

УДК 621.867.8

Н. Н. Лукашков, И. В. Лесковец, канд. техн. наук**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНОЙ МАШИНЫ**

В статье рассмотрены недостатки существующих методов выбора основных параметров шины, выявлены преимущества и недостатки моделирования сложных динамических систем с большим количеством подвижных элементов с помощью ЭВМ. Предлагается метод для моделирования пневматических шин на основе рассмотрения шины как набора элементов с сосредоточенными параметрами, которые обладают упругими связями. С целью реализации предлагаемой методики устанавливается система координат для однозначного определения каждого элемента шины в пространстве. Разработана математическая модель шины. Приведены основные допущения и предположения, которые использованы при составлении модели. Разработан экспериментальный стенд, предназначенный для подтверждения адекватности результатов, полученных при использовании разработанной методики.

Введение

Определение тягово-сцепных свойств шин на этапе проектирования производится на основании методов, рассматривающих взаимодействие шины с опорной поверхностью при статическом нагружении. В реальных условиях эксплуатации техники происходит динамическое изменение нагрузок, действующих на шину, вследствие чего изменяются и тягово-сцепные свойства техники. Для описания динамических нагрузок в проектных расчетах шины используются коэффициенты динамичности, которые позволяют лишь определить максимально возможные действующие силы. Методика выбора параметров шин [1–5], таких как высота и шаг грунтозацепов, норма слойности, геометрические размеры и т. д., не в полной мере учитывает особенности работы шины, в том числе в режиме динамического нагружения.

Важным аспектом при конструировании новых или модернизации уже существующих шин является то, что стоимость и трудоемкость проведения лабораторно-дорожных испытаний серийных и опытных образцов шин для оценки их тягово-сцепных свойств были и остаются достаточно высокими. Причем данные затраты в случае проведения предварительных испытаний опыт-

ных образцов шин будут намного выше в связи с тем, что себестоимость их изготовления в несколько раз выше, чем серийной продукции. Результаты испытаний модели шины в некоторых случаях затруднены воздействием ряда случайных, неконтролируемых экспериментатором факторов: отклонения в технологическом процессе изготовления образца, отклонения начальных параметров установки колеса, дорожных и климатических условий и т. д.

На сегодняшний день существует тенденция к разработке имитационных моделей различных элементов [6] и систем строительно-дорожных машин, процессов работы машин, что позволяет на стадии проектирования новой техники или модернизации старой обеспечивать наилучшие показатели работы машины. Программное обеспечение различных производителей, созданное на основании имитационных моделей, предоставляет конструкторам ряд возможностей для проведения статических и динамических расчетов с целью получения оптимальных характеристик [6]. Наиболее широкое распространение в этой области нашли программные продукты, основанные на использовании метода конечных элементов (МКЭ). За последние годы этот метод успешно совершенствовался и применяется в раз-

личных областях науки и техники. Однако, наряду с широкими возможностями, МКЭ имеет ряд недостатков, из-за которых его использование при решении задач, в которых присутствует большое количество подвижных элементов, невозможно либо требует ощутимых затрат ресурсов и времени, и его применение становится крайне неэффективным. К таким задачам относится проектирование систем с большим количеством подвижных элементов и др. В ряде случаев конструкторы и ученые успешно применяют системы реализации математических моделей, основанные на современных методах моделирования. Но такие системы также имеют недостатки: необходимость разработки уникальных математических моделей в каждом конкретном случае, высокая квалификация работников, невозможность визуализации поведения проектируемой системы, существенные затраты времени, требуемого для расчета, из-за работы таких систем в режиме «интерпретатора».

Имитационная модель пневмошины

Имитационное моделирование как средство изучения физического объекта или системы путем их замены упрощенной моделью с сохранением наиболее существенных признаков реального объекта допускает ряд обобщений и предположений. В результате реальный объект исследования трансформируется в динамическую систему, состояние которой в пространстве и времени однозначно задается обобщенными координатами.

Как правило, процедура математического моделирования проводится в три этапа. На первом этапе необходимо оговорить набор допущений (абсолютная жесткость конструкции, идеальность связей и т. п.), формирующих механическую модель объекта. На втором – составляются уравнения этой механической модели – математической модели, адекватной своему механическому ана-

логу. На третьем – проводится аналитическое или численное исследование математической модели.

Применительно к имитационной модели пневмошины авторами сделаны следующие допущения:

– коэффициент жесткости не постоянен, а зависит от деформации материала шины. Причем закон изменения представляет собой нелинейную зависимость;

– жесткости боковины шины в радиальном и тангенциальном направлениях несколько отличаются друг от друга. Учитывая расположение нитей корда, коэффициент радиальной жесткости будет больше, чем коэффициент тангенциальной жесткости, при радиальном расположении нитей корда и меньше при тангенциальном.

Будем считать, что происходящие в шине тепловые процессы не оказывают влияния на физико-механические свойства материала, из которого изготовлена шина, поскольку в процессе технологических операций строительно-дорожных машин период транспортирования характеризуется скоростью движения до 40 км/ч. А как показывают исследования [7], при таких скоростях температура, до которой успевает нагреться шина, мала, чтобы вызывать изменение физико-механических свойств как корда, так и резины.

Что касается процессов, происходящих с газом внутри оболочки, то наиболее адекватной моделью поведения газа, по-видимому, является модель политропного процесса с единственным предположением постоянства только теплоемкости газа.

При нагружении колеса радиальной силой, помимо вертикальной деформации шины в зоне контакта колеса с опорной поверхностью, возникают деформации в верхней части шины. Причем численное значение радиальной деформации увеличивается по мере приближения к зоне контакта колеса с опорной поверхностью (рис. 1).

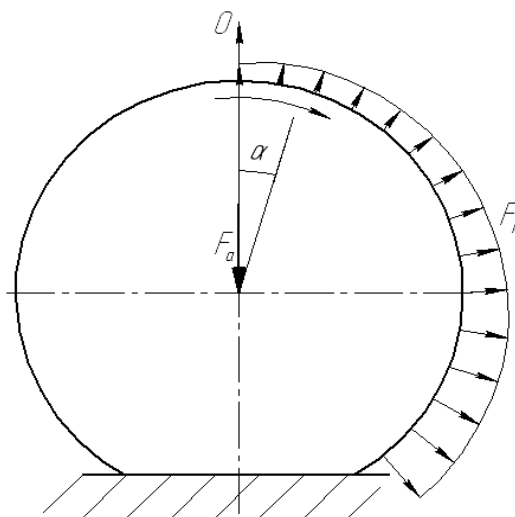


Рис. 1. Сила, действующая на внутреннюю поверхность колеса со стороны газа внутри оболочки под действием вертикальной нагрузки

Однако проведенные авторами опыты позволяют сделать вывод о том, что для некоторых типов шин возникающими в данном случае деформациями можно пренебречь, т. к. они значительно меньше радиальной деформации нижней части шины. Следовательно, при расчетах верхний сектор колеса можно сильно упростить или совсем не учитывать, что облегчит расчет пневмошины.

Таким образом, получаемая в результате вышеперечисленных допущений и предположений имитационная модель практически сохраняет основные свойства реальной пневматической шины. Кроме этого, применение данных допущений и предположений позволяет упростить математическую модель, что ускорит процесс расчета при использовании программного обеспечения.

Проанализировав структуру колеса, авторы предлагают выделить следующие элементы (рис. 2): недеформируемый диск, расположенный на оси машины, и шину, которая состоит из четырех элементов: двух боковин, опорной части и грунтозацепов. Элементы шины, в свою очередь, разбиваются на множество недеформируемых элементов. Каждый элемент обладает

своим набором массовых и геометрических характеристик, определяющих геометрию элемента и позволяющих однозначно определить его положение в пространстве в определенный момент времени.

Для удобства расчетов заменим декартову систему координат на две сферических с центрами в точках O и O_b для элементов боковины и O и O_0 для элементов протектора и опорной поверхности. Тогда положение элемента боковины в плоскости, параллельной поверхности диска, определяется радиусом-вектором R центра тяжести этого элемента и углом наклона радиуса-вектора относительно оси координат α .

Положение этого элемента в плоскости сечения также задается радиусом-вектором Rb и углом γ . Данные системы координат связаны между собой геометрическим уравнением [8]

$$R = Rd + Rb \cdot \sin \gamma,$$

где R – радиус-вектор элемента в плоскости, параллельной плоскости диска; Rd – радиус диска; Rb – вектор элемента в сечении колеса плоскостью, нормальной боковой поверхности диска; γ – угол наклона радиуса-вектора Rb к оси координат.

Положение элементов протектора и грунтозацепов заданы аналогичным образом.

Связь между всеми элементами упругая и задается из условия нераз-

рывности связей. Так, на один элемент шины (рис. 3) со стороны окружающих его элементов действуют силы, направленные по нормальным и тангенциальным направлениям.

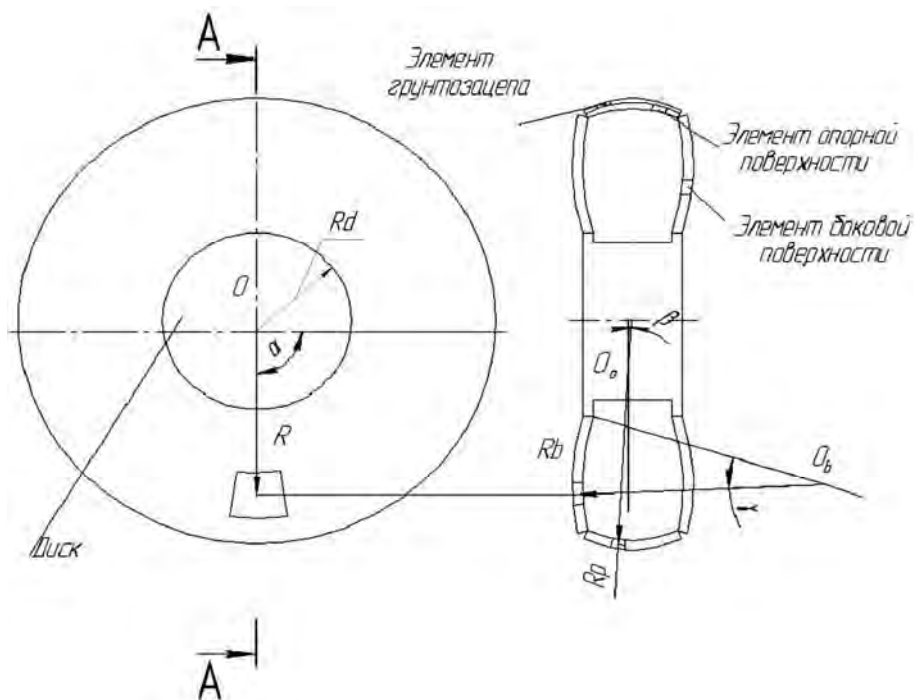


Рис. 2. Структура колеса: R – радиус-вектор элемента в плоскости, параллельной плоскости диска; Rd – радиус диска; Rb, Rp – радиус-вектор элемента боковой и опорной поверхности в сечении колеса плоскостью, нормальной боковой поверхности диска; γ – угол наклона радиуса-вектора Rb к оси координат; β – угол радиуса-вектора

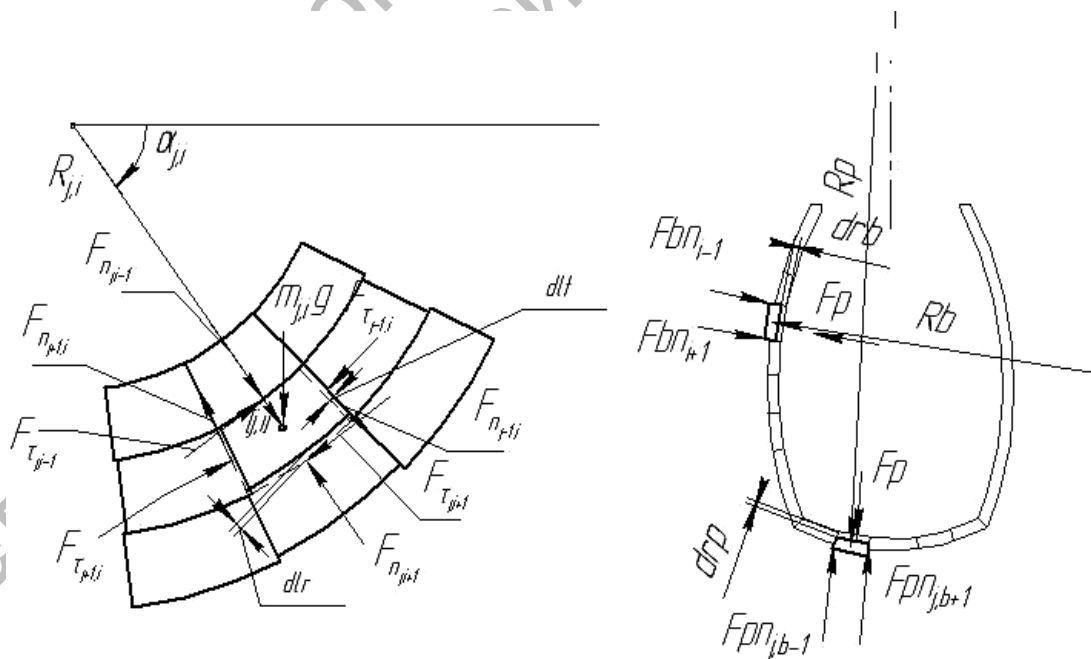


Рис. 3. Динамическая модель: $[j, i]$ – номер рассматриваемого элемента; F – силы, воздействующие на элемент со стороны других элементов; τ – силы, воздействующие на элемент, направленные вдоль оси R ; n – силы, воздействующие на элемент, направленные поперек оси R

Составляющими реакций являются силы упругости и диссипативные силы, наличие которых определяется физико-механическими свойствами материала шины. Помимо этих сил, в плоскости сечения колеса возникает сила, обусловленная наличием давления внутри шины.

На основании динамической модели составлена математическая модель элемента, которая представляет собой систему из трех уравнений, составленных на основании законов теоретической механики. Каждое уравнение составлено в своей системе координат.

$$\begin{aligned} \sum R: \\ dm_{j,i} \cdot \frac{d\dot{R}_{j,i}}{dt} = -dF_{n_{j,i+1}} - dF_{n_{j+1,i}} + \\ + dF_{n_{j-1,i}} + dF_{n_{j,i-1}} + dF_{dn_{j,i+1}} + \\ + dF_{dn_{j+1,i}} - dF_{dn_{j-1,i}} - dF_{dn_{j,i-1}} \times \\ \times (+dF_{p_{j,i}} - dF_{o_{j,i}})*; \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum M(0): \\ I_{j,i} \cdot \frac{d\dot{\alpha}_{j,i}}{dt} = -dF_{\tau_{j+1,i}} \cdot dR_{j,i} - \\ - dF_{\tau_{j,i+1}} \cdot dR_{j,i} + dF_{\tau_{j,i-1}} \cdot dR_{j,i} + \\ + dF_{\tau_{j-1,i}} \cdot dR_{j,i} + dF_{d\tau_{j+1,i}} \cdot dR_{j,i} + \\ + dF_{d\tau_{j,i+1}} \cdot dR_{j,i} - dF_{\tau_{j-1,i}} \cdot dR_{j,i} - \\ - dF_{\tau_{j,i-1}} \cdot dR_{j,i} - dF_{tr} \cdot dR_i^*; \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum Rb: \\ dm_{j,i} \cdot \frac{d\dot{R}b_{j,i}}{dt} = dFbn_{j,i-1} + \\ + dFbn_{j,i+1} - dFp_{j,i}. \quad (3) \end{aligned}$$

где dF_n – нормальная сила упругости, $dF_n = C_t \cdot dR$; dF_τ – касательная сила упругости, $dF_\tau = C_t \cdot d\alpha$; dF_{dn} – нормальная диссипативная сила, $dF_{dn} = K_d \cdot \frac{dR}{dt}$; $dF_{d\tau}$ – касательная диссипативная сила,

$dF_{d\tau} = K_d \cdot \frac{d\alpha}{dt}$; dF_p – сила, обусловленная наличием давления, $dF_p = P \cdot ds_{j,i}$; $I_{j,i}$ – момент инерции элемента; C_t , K_d – коэффициенты упругих и диссипативных сил, зависящих от материала шины; dR , $d\alpha$ – элементарные перемещения вдоль и касательно радиусу колеса; $dm_{j,i}$ – масса элемента поверхности шины; $ds_{j,i}$ – площадь поверхности элемента шины.

Примечание – * – для элемента боковой поверхности.

Уравнение (1) системы представляет собой сумму моментов сил, действующих на элемент относительно оси вращения колеса. Уравнение (2) отражает равновесие элемента в радиальном направлении, (3) – равновесие в плоскости сечения шины.

Начальным условием для решения полученной системы является статическое положение шины, т. е. все силы, за исключением гравитационной, отсутствуют. Решение системы дифференциальных уравнений осуществляется методом Рунге-Кутты второго порядка с коррекцией по средней производной, поскольку погрешность дифференцирования при его использовании довольно мала. Решение уравнений дает возможность определить значения ускорений, скоростей и перемещений, а также текущее положение каждого элемента шины, что, в свою очередь, позволяет выявить поведение упругой шины при её движении по опорной поверхности.

Экспериментальный стенд

Помимо результатов, полученных при помощи математической модели, необходимо проведение эксперимента, позволяющего сравнить эти данные с расчетными для подтверждения адекватности полученной модели. Проведение эксперимента в реальных условиях осложнено рядом факторов, таких как сложность определения нагрузок, действующих на рабочее оборудование,

трудности при установке датчиков на машине, колебания машины в период работы и т. д. Поэтому необходимо создание экспериментального стенда, использование которого в полной мере отразит поведение шины в условиях работы, близких к реальным.

Стенд (рис. 4) представляет собой расположенную на роликах конструкцию, к которой шарнирно крепится подвижная рама. На подвижную раму 1 устанавливается колесо 4 и привод, посредством которого момент передается на колесо. Передача момента осуществляется через зубчато-ременную передачу 7. Стенд располагается в грунтовом

канале таким образом, что ролики 2 перекатываются по направляющим в горизонтальной плоскости, когда само колесо под действием приложенного крутящего момента перекатывается по грунту или плоскости. Перекатывание колеса по грунту с предварительно созданными неровностями позволит воспроизвести условия проведения эксперимента близкими к реальным условиям работы машины. Имитация нагрузки от веса машины, создающей деформацию в радиальном направлении, осуществляется домкратом 5, имитация тангенциальной нагрузки – электродвигателем.

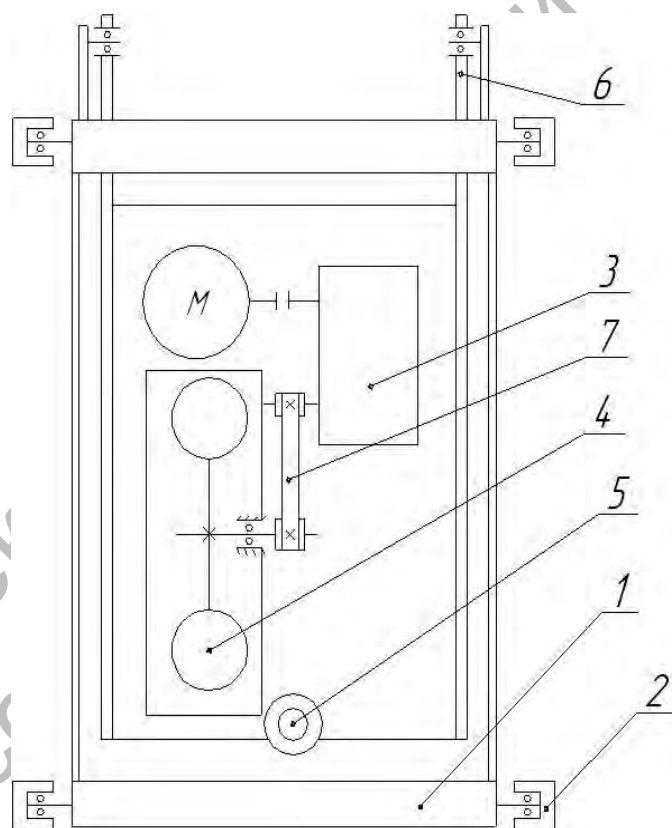


Рис. 4. Экспериментальный стенд: 1 – рама; 2 – ролик; 3 – привод; 4 – колесо; 5 – домкрат; 6 – подвижная рама; 7 – зубчато-ременная передача

Данный стенд позволит определить не только радиальную и касательную деформации колеса, но и коэффициент сопротивления качению, и площадь пятна контакта колеса с опорной

поверхностью; экспериментальное определение данных величин – оценить адекватность разработанной имитационной модели.

Заклучение

Имитационная модель позволит определить радиальную и тангенциальную деформацию пневматической шины, коэффициент сопротивления качению, пятно контакта шины с опорной поверхностью, выбрать расположение и параметры грунтозацепов, а также моделировать ситуации, которые затруднительно, а порой и невозможно, воспроизвести при натурных испытаниях.

Благодаря имитационной модели пневмошины и использованию стенда появится возможность на стадии проектирования более точно выбирать параметры трансмиссии и двигателя, что приведет к снижению затрат на горючие материалы при эксплуатации техники.

Создание программного продукта, обеспечивающего реализацию математической модели, позволит использовать его в системе автоматизированного проектирования колесных движителей. После подтверждения адекватности решений, полученных с применением пакета программ, возможно проведение оптимизации основных параметров ко-

лесного движителя с использованием теории планирования эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ульянов, Н. А.** Основы теории и расчета колесного движителя землеройных машин / Н. А. Ульянов. – М. : Машиностроение, 1962. – 207 с.
2. **Смирнов, Г. А.** Теория движения колесных машин : учебник / Г. А. Смирнов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Машиностроение, 1990. – 352 с. : ил.
3. **Гуськов, В. В.** Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В. В. Гуськов. – М. : Машиностроение, 1966. – 196 с.
4. **Яценко, Н. Н.** Поглощающая и сглаживающая способность шин / Н. Н. Яценко. – М. : Машиностроение, 1978. – 132 с.
5. **Ротенберг, Р. В.** Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р. В. Ротенберг. – М. : Машиностроение, 1972. – 392 с.
6. **Колесов, Ю. Б.** Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю. Б. Колесов. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. – 239 с.
7. **Ларин, О. М.** Теоретические основы оценки работоспособности шин легкового автомобиля в эксплуатации : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 2001. – 32 с.
8. **Лукашков, Н. Н.** Параметры элементов имитационной модели пневмошины / Н. Н. Лукашков, И. В. Лесковец // Вестн. БГТУ. Машиностроение. – 2008. – № 4 (52). – С. 67–69.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 22.07.2010

N. N. Lukashkov, I. V. Leskovets
Simulation model of the pneumatic
tyre of the road-building machine

In the paper disadvantages of existing methods of sampling of basic quantities of the tyre are resulted, advantages and disadvantages of modelling of complex dynamic systems with a considerable quantity of sliding units by means of the computer are revealed. The method for modelling pneumatic wheels is offered on the basis of the consideration of a wheel as set of elements with the lumped parameters which possess spring linkage. With the purpose of the realization of the suggested method the coordinate system for the unique determination of each element of a wheel in space has been established. The mathematical model of the tyre has been developed. The main assumptions and suppositions which were used at the model design are presented in the paper. The experimental desk for the confirmation of the adequacy of the results gained at usage of the developed method has been developed.