомобилей, учитывались параметры проскальзывания в пятне контакта пневматической шины с опорной поверхностью от угла увода. В связи с особенностью деформаций пневматической шины под действием передаваемых сил и моментов, эта математическая модель движения автомобиля не учитывала зависимость изменения величины проскальзывания от степени

износа шин. Проведенные исследования позволили получить зависимость проскальзывания шины в пятне контакта от степени ее износа, которые необходимо учитывать при теоретических расчетах и использовать в практической деятельности конструкторов — разработчиков автомобилей.

Как известно, на шину при движении в ведущем режиме действуют нормальная нагрузка и крутящий момент, изменение крутящего момента вызывает изменение окружной деформации шины. Под действием крутящего момента шина получает деформацию, как в области контакта, так и вне ее. Опыты показывают, что по мере увеличения крутящего момента на выходе шины из пятна контакта превышает предел сцепления с опорной поверхностью, из-за чего происходит проскальзывание. В передней и особенно в задней частях контакта шины с дорожной поверхностью создаются благоприятные условия для проскальзывания элементов рисунка протектора в направлении, противоположном движению колеса [1].

Для получения зависимости изменения величины проскальзывания от степени износа шин, был проведен комплекс исследований легковых шин размерности 175/70R13 различных моделей и срока выпуска.

С этой целью была отобрана партия новых шин 175/70R13 модели Бел-100 с металлокордным бреккером производства ОАО «Белшина» в количестве 5 штук. Разброс шин в партии по показателям силовой неоднородности, геометрическим параметрам и статическим характеристикам не превышал более 1%. В качестве эталона для сравнения с упомянутыми выше шинами были использованы шины такой же размерности 175/70R13 модели ZX

с металлокордным брекером фирмы «Michelin». Различие шин фирм «Michelin» и «Белшина» заключалось в применяемых материалах металлокорда и химического состава резиновой смеси протектора. Одновременно в комплекс исследований были включены шины со сроком хранения 1 год. Подготовка шин к испытаниям осуществлялась в соответствии с ГОСТ 27704 – 88 «Шины пневматические. Правила подготовки шин для проведения стендовых испытаний» и включала: выдержку шин перед испытаниями, монтаж на испытательный обод, стабилизирующую обкатку.

Исследования проводились на модернизированном стенде ИМШ-3М ОАО «Белшина». Модернизация стенда была осуществлена в части оснащения дополнительной оснасткой и оборудованием: на беговой барабан были закреплены армированные металлические секторы, наполненные бетоном с последующей проточкой наружного диаметра; для регистрации боковой силы — изготовлена оригинальная тензометрическая ступица; привод изменения плоскости вращения колеса относительно плоскости вращения бегового барабана оснащен специальным устройством; для очистки беговой дорожки барабана и шины применена система подачи каолина и отсоса продуктов износа; установлены приводы на ступицу колеса и беговой барабан, причем привод барабана может перемещаться на подвижных каретках для осуществления привода второго колеса.

Работа стенда основана на принципе циркуляции мощности. При этом осуществляется возможность проводить испытания одновременно двух шин в одном из трех основных режимов качения колес: первая шина в ведущем режиме, вторая — в ведомом; первая шина в ведущем режиме, вторая — в тормозном; первая шина в тормозном режиме, вторая — в ведомом.

Каждая шина подвергается кратковременной обкатке пробегом 100 км при одновременном воздействии на нее нормальной нагрузки, боковой силы, изменяющейся по синусоидальному закону (поворот колеса вправо и влево на угол 1 градус в течение одной минуты) и крутящего момента. В ходе обкатки и испытаний направление вращения шин изменялось на противоположное через каждые 50 км пробега. После обкатки шины взвешивались, и измерялась высота выступов рисунка протектора в четырех равномерно расположенных сечениях шины.

После предварительной обкатки и износа высоты рисунка протектора на 25, 50, 75, 100 % для каждой шины, определялись зависимости проскальзывания шины в пятне контакта от износа ее при следующих основных режимах испытаний: радиальная нагрузка для шин составляла 3,97 кН при внутреннем давлении воздуха 200 кПа, скорость качения — 70 км/ч, крутящий момент — 150 Нм, угол увода составлял 00 и +/-10 при повороте ко-

леса вправо и влево. Количество зачетных измерений каждой шины составляло не менее 10. В ходе исследований регистрировалась боковая сила от угла увода, величины стабилизирующего момента, расхода каолина, скорости качения колеса, кинематического и динамического радиусов качения и крутящего момента. Измерение окружной скорости радиуса качения колеса и барабана производилось прибором оригинальной конструкции [7, 8]. Фотодатчики ФД 1 и ФД 2 выполнены по идентичной схеме, работают в инфракрасном диапазоне с целью снижения чувствительности к внешнему освещению, и содержат встроенные усилители-формирователи для повышения помехоустойчивости от внешних полей. В качестве оптических прерывателей использованы алюминиевые диски диаметром 240 мм, имеющие по 120 равномерно расположенных прорезей на периферии, которые установлены на валах приводов барабана и колеса.

Принципиальная схема измерителя окружной скорости барабана и радиуса качения колеса приведена на рисунке 1.

Окружная скорость барабана радиусом  $r_b$  пропорциональна частоте импульсов фотодатчика ФД 1. Измеритель скорости барабана представляет собой специализированный частотомер, время подсчета импульсов в котором (длительность стробоимпульса) формируется таким образом, чтобы показания счетчика точно соответствовали выраженной скорости в км/час. Счетчик скорости содержит регистр памяти, исключающий индексацию процессов счета и облегчающий восприятие информации. Для определения величин проскальзывания шины в пятне контакта с дорожной поверхностью необходимо знать кинематический и динамический радиусы колеса. С этой целью напомним понятия различных радиусов колеса и обратимся к высказываниям автора работы [1]. В данной работе нас интересует радиус качения, которым принято называть радиус такого фиктивного жесткого колеса, которое при отсутствии пробуксовывания и проскальзывания, имея одинаковую с действительным колесом скорость вращения, одновременно с этим имеет и одинаковую с ним скорость качения. В теоретической механике этот радиус качения принято называть кинематическим радиусом, который характеризует путь, пройденный колесом за один оборот.

Поэтому пути, проходимые таким колесом и барабаном, одинаковы, что можно представить в виде выражения

$$2\pi r_k \cdot n_k / 120 = 2\pi r_b \cdot n_b / 120,$$

где  $r_k, r_b$  — радиусы качения колеса и барабана;  $n_k, n_b$  — числа импульсов ФД 1 и ФД 2, тогда

$$r_k = r_b \cdot n_b / n_k.$$

Радиус качения измеряется подсчетом числа импульсов от фотодатчика ФД 2. Расстояние от оси движущегося колеса до плоскости опоры принято называть динамическим радиусом  $r_d$  [1]. Динамический

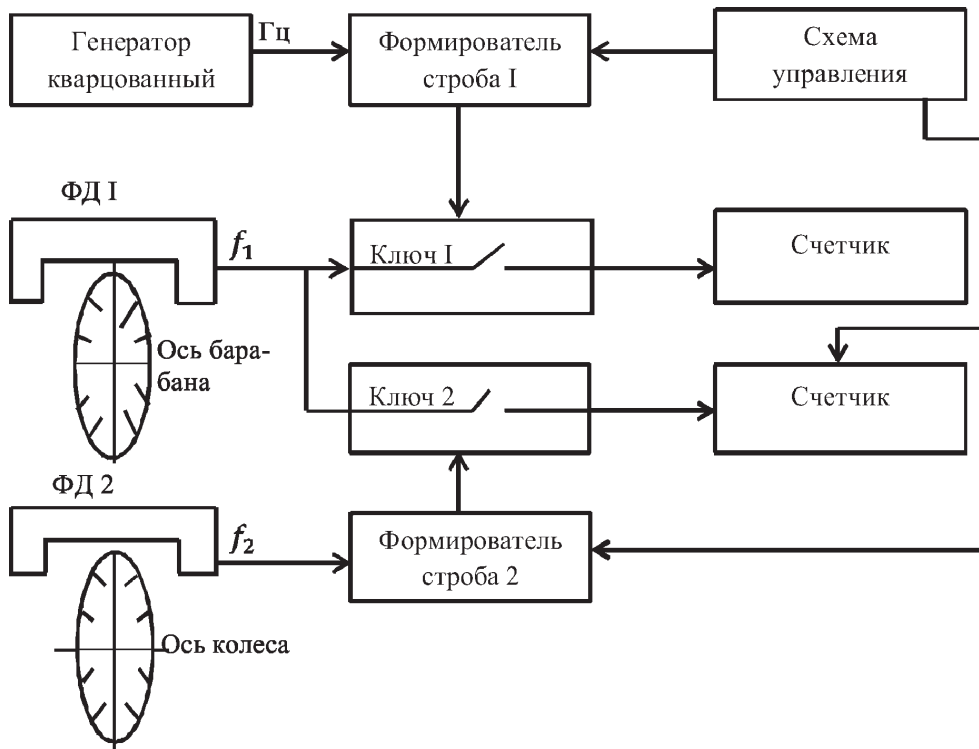


Рисунок 1 — Принципиальная схема измерителя окружной скорости барабана и радиуса качения колеса

радиус шины измеряется отдельным каналом с использованием сельсинов и передается на измерительный прибор, установленный на пульте управления.

Статистическая погрешность измерений величины значений проскальзывания шины в пятне контакта от степени износа шин при количестве наблюдений  $n = 10$ , доверительной вероятности  $P = 0,95$  и коэффициенте Стьюдента для стеновых исследований  $t = 2,80$  составляла  $0,0249$  мм.

По результатам абсолютных величин значений проскальзываний в пятне контакта шин с поверх-

ностью барабана построена зависимость проскальзывания ( $S$ ) различных вариантов шин от степени износа ( $И$ ) при угле увода  $\delta = +/ - 1^\circ$ , которая представлена на рисунке 2.

Анализ полученных зависимостей величин значений проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью барабана при различных углах увода и моделей шин свидетельствует о том, что характер протекания кривых идентичен, т. е. по мере износа шин проскальзывание уменьшается. Такое явление связано с тем, что по мере

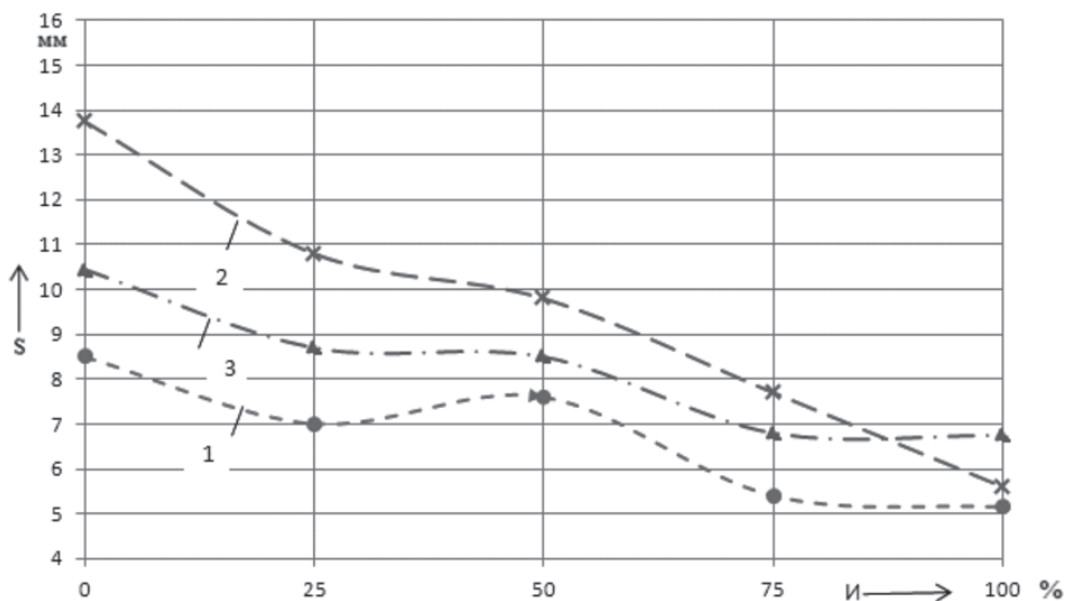


Рисунок 2 — Зависимость величин значений проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью барабана при угле увода  $\delta = +/ - 1^\circ$ : 1 — 175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (срок хранения 1 год); 2 — 175/70SR13 модели ZX фирмы «Michelin»; 3 — 175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (новая)

износа шины изменяется окружная деформация элементов рисунка протектора, которая влияет на величины сил трения и проскальзывания. Отличие составляет по абсолютным значениям величин проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью барабана. Характер кривой сравниваемой шины 175/70SR13 фирмы «Michelin» модели ZX (см. рисунок 2, график 2) отличается от шины 175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (см. рисунок 2, графики 1, 3) тем, что средние значения проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью барабана соответственно на 41,6 % и 15,6 % выше. Анализ кривой (см. рисунок 2, график 1) позволяет отметить, что в процессе хранения шин сроком до 1 года и выше, происходит изменение физико-механических свойств протекторных резин, которые влияют на изменение величин проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью, вследствие чего их также необходимо учитывать при теоретических расчетах.

Величины значений проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью, а также полученные зависимости величин проскальзываний от степени износа шин позволяют определить интенсивность снижения проскальзывания, которая по мере износа различных вариантов шин, составляет для шин: 175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (срок хранения 1 год) — 165 %; 175/70SR13 модели ZX фирмы «Michelin» — 245,5 %; 175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (новая) — 154,8 %.

Одновременно были проведены испытания для получения зависимостей величин проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью барабана при нулевом угле увода. В ходе испытаний вышеуказанных шин было отмечено, что разница значений проскальзываний в абсолютных величинах при малых углах увода не существенна.

Величины значений проскальзываний в пятне контакта шины с дорожной поверхностью от степени износа шин при нулевом угле увода приведены в таблице.

Из анализа таблицы и рисунка 2 следует, что средняя величина проскальзываний по шине 175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (срок хранения 1 год) при угле увода  $\delta = +/ - 1^\circ$  по сравнению с нулевым углом увода составила 4,1 %. А по шине 175/70SR13 модели ZX фирмы «Michelin» существенно меньше. Это подтверждается результатами испытаний в работе [3], где отмечается, что при малых углах увода передняя часть контактной площадки параллельна направлению качения шины, а задняя часть изгибается вследствие проскальзывания элементов шины, но, по мере увеличения угла увода, зона проскальзывания перемещается вперед и при углах увода до  $\delta = 12 \div 15^\circ$  проскальзывает вся контактная площадка.

Таблица — Величины значений проскальзываний в пятне контакта шины с дорожной поверхностью от степени износа шин при нулевом угле увода

Размер, модель, изготовитель	Износ, %				
	0	25	50	75	100
175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (срок хранения 1 год)	7,95	6,80	7,15	5,25	5,15
175/70SR13 модели ZX фирмы «Michelin»	12,90	10,75	9,85	8,70	5,75
175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (новая)	10,20	8,15	7,95	7,20	7,15

По полученным экспериментальным данным можно выразить аналитическое описание кривых функциональной связью между величинами значений проскальзываний в пятне контакта шины с дорожной поверхностью. Далее обозначим ( $y_i$ ) от степени износа протектора шины (И), затем обозначим ( $x_i$ ) при угле  $\delta = +/ - 1^\circ$ .

Для получения аналитической зависимости величин проскальзываний в пятне контакта шин с дорожной поверхностью барабана по износу шин при угле увода  $\delta = +/ - 1^\circ$  за теоретическую кривую примем кривую, проходящую через точки  $x_i$ . Для этого осуществим интерполяцию полученных зависимостей полиномом четвертой степени [9, 10]. Аналитическое выражение для нее будем искать в виде полинома четвертой степени:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4. \quad (1)$$

С этой целью в формулу (1) подставим величины проскальзываний в пятне контакта шин по износу шин ( $y_i$ ), полученные при различных значениях износа рисунка протектора  $x = 0, 25, 50, 75$  и  $100$  %.

После подстановки значений в формулу (1), получим систему линейных алгебраических уравнений относительно  $a_i$  для шины 175/70R13 модели Бел-100 производства ОАО «Белшина» (срок хранения 1 год):

$$\left. \begin{aligned} a_0 &= 8,50; \\ a_1 \cdot 25 + a_2 \cdot 25^2 + a_3 \cdot 25^3 + a_4 \cdot 25^4 &= -1,5; \\ a_1 \cdot 50 + a_2 \cdot 50^2 + a_3 \cdot 50^3 + a_4 \cdot 50^4 &= -0,9; \\ a_1 \cdot 75 + a_2 \cdot 75^2 + a_3 \cdot 75^3 + a_4 \cdot 75^4 &= -3,1; \\ a_1 \cdot 100 + a_2 \cdot 100^2 + a_3 \cdot 100^3 + a_4 \cdot 100^4 &= -3,35. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Подставив значения  $a_i$  в выражение (2) и решив эту систему уравнений, получим функцию, описывающую теоретическую кривую изменения вели-

чины проскальзывания по износу шин 175/70R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (срок хранения 1 год) в виде:

$$y = 8,5 - 26,383333 \cdot 10^{-2}x + 1,267667 \cdot 10^{-2}x^2 - 2,0667 \cdot 10^{-4}x^3 + 1,029 \cdot 10^{-6}x^4.$$

Аналогично получим для шин 175/70 SR 13 модели ZX фирмы «Michelin»:

$$y = 13,75 - 23,916667 \cdot 10^{-2}x + 0,707333 \cdot 10^{-2}x^2 - 0,986667 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,442 \cdot 10^{-6}x^4$$

и для шин 175/70 R13 модели Бел-100 ОАО «Белшина» (новая):

$$y = 10,45 - 20,3666667 \cdot 10^{-2}x + 0,8266667 \cdot 10^{-2}x^2 - 1,373333 \cdot 10^{-4}x^3 + 0,661 \cdot 10^{-6}x^4.$$

В заключение следует отметить, что полученные зависимости величин проскальзываний в пятне контакта шин по мере ее износа существенно зависят от конструкции брекера, рецептуры протектора и срока хранения. Поэтому при создании новых математических моделей автомобилей необходимо учитывать полученные выше зависимости, что позволит с большей точностью прогнозировать показатели устойчивости и управляемости автомобиля.

## Список литературы

1. Кнороз, В.И. Работа автомобильной шины / В.И. Кнороз. — М.: Транспорт, 1976. — 338 с.
2. Третьяков, О.Б. Трение и износ шин / О.Б. Третьяков, В.А. Гудков, В.Н. Тарновский. — М.: Химия, 1992. — 176 с.
3. Эллис, Д.Р. Управляемость автомобиля / Д.Р. Эллис. — М.: Машиностроение, 1975. — 215 с.
4. Антонов, Д.А. Расчет устойчивости движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. — М.: Машиностроение, 1984. — 168 с.
5. Антонов, Д.А. Теория устойчивости движения многоосных автомобилей / Д.А. Антонов. — М.: Машиностроение, 1978. — 216 с.
6. Шадрин, С.С. Методика расчетной оценки управляемости и устойчивости автомобиля на основе результатов полигонных испытаний: дис. ... канд.техн.наук: 28.10.2010 / С.С. Шадрин. — М., 2009. — 131 с.
7. Медведицков, С.И. Влияние износа шин на характеристики увода колеса, устойчивость и управляемость автомобиля: дис. ... канд.техн. наук: 14.06.1989 / С.И. Медведицков. — Волгоград, 1988. — 182 с.
8. Устройство измерительное для исследования перемещений колеса автомобиля в пятне контакта шины с опорной поверхностью / В.В. Брылев, С.И. Медведицков, Г.В. Борисенко. — Запорожье: Облполиграфиздат, 1988. — № 928. — 4 с.
9. Демидов, В.М. Методы и средства цифровой коррекции изображения в оптико-электронных системах визуализации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 10.06.08 / В.М. Демидов; МИИ Га и К. — М., 2008. — 22 с.
10. Михайлов, Е.М. Интерполяция функции заданной средними значениями / Е.М. Михайлов // Вестн. ВГУ. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. — 2008 — № 2. — С. 25–27.

Medveditskov S.I., Vardanyan R.S.

### Research of dependence of changes values of slipping of tire in the process of its deterioration

Dependences of changes values of slipping of automobile tires of various models and period of storage in a contact spot in a leading mode in process of increase of small corners of withdrawal, as the result of deterioration of drawing of a protector are received.

**Keywords:** tire, slipping, corners of withdrawal, deterioration of protector, model of tire, leading mode

Поступила в редакцию 29.04.2013.