

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель ООО "Научно-техническое издательство "Инновационное машиностроение"

Главный редактор **И. Ф. ГУМЕРОВ**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора ПАО "КАМАЗ" — директор по развитию

Заместитель главного редактора **А. С. САВЧЕНКО**

Редакционный совет

В. С. Антипенко, д-р техн. наук, проф.
Е. В. Балакина, д-р техн. наук, проф.
Д. Х. Валеев, д-р техн. наук
Ю. Э. Васильев, д-р техн. наук, проф.
С. М. Гайдар, д-р техн. наук, проф.
Л. В. Грехов, д-р техн. наук, проф.
В. А. Зорин, д-р техн. наук, проф.
М. Ю. Карелина, д-р техн. наук, проф.
Н. Т. Катанаев, д-р техн. наук, проф.
В. Н. Козловский, д-р техн. наук, проф.
В. В. Комаров, канд. техн. наук
А. В. Кочетков, д-р техн. наук, проф.

В. А. Марков, д-р техн. наук, проф.
Л. Б. Миротин, д-р техн. наук, проф.
А. Н. Новиков, д-р техн. наук, проф.
А. Н. Ременцов, д-р пед. наук, проф.
О. Н. Румянцева, генеральный директор ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
А. Ф. Синельников, канд. техн. наук, проф.
А. А. Солнцев, д-р техн. наук, проф.
В. С. Устименко, канд. техн. наук
Х. А. Фасхиев, д-р техн. наук, проф.
Н. Д. Чайнов, д-р техн. наук, проф.

Корпункт:

Я. Е. Карповский (г. Минск)

Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 12
Тел. (499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; gruzovik.mashin@gmail.com,
<http://www.mashin.ru>

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 2
Тел. (495) 661-03-36

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Регистрационный номер ПИ № ФС 77-63955 от 09.12.2015 г.

Подписной индекс:
по объединенному каталогу
"Пресса России" 39799

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», "Грузовик", 2021

Перепечатка материалов из журнала «Грузовик» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Грузовик» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

В НОМЕРЕ:

Конструкция

- 3** Макарова И. В., Габсалихова Л. М., Мухаметдинов Э. М., Ишмухаметов Р. Р. Повышение надежности коленчатых валов автомобильных двигателей

Исследования. Расчет

- 8** Рябов И. М., Ковалев А. М., Тимошин Н. В., Данилов С. В., Омарова З. К. Метод оценки скорости движения автомобиля на маршруте с учетом ровности дорожного покрытия
- 16** Есаков А. Е. Анализ методических погрешностей энкодеров автомобильных электронных систем

Эксплуатация. Ремонт

- 26** Бараш А. Л., Волокушин Р. В. Прогнозирование потребности парков строительной и автомобильной техники в запасных частях и эксплуатационных материалах методом объединения прогнозов

Транспортный комплекс

- 29** Ромашко А. М., Тхань До Суан. Модель микроконтакта фрикционных материалов в узлах трения подъемно-транспортных машин при разных температурах

Безопасность

- 37** Попов А. В., Соколов Р. О. Исследование проявлений утомления среди водителей грузовых автомобилей в Российской Федерации

Автоспорт

- 42** Аликин Д. С., Головин Д. В., Петухов М. Ю., Щелудяков А. М. Результаты проектирования стабилизаторов поперечной устойчивости болида "Формула Студент" ПНИПУ

Информация

- 48** Выставки. Конференции. Презентации



SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL MAGAZINE

Founder JSC Scientific and Technical Publishing House
"Innovative Engineering"

Editor-in-Chief I. F. GUMEROV, cand. tehn. s.,
deputy general director JSC "KAMAZ" —
director of development

Deputy Editor-in-Chief A. S. SAVCHENKO

Editorial council

V. S. Antipenko,
dr. en. s., prof.

E. V. Balakina,
dr. en. s., prof.

D. H. Valeev,
dr. en. s.

Ju. E. Vasilyev,
dr. en. s., prof.

S. M. Gaidar,
dr. en. s., prof.

L. V. Grekhov,
dr. en. s., prof.

V. A. Zorin,
dr. en. s., prof.

M. Ju. Karelina,
dr. en. s., prof.

N. T. Katanaev,
dr. en. s., prof.

V. N. Kozlovsky,
dr. en. s., prof.

V. V. Komarov,
cand. tehn. s.

A. V. Kochetkov,
dr. en. s., prof.

V. A. Markov,
dr. en. s., prof.

L. B. Mirotin,
dr. en. s., prof.

A. N. Novikov,
dr. en. s., prof.

A. N. Rementsov,
dr. hab, phd in en. s.

O. N. Rumyantseva,
gen. dir. JSC "Publisher
"Innovative Engineering"

A. F. Sinelnikov,
cand. tehn. s., prof.

A. A. Solntsev,
dr. en. s., prof.

V. S. Ustymenko,
cand. tehn. s.

J. A. Faskhiyev,
dr. en. s., prof.

N. D. Chaynov,
dr. en. s., prof.

Correspondent's office:

Ya. E. Karpovsky (Minsk)

Address of the editorial office:

107076, Moscow, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 12
Ph. (499) 269-48-96

E-mail: gruzovik@mashin.ru; gruzovik.mashin@gmail.com;
<http://www.mashin.ru>

Address of publishing house:

107076, Kolodezny Lane, house 2-a, str. 2
Ph. (495) 661-03-36

The magazine is registered by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Communications
(Roskomnadzor).

Registration number PI number FS77.-63955
on December 9, 2015

Subscription index:

according to the integrated catalog
"Press of Russia" 39799

JSC Innovatsionnoye mashinostroyeniye Publishing House,
"Truck", 2021

CONTENTS:

Design

- 3** Makarova I. V., Gapsalikhova L. M.,
Mukhametdinov E. M., Ishmukhametov R. R.
Improving reliability of crankshafts of automotive
engines

Research. Calculation

- 8** Ryabov I. M., Kovalev A. M., Timoshin N. V.,
Danilov S. V., Omarova Z. K. Method for
estimating the speed of a car on a route, taking
into account the evenness of the road surface
- 16** Esakov A. E. Analysis of automotive electronic
systems encoders metodological errors

Operation. Repair

- 26** Barash A. L., Volokushin R. V. Forecasting the
demand of parts of construction and automotive
equipment for spare parts and operating materials
by the method of combining forecasts

Transport complex

- 29** Romashko A. M., Thanh Do Xuan. The micro
contact model of friction materials in friction
hoisting-and-transport cars at different
temperatures

Safety

- 37** Popov A. V., Sokolov R. O. Study of fatigue
symptoms among truck drivers in the Russian
Federation

Autosport

- 42** Alikin D. S., Golovin D. V., Petukhov M. Yu.,
Shcheludyakov A. M. Results of the design of cross-
stability stabilizers of the car Formula Student
PNRPU

Information

- 48** Exhibitions. Conferences. Presentations



И. В. Макарова, д-р техн. наук, профессор, e-mail: kamIVM@mail.ru,
Л. М. Габсалихова, канд. техн. наук, доцент, e-mail: muhametdinoval@mail.ru,
Э. М. Мухаметдинов, канд. техн. наук, доцент, e-mail: funte@mail.ru,
Казанский федеральный университет (филиал), г. Набережные Челны,
Р. Р. Ишмухаметов, инженер-конструктор, ПАО "КАМАЗ", e-mail: brail199615@gmail.com,
г. Набережные Челны

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье рассмотрены факторы, влияющие на надежность коленчатых валов. Проведен анализ рекламаций двигателей, построен график изменения частоты отказов в зависимости от наработки. Целью работы является решение задачи повышения эксплуатационной надежности коленчатых валов дизельных двигателей КАМАЗ путем совершенствования технологического процесса изготовления и обработки коленчатого вала.

Ключевые слова: надежность, коленчатый вал, твердость, анализ рекламаций.

The article considers the factors influencing the reliability of crankshafts. Analysis of engine complaints was carried out, schedule of change of failure frequency depending on operating time was built. The purpose of the work is to solve the problem of improving the operational reliability of the crankshafts of KAMAZ diesel engines by improving the technological process of manufacturing and processing the crankshaft.

Keywords: reliability, crankshaft, hardness, complaint analysis.

1. Введение. Создание автомобиля с высокой степенью надежности должно рассматриваться на всех этапах жизненного цикла автомобиля, особенно на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации. Информация об отказах фиксируется на этапе эксплуатации автомобиля и передается разработчикам для совершенствования конструкции и отладки технологии производства автомобильной техники. Сбор достоверных данных о рекламациях автомобилей из эксплуатации является очень важным вопросом, учитываемым при проектировании автомобиля и оценке его надежности в целом.

Вопросы надежности автомобильных двигателей являются актуальными на сегодняшний день. Одной из важных деталей двигателя является коленчатый вал. Во время эксплуатации коленчатый вал подвергается большим переменным нагрузкам. В большинстве случаев при выходе из строя коленчатый вал не подлежит восстановлению и требует замены.

Процесс изготовления коленчатых валов представляет собой литье, механическую и термическую обработку. После механической обработки

коленчатый вал проходит несколько этапов термической обработки на участке термо-гальванического производства. После внешнего осмотра проводится промывка детали моющим средством с антикоррозийными присадками и проводится закалка с отпуском.

В данной статье предлагается повышение эксплуатационной надежности коленчатых валов дизельных двигателей КАМАЗ путем совершенствования технологического процесса изготовления и обработки коленчатого вала.

2. Вопросы повышения надежности коленчатого вала автомобильного двигателя. Надежность зависит от множества факторов, которые различны на каждом этапе жизненного цикла автомобильной техники. В статье [1] обоснована возможность повышения надежности грузовых автомобилей созданием современной системы и метода диагностики сцепления по изменению уровня вибрации в процессе эксплуатации. Анализ работ по повышению надежности автомобиля показал, что наибольшее число отказов из всех систем автомобиля приходится на двигатель внутреннего сгорания. Анализ надежности

автомобильных двигателей рассматривался в статьях [2, 3].

Основными направлениями работ по повышению надежности двигателей являются: совершенствование конструкции, исследование методов диагностики двигателей для предупреждения отказов. В статье [4] представлены возможные применения акустической диагностики при проверке технического состояния двигателя внутреннего сгорания. Исследование методов прогнозирования и диагностирования состояния двигателя являются важнейшими вопросами, решения которых напрямую способствуют поддержанию двигателя в работоспособном состоянии. Стендовые испытания двигателей не могут учесть все реальные условия эксплуатации, их проводят с целью оценки эффективности предложенных конструкционных и технологических методов обеспечения надежности.

Для оценки надежности агрегатов и систем автомобиля используют комбинацию методов, например FMEA и FTA. В статье разработанный подход называется анализом вида отказа и дерева эффектов (FMETA). FMETA позволяет конструктору найти наиболее критическую с точки зрения надежности характеристику изделия и предоставляет конструктору набор возможных изменений [5].

Используя методы теории вероятностей и математической статистики, а также методику обработки экспериментальной информации, авторами проанализирована выборка, насчитывающая 615 дефектных силовых агрегатов двигателя модели ВАЗ-21114 автомобилей Lada Kalina первого поколения в гарантийный период эксплуатации [6].

Вопросам по увеличению прочностных показателей и способов обработки в процессе изготовления и восстановления посвятили свои работы [7, 8]. Разработана концепция системы диагностирования и оперативного контроля остаточного ресурса узлов и агрегатов грузового автомобиля с целью повышения его надежности, безопасности и повышения качества обслуживания [9]. В статье [10] рассмотрена взаимосвязь параметров субструктуры получаемого покрытия и основных показателей, характеризующих работоспособность коленчатого вала.

Анализ работ показывает, что работы в данном направлении ведутся, однако вопросы обработки коленчатых валов с целью повышения эксплуатационной надежности остаются актуальными.

3. Анализ рекламаций двигателей. При анализе рекламаций был рассмотрен основной дефект при

выходе из строя коленчатого вала — выпадение полуколец коленчатого вала. Причиной являлось некачественное изготовление коленчатого вала, вследствие чего происходил более интенсивный износ. Полукольца выпадали из фиксирующих их пазов вследствие износа. Происходило это при долгом держании ноги на сцеплении на светофоре и при запуске холодного двигателя с выжатым сцеплением. Изнашивается полукольцо (как правило, заднее) и упорная часть коленчатого вала, появляется чрезмерный зазор и полукольцо выпадает из паза. Смещение коленчатого вала становится критическим и выталкивает полукольцо из крышки. При работе с таким смещением происходит интенсивный износ упорной части коленчатого вала. При устранении дефектов потребовалась полная разборка двигателя и замена коленчатого вала. Из 23 случаев 4 двигателя не подлежали ремонту.

Проведем обработку статистики отказов коленчатого вала двигателя в зависимости от наработки (пробега). Предварительная обработка данных заключается в их группировке.

4. Вероятность безотказной работы коленчатого вала двигателя. Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации, в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

Вероятность безотказной работы обозначается как $P_{(l)}$, которая определяется по формуле (1):

$$P_{(l)} = \frac{N_0 - r(l)}{N_0}, \quad (1)$$

где N_0 — число деталей в начале испытания; $r(l)$ — число отказов деталей к моменту наработки.

В процессе приближения срока эксплуатации к бесконечно большой величине вероятность безотказной работы будет стремиться к нулю $P(l \rightarrow \infty) = 0$. Таким образом, в процессе наработки величина вероятности безотказной работы изменяется в пределах от 1 до 0. Характер изменения вероятности безотказной работы в функции пробега показан на рис. 1

Частота отказов — это отношение числа элементов в единицу пробега, отнесенного к первоначальному числу испытываемых элементов. Другими словами, частота отказов является показателем, характеризующим скорость изменения вероятности отказов и вероятности безотказной работы по мере роста длительности работы.

Частота отказов обозначается как $a(\Delta l)$ и определяется по формуле (2):

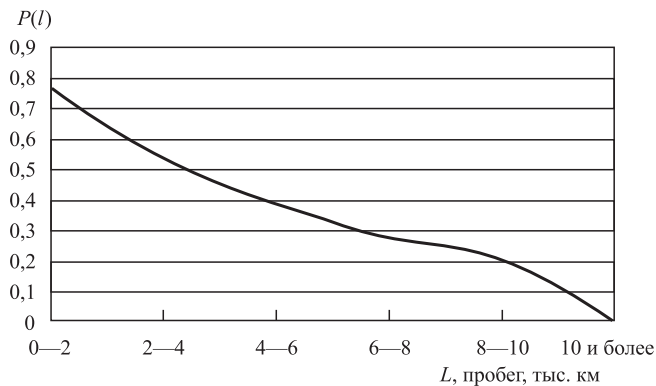


Рис. 1. График изменения вероятности безотказной работы $P(l)$ в зависимости от пробега

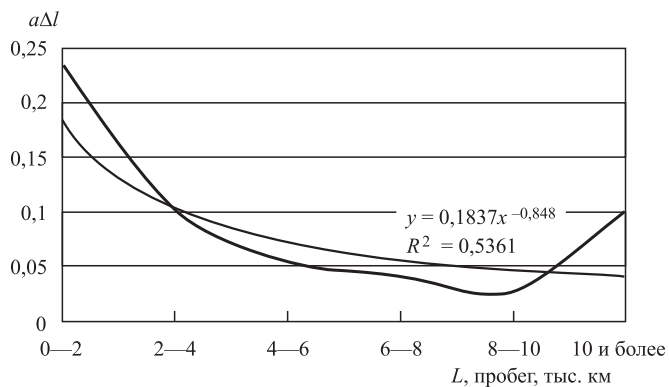


Рис. 2. График изменения частоты отказов в зависимости от наработки

$$a(\Delta l) = \frac{r(\Delta l)}{N_0 \Delta l}, \quad (2)$$

где $r(\Delta l)$ — количество отказавших элементов за промежуток пробега.

Характер изменения частоты отказов в функции пробега показан на рис. 2.

Средняя наработка до отказа — это средний пробег безотказной работы детали до отказа. Средняя наработка до отказа обозначается как L_1 и определяется по формуле (3):

$$L_i = \frac{l_i}{r_i}, \quad (3)$$

где l_i — наработка до отказа детали; r_i — число отказов.

Характер средней наработки до отказа в функции пробега показан на рис. 3.

Обработка статистики отказов в зависимости от пробега показала, что основная часть дефектов коленчатого вала за 2018 г. приходилась на начальные стадии пробега. С увеличением наработки частота дефектов уменьшается.

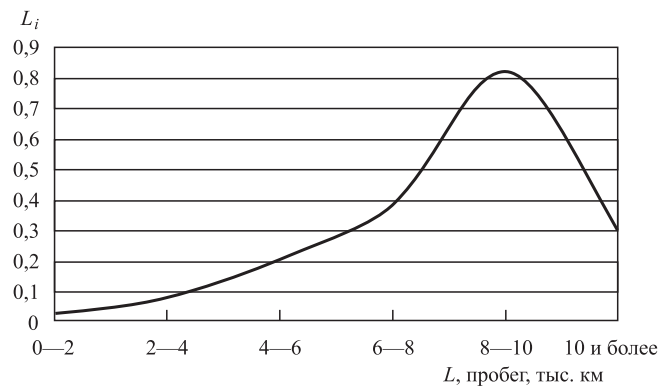


Рис. 3. График средней наработки до отказа в зависимости от пробега

Таким образом, можно установить, что основными причинами поломки коленчатого вала является возникновение износа схватыванием. Схватывание происходило в результате большой пластической деформации поверхностных слоев металла и образования металлических связей между контактными участками поверхностей, либо при трении скольжения с большими скоростями относительного перемещения и значительными удельными давлениями, при интенсивном повышении температуры в поверхностных слоях трущихся металлов и их пластичности. Данный анализ показывает, что имеется необходимость в увеличении прочности коленчатого вала, в основном в шейках, для сокращения количества дефектов при начальных стадиях работы коленчатого вала.

Разработка методики обработки коленчатого вала. После изучения принципа устройства печи азотирования, этапов процесса азотирования были рассмотрены факторы, которые могут повлиять на качество азотирования: концентрация аммиака, давление, температура, качество поверхности детали. При анализе поверхности деталей был замечен налет, который остался после моющего средства с антикоррозийными присадками, который мог понижать качество азотирования.

Предлагается дополнительная промывка коленчатого вала непосредственно перед азотированием, что обеспечивает гарантированное насыщение азотом и увеличение твердости, а также удаление мочевого раствора с антикоррозийными присадками. Рассмотрим процесс обработки коленчатого вала.

Транспортирование:

1. Подвезти детали к моечной машине.

Осмотреть детали: заусенцы, ржавчина, масло, грязь, забоины на поверхности деталей не допускаются (100 % деталей). При выявлении несоответствий — детали предъявить бюро технического контроля (БТК).

КОНСТРУКЦИЯ

Промывка:

1. Установить приспособление на роликовый транспорт вручную.
2. Взять деталь из тары и установить на приспособление с помощью кран-балки "Демаг".
3. Загрузить приспособление с деталями в мочечную машину при помощи кран-балки.
4. Промыть.
5. Выгрузить приспособление с деталями на роликовый транспорт с помощью кран-балки.
6. Просушить.

Отпуск:

1. Отгрузить деталь на приспособление с помощью кран-балки поворотного подъемного устройства.
2. Установить запорную крышку к хвостовику коленчатого вала и закрутить два болта вручную.
3. Установить коленчатый вал на приспособление для уборки при помощи установки "Хаген" (на ручном режиме).
4. Заглушить отверстия пробками и штифтами вручную.
5. Установить крышку вручную.
6. Установить несущую звезду на детали при помощи установки "Хаген" (на ручном режиме) и закрепить болтами вручную.
7. Установить несущую звезду с деталями на приспособление при помощи установки "Хаген".
8. Положить образец-свидетель на противовес коленчатого вала вручную.
9. Установить приспособление в печь при помощи крана "Демаг" (г/п 6.3 т).
10. Нагреть детали в печи.
11. Выдержать детали в печи.
12. Извлечь приспособления из печи и установить в рабочую камеру установки "Клекнер".

Промывка:

Вследствие анализа поверхности деталей, где был замечен налет, который остался после моющего средства с антикоррозийными присадками, было рассмотрено внедрение дополнительного этапа промывки коленчатого вала:

1. Установить приспособление на роликовый транспорт вручную.
2. Взять деталь из тары и установить на приспособление с помощью кран-балки "Демаг".
3. Загрузить приспособление с деталями в мочечную машину при помощи кран-балки.
4. Промыть моющим раствором Лабомид.

Азотирование:

1. Закрепить термopару в пробку коленчатого вала вручную.
2. Вакуумировать камеру установки до давления не менее 10 Па.

3. Произвести катодную очистку деталей при давлении от 0,06 до 0,4 мбар и при напряжении 700...900 В.

4. Нагреть детали, увеличивая давление до 300 Па (3 мбар).

5. Азотировать детали в камере установки при давлении 300 Па (3 мбар). Примечание: контролировать температуру и давление с записью в журнале. Дополнительно вести визуальный контроль нагрева.

6. Охладить детали в камере установки.

7. Отсоединить термopару вручную.

8. Извлечь приспособление с деталями из установки и установить на приспособление для охлаждения при помощи крана "Демаг".

9. Охладить детали.

10. Установить приспособление с деталями на станцию разгрузки при помощи крана "Демаг".

11. Снять несущую звезду с приспособления для азотирования и установить на приспособление для сборки при помощи установки "Хаген" (на ручном режиме).

12. Раскрутить болты вручную.

13. Снять несущую звезду и установить на приспособление для азотирования при помощи установки "Хаген".

14. Снять крышку с коленчатого вала вручную.

15. Извлечь все запорные штифты и пробки из отверстий коленчатого вала вручную.

16. Перенести коленчатый вал с приспособления для сборки на роликовый транспортер при помощи установки "Хаген".

17. Раскрутить болты и снять запорную крышку вручную.

18. Снять детали с роликового транспортера и уложить в тару при помощи крана "Демаг".

19. Передать в БТК образец-свидетель.

20. Установить деталь на приспособление для проверки твердости при помощи крана "Демаг".

Контроль:

1. Сдать образец-свидетель в экспресс-лабораторию.

2. Контролировать глубину азотированного слоя по протоколу экспресс-лаборатории.

3. Контролировать по протоколу экспресс-лаборатории твердость на расстоянии 0,25 мм от поверхности.

Поверхность азотирования не менее 0,6 мм.

Испытания механические на твердость:

1. Зачистить площадку на детали для замера твердости вручную.

2. Проверить твердость поверхности детали. Твердость не менее 600 HV. Среднее значение проверки:

КОНСТРУКЦИЯ

$$HV = 603 \text{ Н/мм}^2, h = 0,64 \text{ мм.}$$

Среднее значение проверки после дополнительной промывки перед азотированием:

$$HV = 615, h = 0,68 \text{ мм,}$$

где HV — значение твердости по Викерсу; h — глубина азотированного слоя.

Контроль внешнего вида:

1. Проверить визуально внешний вид деталей: ржавчина, окалина на поверхности шеек коленчатого вала не допускаются.

Транспортирование:

1. Перевезти детали на склад.

При этапе мойки коленчатый вал на подвесках с помощью цепного конвейера проходит через моечную машину.

После внедрения дополнительного этапа мойки технологический процесс изготовления и обработки коленчатого вала на термогальваническом участке будет иметь следующий вид:

Внедрение дополнительного этапа мойки может быть выполнено с помощью замены моющего раствора в имеющемся оборудовании для мойки коленчатого вала или транспортировкой коленчатого вала в главный корпус к устройству мойки с чистящим раствором или установкой отдельной мойки на участок термо-гальванического производства.

В случае азотирования без мойки слой будет меньше и неравномерный, что увеличивает частоту ремонта оборудования.

Заключение. Практическая значимость работы заключается в том, что использование разработанного технологического процесса изготовления и обработки коленчатого вала будет способствовать повышению эксплуатационной надежности коленчатых валов двигателей КАМАЗ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Кулаков А. Т., Мухаметдинов Э. М., Гарипов Р. И., Габсалихова Л. М. Разработка встроенной системы диагностирования сцепления для повышения надежности автомобилей // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2018. — № 4. — С. 54—59.
- Reliability** Analysis for Automobile Engines: Conditional Inference Trees / Sh. Wanga, Y. Liu, C. Di Cairano-Gilfedder, S. Titmus, M. M. Naim, A. A. Syntetos // Procedia CIRP. — 2018. — Vol. 72. — P. 1392—1397.
- Wu X., Zhu Z., Fan Sh., Su X.** Failure and reliability prediction of engine systems using iterated nonlinear filters based state-space least square support vector machine method // Optik. — 2016. — Vol. 127. — Iss. 3. — P. 1491—1496.
- Acoustic** Diagnostics Applications in the Study of Technical Condition of Combustion Engine/ A. Deptuła, D. Kunderman, P. Osiński, U. Radziwanowska, R. Włostowski // Archives of Acoustics. — 2016. — Vol. 41. — No. 2. — P. 345—350.
- Arcidiacono G., Campatelli G.** Reliability Improvement of a Diesel Engine Using the FMETA Approach // Qual. Reliab. Engng. Int. — 2004. — № 20. — P. 143—154.
- Денисов И. В., Смирнов А. А.** Надежность двигателя ВАЗ-21114 автомобилей LADA KALINA // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2020. — № 4. — С. 12—16.
- Денисов А. С., Погораздов В. В., Тугушев Б. Ф., Горшенина Е. Ю.** Технологическое обеспечение качества восстановленных коленчатых валов дизельных двигателей // Вестник Саратовского государственного технического университета. — 2010. — Т. 4. — № 1 (49). — С. 49—54.
- Решетникова Е. П., Бочкарев П. Ю., Захаров О. В.** Комплекс математических моделей для контроля технически сложных поверхностей на мобильных координатно-измерительных машинах // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. — 2015. — Т. 17. — № 3. — С. 48—60.
- Диагностирование** и оперативный контроль остаточного ресурса узлов и агрегатов автомобиля / И. В. Макарова, А. Т. Кулаков, Э. М. Мухаметдинов, Л. М. Габсалихова, А. В. Васильев // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. — 2018. — № 2. — С. 54—60.
- Фомин А. И., Комаров В. А., Нуязин Е. А.** Формирование работоспособного поверхностного слоя для обеспечения надежности коленчатых валов автотракторной техники // Техника и оборудование для села. — 2017. — № 5. — С. 26—31.

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАСЧЕТ

УДК 656.13:656.025.47

DOI: 10.36652/1684-1298-2021-1-8-15

И. М. Рябов, д-р техн. наук, проф., e-mail: rjabov1603@mail.ru, **А. М. Ковалев**, канд. техн. наук, e-mail: ak-553@yandex.ru, **Н. В. Тимошин**, асп., e-mail: titan_34rus@mail.ru, ВолгГТУ, г. Волгоград, **С. В. Данилов**, канд. техн. наук, e-mail: sergey-danilov1@ya.ru, СКГА, г. Черкесск, **З. К. Омарова**, e-mail: zalmu-o@yandex.ru, МФ МАДИ, г. Махачкала

МЕТОД ОЦЕНКИ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ НА МАРШРУТЕ С УЧЕТОМ РОВНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

Статья посвящена разработке метода оценки скорости автомобиля на маршруте с учетом ровности дорожного покрытия. Показано, что в РФ неровных участков на автомобильных дорогах общего пользования и федерального значения существенно больше, чем ровных. Отмечено, что информация о показателях международного индекса ровности автомобильных дорог собирается и используется в Федеральном дорожном агентстве "РОСАВТОДОР" для совершенствования разделов обеспечения безопасности дорожного движения в АБДД "Дорога". Рассмотрены конструкции толкочмеров. На основе анализа статистических исследований показано, что в г. Волгограде в 2008—2010 гг. показатели ровности на маршрутах троллейбуса превышали предельно допустимое значение на 45...94 %. Изложена сущность предлагаемого метода оценки скорости автомобиля на маршруте с учетом ровности дорожного покрытия. Она заключается в использовании зависимости его средней технической скорости от показателя ровности дорожного покрытия, полученной в результате анализа обработки данных длительного наблюдения за скоростью автомобилей данного типа при их эксплуатации. Показано, что метод позволяет автоматизировать процесс оперативной оценки средней технической скорости движения автомобилей, а применение метода позволит повысить производительность подвижного состава и прибыль АТП.

Ключевые слова: метод оценки, автомобиль, скорость движения, маршрут, ровность дорожного покрытия.

The article is devoted to the development of a method for estimating the speed of a car on a route, taking into account the evenness of the road surface. It is shown that in the Russian Federation there are significantly more uneven sections on public and Federal highways than there are flat ones. It is noted that information on the indicators of the international road evenness index is collected and used by the Federal road Agency ROSAVTODOR to improve the road safety sections of the Road safety Department. The designs of push meters are considered. Based on the analysis of statistical studies, it is shown that in Volgograd in 2008—2010, the evenness indicators on trolleybus routes exceeded the maximum permissible value by 45...94 %. The essence of the proposed method for estimating the speed of a car on the route, taking into account the evenness of the road surface, is described. It consists in using the dependence of its average technical speed on the evenness of the road surface, obtained as a result of analyzing the processing of data from long-term monitoring of the speed of cars of this type during their operation. It is shown that the method allows you to automate the process of rapid assessment of the average technical speed of cars, and the application of the method will increase the productivity of rolling stock and the profit of ATP.

Keywords: evaluation method, vehicle, speed, route, road surface evenness.

Увеличение средних технических скоростей движения автомобилей является перспективным путем повышения их производительности и эффективности. На скорость движения влияет много факторов: интенсивность движения; динамичность и техническое состояние автомобилей; продольный профиль; план трассы; квалификация водителя; метеорологические условия; тип и состояние покрытий; степень ровности покрытия различных участков дороги выбранного маршрута, а также уровень ограничения транспортной вибрации (нормы

вибронегруженности для пассажиров и виброчувствительных грузов). Анализ указанных факторов показывает, что скорость движения автомобилей можно повысить не только за счет улучшения их эксплуатационных свойств: тягово-скоростных, тормозных, плавности хода, управляемости и устойчивости движения, но и за счет оптимального планирования и организации перевозок, выбора маршрутов с учетом ровности дорожного покрытия. В связи с этим разработана методика оперативной оценки средней технической скорости движения

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАСЧЕТ

автомобиля на маршруте с учетом ровности дорожного покрытия является актуальной задачей.

Также оперативная оценка средней технической скорости движения автомобилей необходима для определения их потребности по числу и типам при организации массовых перевозок грузов и пассажиров [1]. Особую актуальность такая оценка приобретает при планировании работы автомобилей повышенной проходимости, которые эксплуатируются в основном на дорогах с большим числом неровностей.

Состояние ровности дорог в РФ

К микропрофилю дороги относятся неровности длиной до 25 м, причем мелкие неровности высотой до 1 см и длиной, которая не превышает длину отпечатка шины, называют шероховатостями. Они практически не оказывают влияния на колебания автомобиля из-за поглощающей и сглаживающей способности шин.

Ровность дорожного покрытия оценивают международным индексом ровности IRI (International Roughness Index), который основан на моделировании реакции автомобиля, движущегося с определенной скоростью (80 км/ч или другой) по имеющимся на дорожном покрытии неровностям. Он

определяется отношением суммарного перемещения подвески автомобиля к расстоянию, преодоленному за время измерений. Установлено, что изменение международного индекса ровности IRI адекватно отражает изменение процесса взаимодействия автомобиля (транспортного потока) и автомобильной дороги. Диаграммы рассчитанных значений IRI по основным магистралям формируются в автоматизированном банке дорожных данных АБДД "ДОРОГА" и используются для определения динамики и прогноза изменения этого показателя по годам.

Также информация о показателях международного индекса ровности автомобильных дорог собирается и используется в Федеральном дорожном агентстве "РОСАВТОДОР" для совершенствования разделов обеспечения безопасности дорожного движения в АБДД "Дорога" и планирования ремонта участков дорог, на которых значения показателя не соответствуют установленным нормам.

Результаты статистических исследований дорожных покрытий на автомобильных дорогах общего пользования и федерального значения РФ приведены на рис. 1 [2].

Из рис. 1 видно, что в РФ доля неровных участков на автомобильных дорогах общего пользования составляет 52 %, а на дорогах федерального значения — 72 %, т. е. больше, чем ровных.

Вид участков с разрушенными покрытиями на городских и загородных дорогах РФ представлен на рис. 2.

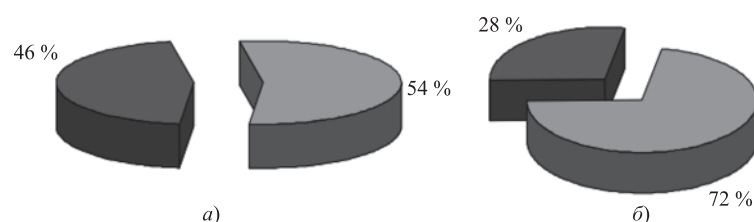


Рис. 1. Доли ровных и неровных участков дорожных покрытий на автомобильных дорогах РФ общего пользования (а) и федерального значения (б)

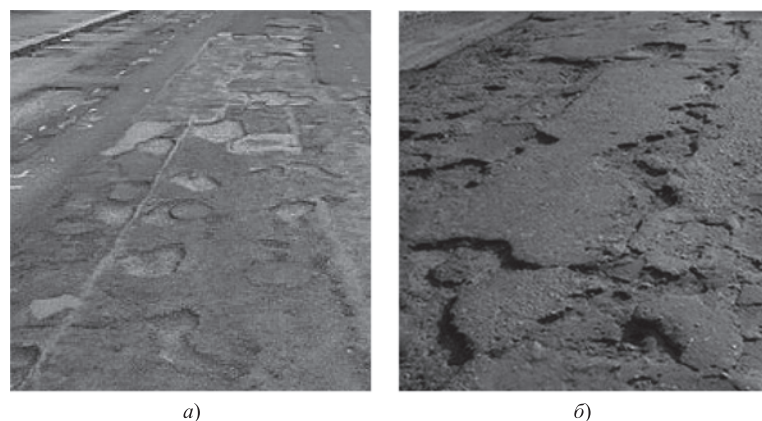


Рис. 2. Вид изношенных покрытий на городских (а) и загородных (б) дорогах РФ с разной степенью разрушения покрытий

Методы и средства измерения показателя ровности автомобильных дорог

В 2016 г. в РФ был введен ГОСТ 33101—2014 Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности [3]. Он разработан Московским автомобильно-дорожным государственным техническим университетом (МАДИ) совместно с Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 418 "Дорожное хозяйство" и принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по переписке (протокол от 14 ноября 2014 г. № 72-П). Дата введения 2016-08-01. ГОСТ устанавливает методы измерения ровности автомобильных дорог общего пользования, основанные на регистрации ординат микропрофиля с помощью специальных установок.

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАСЧЕТ

Этот стандарт в настоящее время применяется в странах Таможенного союза. В нем описаны следующие методы контроля ровности покрытий автомобильных дорог:

1-й метод — измерение рейкой величины про-света под рейкой длиной три метра с клиновым промерником;

2-й метод — измерение дорожной поверхности нивелиром и нивелирной рейкой и вычисление модуля разности вертикальных отметок поверхности с шагом 5, 10 и 20 м;

3-й метод — измерение дорожной поверхности с применением толчкомера ПКРС-2 или другими приборами.

Для определения показателя ровности существуют разные конструкции толчкомеров: ТХК-2, ПКРС-2, ТЭД-2М, ИВП-1М и др., причем между полученными на них результатами измерений установлены корреляционные зависимости. Рассмотрим их устройство и особенности.

Наиболее простое устройство представляет толчкомер ТХК-2 (рис. 3) [3]. Он расположен в задней части кузова 1 и имеет круговую шкалу для замера неровностей 2, счетный барабан с указательной стрелкой, через который перекинут трос 3, причем один конец троса закреплен на заднем мосту 4, а другой — на полу кузова посредством резинового жгута или пружины растяжения.

Счетный барабан снабжен механизмом свободного хода, который суммирует ходы сжатия подвески заднего моста. Толчкоммер определяют индекс ровности IRI через каждый километр дороги. Он равен суммарному сжатию рессор автомобиля в сантиметрах. Измерения производятся при движении автомобиля с постоянной скоростью 50 км/ч. Регистрация показаний толчкомера осуществляется на бумажной ленте печатающего устройства счетного механизма, включаемого в нужный момент времени. Толчкоммер ТХК-2 имеет низкую стоимость и высокую производительность. За рабочий день он позволяет обследовать ровность 170 км дорог, поэтому автотранспортные предприятия могут самостоятельно и без больших затрат обследовать им свои маршруты.

Динамометрическая установка ПКРС-2 (рис. 4) — это одноколесный прицеп, оборудованный датчиком ровности дорожного покрытия, пульт управления которого установлен на буксирующем его автомобиле.

Измерения производятся при движении автомобиля с постоянной скоростью 50 км/ч. В случае отклонения скорости движения автомобиля по каким-либо причинам от

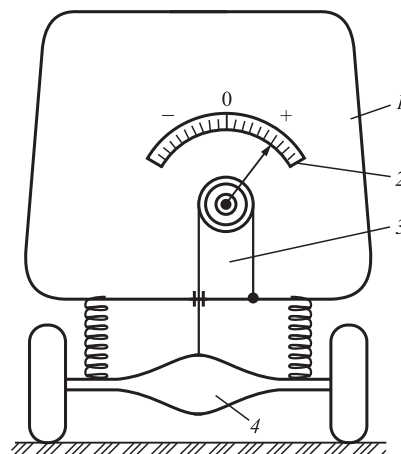


Рис. 3. Толчкоммер ТХК-2:

1 — кузов автомобиля; 2 — шкала замера неровностей; 3 — трос; 4 — задний мост автомобиля

50 км/ч, полученные при другой скорости движения показания толчкомера, показания приводят к значению показателя при скорости 50 км/ч. Например, при фактической скорости движения $S_v = 60$ км/ч применяют формулу

$$S_{50} = \frac{S_v + 1,52v_{cp} - 75,76}{0,0094v_{cp} + 0,553}, \quad (1)$$

где S_v — показание толчкомера, см/км; v_{cp} — средняя скорость движения автомобиля, которая может изменяться в диапазоне $v_{cp} = 35-65$ км/ч.

Электронный толчкоммер с дистанционным управлением ТЭД-2М представлен на рис. 5. Он состоит из двух основных узлов: механической ча-

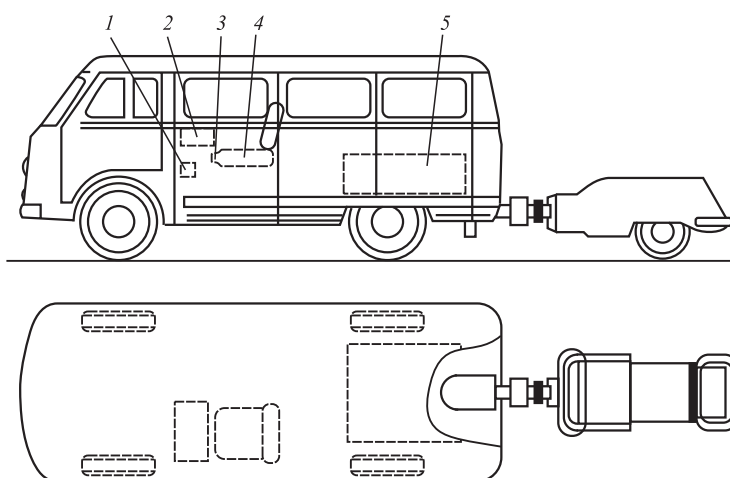


Рис. 4. Динамометрическая установка ПКРС-2:

1 — тормозная педаль прицепа; 2 — пульт управления; 3 — рычаг управления; 4 — место оператора; 5 — груз для снижения колебаний автомобиля с целью повышения точности измерений

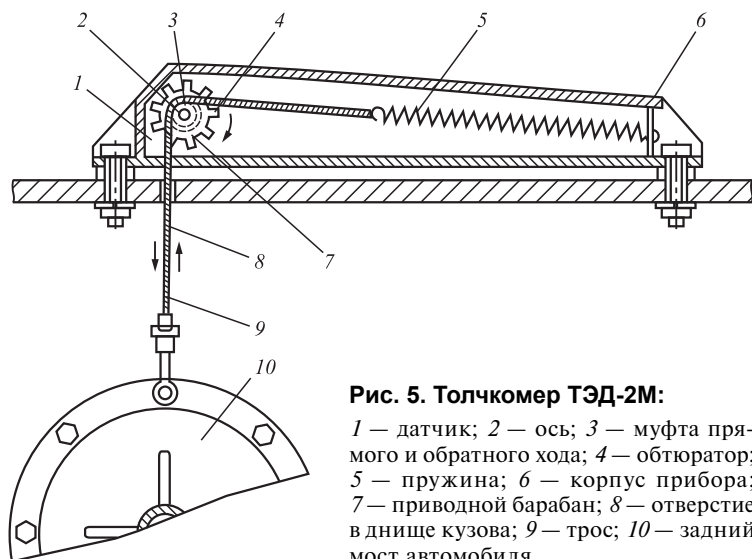


Рис. 5. Толчкомер ТЭД-2М:

1 — датчик; 2 — ось; 3 — муфта прямого и обратного хода; 4 — обтюратор; 5 — пружина; 6 — корпус прибора; 7 — приводной барабан; 8 — отверстие в днище кузова; 9 — трос; 10 — задний мост автомобиля

сти датчика импульсов и электронного счетчика импульсов с таймером в блоке дистанционного управления. Механическая часть датчика импульсов состоит из приводного барабана 7, соединенного с муфтой 3 прямого и обратного хода.

Вращение приводного барабана на оси 2 осуществляется под воздействием вертикальных перемещений троса 8, один конец которого закреплен наконечником 9 на заднем мосту 10, а другой — через пружину 5 на корпусе прибора 6. Муфта свободного хода 3 допускает вращение обтюратора 4 только в одном направлении. Когда выступы обтюратора проходят в непосредственной близости от датчика 1, сигнал с него поступает на электронный счетчик. Толчкомер ТЭД-2М имеет запоминающие устройства счета импульсов и времени и дистанционное управление, позволяющее оператору находиться в любой точке кузова автомобиля. При длине измеряемого участка менее или более 1 км показания толчкомера приводят к нормированной единице измерения см/км по формуле

$$S_H = \frac{S_1 L_H}{L_1}, \quad (2)$$

где S_1 — показания толчкомера; L_H — нормированная длина участка, км; L_1 — длина контролируемого участка, км.

Наиболее совершенным прибором, применяемым в России, является профилометр ДПП (динамический преобразователь профиля), разработанный в 1960-х гг. в МАДИ под руководством проф. А. А. Хачатурова (рис. 6).

Данный прибор в процессе движения позволяет записывать микропрофиль поверхности

дороги и полностью автоматизировать процесс измерения ровности, обработки получаемой информации на ЭВМ и выдачи результатов в международных индексах ровности IRI.

Предельно допустимые значения показателя ровности дорожного покрытия при использовании различных толчкомеров приведены в табл. 1.

При измерении ровности дорожного покрытия проезд автомобиля должен осуществляться по полосам наката. Число проездов по каждой полосе движения (в прямом и обратном направлении) должно составлять для дорог: I, II категорий — 3; III, IV категорий — 2; V категории — 1.

Дорожное покрытие считается удовлетворяющим требуемым условиям эксплуатации по ровности, если величина фактического показателя ровности дорожного покрытия

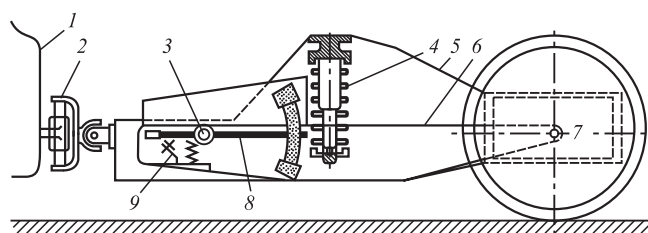


Рис. 6. Схема прибора для записи микропрофиля, разработанного МАДИ:

1 — буксирующийся автомобиль; 2 — шарнирное сцепное устройство; 3 — ось вращения маятника; 4 — амортизатор, гасящий колебания; 5 — наружная рама; 6 — внутренняя рама; 7 — груз; 8 — "медленный" маятник; 9 — датчик относительных перемещений маятника

меньше предельно допустимого значения или равно ему (табл. 1).

Анализ результатов исследования показателей ровности дорожного покрытия на маршрутах троллейбуса

Оценка ровности дорожного покрытия на улицах г. Волгограда была проведена в 2008—2009 гг. [4—7]. На рис. 7 показаны гистограммы распределения показателя ровности дорожного покрытия и сглаживающие их теоретические кривые распределения Вейбулла. Показатели ровности, превышающие 1400 см/км, учтены в крайнем интервале 1250...1400 см/км. С доверительной вероятностью 95 % интервал изменения математического ожидания показателя ровности дорожного покрытия в 2008 г. составил 451...536 см/км,

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАСЧЕТ

Таблица 1

Предельно допустимые значения показателя ровности дорожного покрытия

Интенсивность движения, авт./сут	Категория дороги	Тип дорожной одежды	Предельно допустимый показатель продольной ровности дорожного покрытия, см/км			Допустимое число просветов под трехметровой рейкой, превышающих указанные в СНиП 3.06.03—85, %
			по прибору ПКРС-2	по толкочмеру ТКХ-2, установленному на автомобиле		
				УАЗ-2206	ГАЗ-31022 "Газель"	
Более 7000	I	Капитальный	540	100	220	6
3000—7000	II		660	120	270	7
1000—3000	III		860	170	350	9
500—1000	IV	Облегченный	1100	240	460	12
200—500			1200	265	500	14
До 200	V	Переходного типа	—	340	510	—
		Низший	—	510	720	—

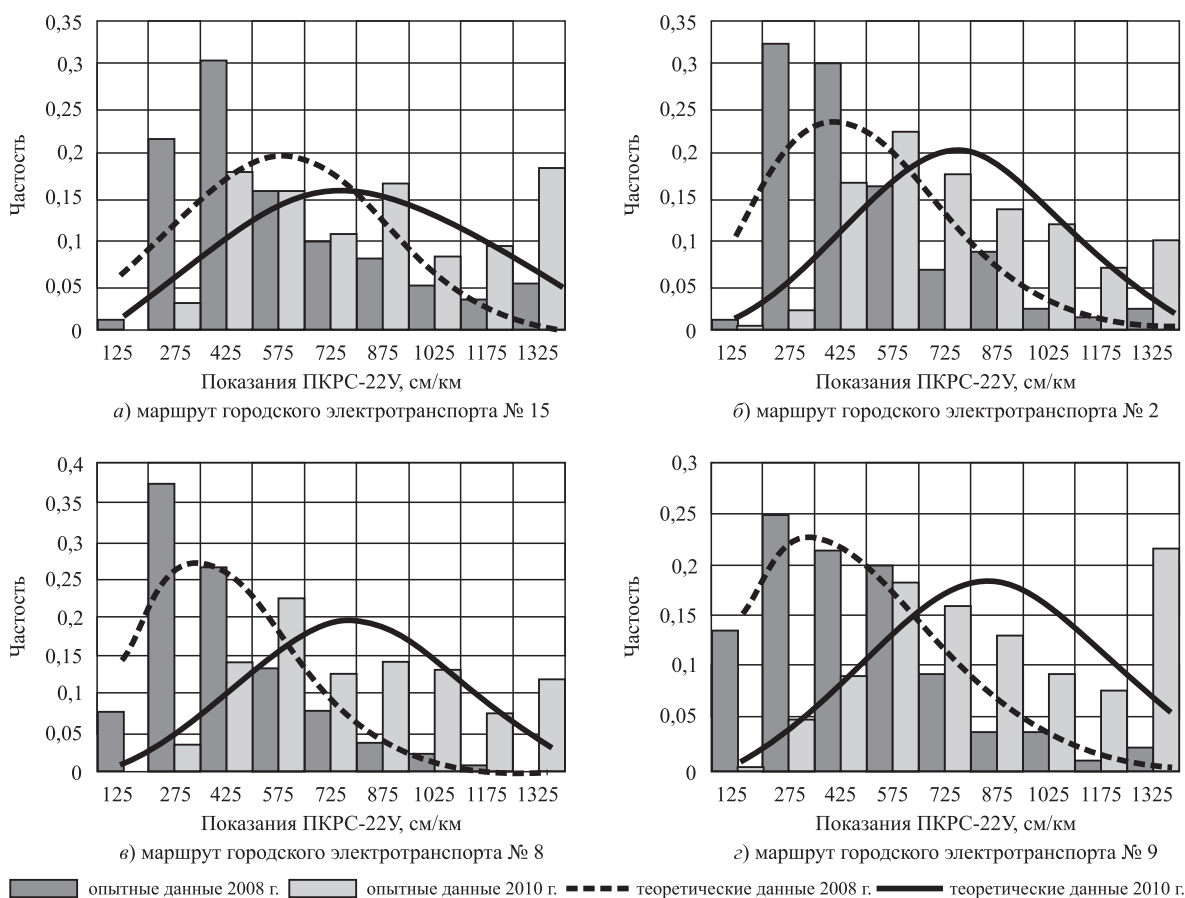


Рис. 7. Результаты исследования показателей ровности дорожного покрытия на маршрутах г. Волгограда

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАСЧЕТ

а в 2010 г. — 767...870 см/км. Таким образом, за 1,5 года эксплуатации дорог произошло смещение интервалов в сторону больших значений на 85 % нижней границы и 45 % верхней границы. В результате этого теоретическая кривая распределения плотности вероятности показателя ровности дорожного покрытия, показанная на графиках, переместилась в сторону больших значений показателя ровности.

Исследования ровности дорожного покрытия в 2010 г. проводились на третьей продольной магистрали, которая является магистральной дорогой скоростного движения и относится к группе А. Для дорог данной группы установлено предельное значение показателя ровности дорожного покрытия 660 см/км. Математические ожидания опытных данных показателей ровности по полосам участка дороги приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, значение показателя ровности покрытия превышает предельно допустимое значение на 45...94 %.

На рис. 8 приведены результаты исследования показателей ровности дорожного покрытия на третьей продольной магистрали г. Волгограда.

Таблица 2

Сводные данные по ровности участка 3-й продольной магистрали от дороги Волгоград — Каменск — Шахтинский до ул. Менделеева

Направление	Полоса	Математическое ожидание ровности покрытия, см/км	Доля автомобильной дороги, имеющей недопустимые значения по ровности, %
Прямое	1	1355	94
	2	1159	94
	3	857	50
Обратное	1	1183	88
	2	1011	76
	3	761	45

Анализ рисунка показывает, что худшей ровностью обладают первая и вторая полосы магистрали в прямом и обратном направлении движения, так как по ним в основном движутся

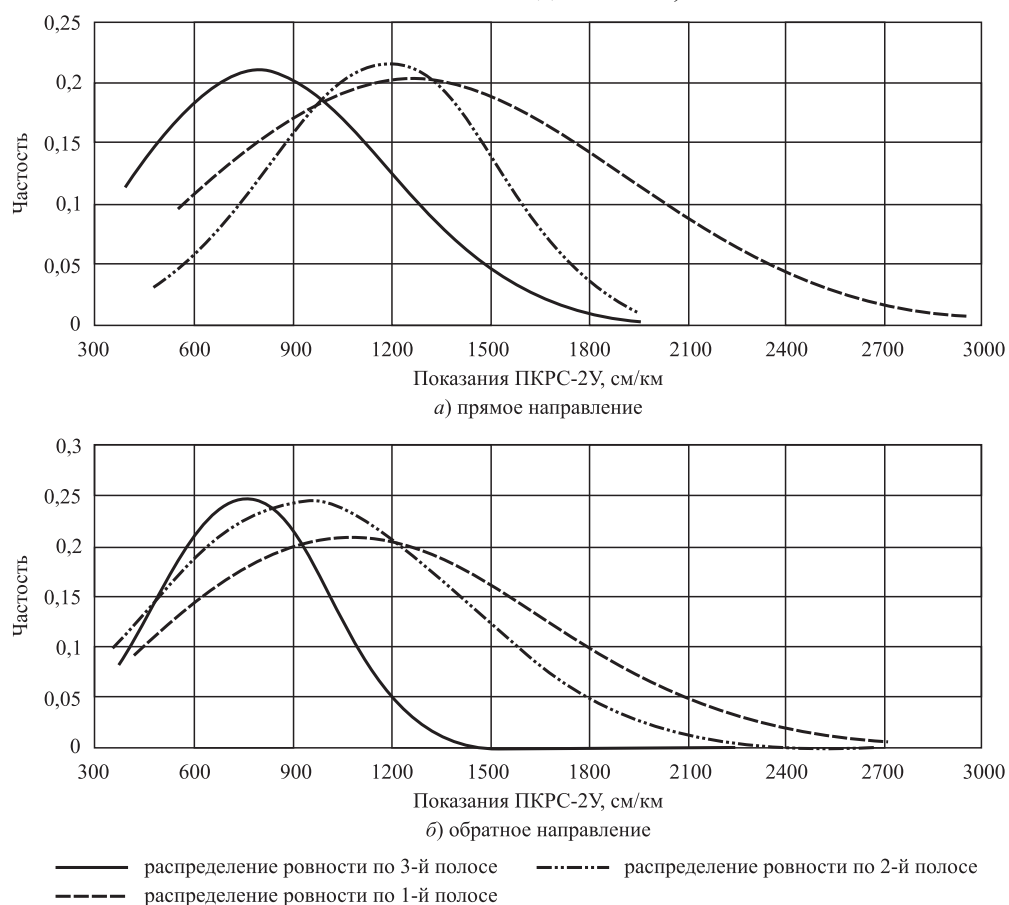


Рис. 8. Результаты исследования показателей ровности дорожного покрытия на третьей продольной магистрали г. Волгограда

автопоезда и одиночные грузовые автомобили. Третья полоса более ровная, поскольку по ней движутся в основном легковые автомобили.

Сущность предлагаемого метода

Сущность предлагаемого метода оценки скорости автомобиля на маршруте с учетом ровности дорожного покрытия заключается в получении данных о ровности покрытия дороги на участках и маршрута использования зависимости средней технической скорости данного автомобиля от показателя ровности дорожного покрытия. Такую зависимость получают в результате длительного наблюдения за скоростью данного или аналогичных автомобилей при их эксплуатации на участках дорог с известным показателем ровности.

Для приближенной оперативной оценки средней технической скорости движения автомобилей различных классов на маршруте можно воспользоваться зависимостями, приведенными на рис. 9 [1].

Для более точной оценки средней технической скорости АТП следует самостоятельно провести исследования используемой маршрутной сети и получить для своих автомобилей графики, аналогичные зависимостям, приведенным на рис. 9. Для полученных экспериментальных графиков методом наименьших квадратов можно найти математические выражения, что позволит с помощью специального алгоритма автоматизировать процесс оперативной оценки средней технической скорости движения автомобилей АТП на различных маршрутах с учетом ровности дорож-

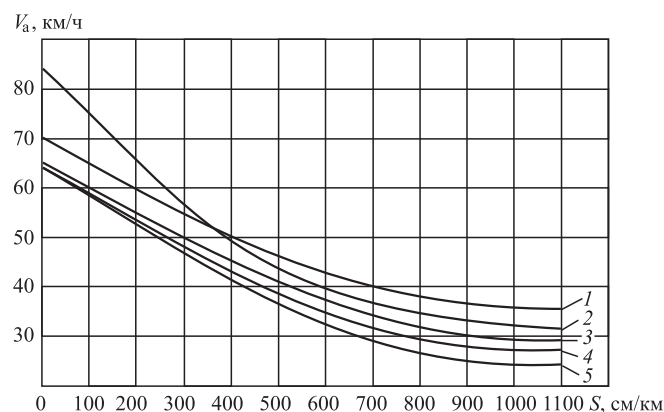


Рис. 9. Зависимости средней технической скорости автомобилей различных классов от показателя ровности дорожного покрытия [1]:

1 — ЗИЛ-130; 2 — Волга; 3 — ГАЗ-53; 4 — МАЗ-500; 5 — автобус ЛАЗ-699

ного покрытия, например, для экспериментальной кривой 2 (рис. 9) было получено уравнение регрессии:

$$y = -0,0627x + 70,65. \quad (3)$$

Таким образом, использование предложенного метода дает возможность оперативно определять наиболее рациональные маршруты с учетом ровности дорожного покрытия, что позволит повысить производительность подвижного состава и прибыль АТП.

Заключение

1. Показано, что средняя техническая скорость автомобилей может быть повышена не только за счет улучшения их эксплуатационных свойств, но и за счет оптимального планирования и организации перевозок, выбора подвижного состава и маршрутов движения с учетом ровности дорожного покрытия.

2. Показано, что в РФ доля неровных участков на автомобильных дорогах общего пользования и федерального значения существенно больше чем ровных.

3. Ровность дорожного покрытия оценивают международным индексом ровности IRI (Internation Roughness Index), который определяется специальными приборами — толчкомерами.

4. Диаграммы значений IRI по основным магистралям формируются в автоматизированном банке дорожных данных АБДД "ДОРОГА" и используются для определения динамики и прогноза изменения этого показателя по годам.

5. Информация о ровности автомобильных дорог собирается и используется в Федеральном дорожном агентстве "РОСАВТОДОР" для совершенствования разделов обеспечения безопасности дорожного движения в АБДД "Дорога".

6. Методы измерения показателя ровности автомобильных дорог изложены в ГОСТ 33101—2014 Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности, который введен в странах СНГ в 2016 г.

7. Для определения показателя ровности существуют разные конструкции толчкомеров: ТХК-2, ПКРС-2, ТЭД-2М, ИВП-1М и др., между их показаниями установлены корреляционные зависимости.

8. Предельно допустимые значения показателя ровности дорожного покрытия, определенные по

приборам ПКРС-2 и ТХК-2, приведены в таблице, они зависят от интенсивности движения, категории дороги, типа дорожной одежды и используемого автомобиля.

9. Исследование ровности дорожного покрытия на маршрутах г. Волгограда в 2008—2010 гг. показало, что она превышает нормативные значения на 45...94 %.

10. Установлено, что худшей ровностью обладают первая и вторая полосы магистрали в прямом и обратном направлении движения. За 1,5 года эксплуатации численное значение показателя ровности дорожного покрытия на участках улично-дорожной сети увеличилось в среднем на 350 см/км.

11. Сущность предлагаемого метода оценки скорости автомобиля на маршруте с учетом ровности дорожного покрытия заключается в получении данных о ровности покрытия дороги на участках и маршрута использования зависимости средней технической скорости данного автомобиля от показателя ровности дорожного покрытия. Такую зависимость получают в результате длительного наблюдения за скоростью данного или аналогичных автомобилей при их эксплуатации на участках дорог с известным показателем ровности.

12. Показано, что использование предложенного метода дает возможность оперативно определять наиболее рациональные маршруты с учетом ровности дорожного покрытия, что позволит повысить производительность подвижного состава и прибыль АТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Говорущенко Н. Я.** Основы теории эксплуатации автомобилей. — Киев: Вища школа, 1971. — 232 с.
2. **Стрижевский Д. А.** Обоснование введения ограниченного режима движения автомобильного транспорта на основе оценки показателей ровности дорожного покрытия: дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Стрижевский. — Волгоград, 2015. — 181 с.
3. **ГОСТ 33101—2014** Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности.
4. **Ганзин С. В., Дымченко А. В., Шустов А. В.** Оценка ровности дорожного покрытия на улицах г. Волгограда по условиям обеспечения БДД // Прогресс транспортных средств и систем — 2009: матер. междунар. науч.-практ. конф. — Волгоград: ВолгГТУ, 2009. — С. 154—155.
5. **Ганзин С. В., Комаров Ю. Я., Шустов А. В.** Динамика изменения показателя ровности дорожного покрытия на улицах города Волгограда // Материалы XI науч.-техн. конф. по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ за 2010 год. — Ставрополь: ГОУ ВПО "Сев.-Кавказ. гос. техн. ун-т", 2011. — С. 118—120.
6. **Ганзин С. В., Шустов А. В., Шакуров Д. Д.** Оценка ровности дорожного покрытия на улицах г. Волгограда по условиям обеспечения БДД // Проблемы строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог Юга Российской Федерации и пути их решения: матер. науч.-техн. конф. — Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. — С. 90—94.
7. **Шустов А. В.** Разработка методики выбора конструктивных параметров одноосного прицепа с учетом дорожных условий и активной безопасности малотоннажного автомобильного поезда: дис. ... канд. техн. наук. — Волгоград, 2015. — 161 с.

ЯМЗ начал серийное производство V-образных двигателей повышенной мощности

Ярославский моторный завод "Автодизель" в октябре 2020 г. приступил к серийному производству двигателей ЯМЗ-6580. Мощность новой версии двигателей увеличена по сравнению с базовой моделью с 420 до 530 л. с. при сохранении удельного расхода топлива. Новые двигатели повышенной мощности предназначены для техники увеличенной грузоподъемности и производительности. Первые сто двигателей завод выпустит до конца года.

Двигатели повышенной мощности прошли 800-часовые испытания. Ресурс новых двигателей — до 1 млн км.

В отличие от двигателей ЯМЗ-6585 мощностью 420 л.с. в конструкции моторов повышенной мощности ЯМЗ-6580 использована более эффективная система охлаждения поршней. За счет изменения конструкции шестерен увеличена производительность масляного насоса со 165 до 175 л/мин, что позволяет поддерживать оптимальную работу двигателя при увеличении мощности. Повысить мощность двигателя без увеличения удельного расхода топлива позволяет использование модернизированных турбокомпрессора и электронного блока управления двигателями.

Двигатели повышенной мощности предназначены для использования в сельскохозяйственной технике с улучшенными эксплуатационными характеристиками, а также в современных дизель-генераторных установках. V-образные двигатели ЯМЗ отличает надежность, высокая степень унификации базовых моделей и модификаций, широкие возможности применяемости. Двигатели имеют высокую ремонтпригодность, в полном объеме обеспечены запасными частями во всех регионах эксплуатации.

Пресс-служба "Группы ГАЗ"

А. Е. Есаков, канд. техн. наук, Московский политехнический университет ("Московский политех"), г. Москва, e-mail: ravn@mail.ru

АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭНКОДЕРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Кодирующие преобразователи (энкодеры) различных типов широко используются в современной технике для измерения характеристики механического движения, что предопределяется их надежностью, стабильностью работы и некоторыми другими положительными качествами. Вместе с тем базовый принцип действия измерительных преобразователей данного типа обуславливает наличие в результатах измерений, проводимых с их помощью, неустраняемых методических погрешностей, которые снижают эффективность целевых систем. Учет данных погрешностей и их дальнейшая компенсация возможны при наличии математического аппарата, который позволил бы осуществлять моделирование результатов измерений. В настоящей статье производится обоснование и синтез такого аппарата, включающего основные параметры преобразователя. Сформированная математическая модель может быть использована как при подборе, так и при проектировании кодирующих преобразователей для электронных систем контроля и управления автомобилями, тракторами, а также других самоходных машин и технических объектов в общем.

Ключевые слова: датчик, первичный преобразователь, измерительный преобразователь, погрешность, методическая погрешность, точность, измерение, импульсы, энкодер, кодирующий преобразователь, дискретизация, характеристики движения, перемещение, скорость, ускорение.

Various types of encoding transducers (encoders) are used in modern technics widely to measuring the characteristics of mechanical motion which is predetermined by their reliability, operation stability and some other positive qualities. At the same time the basic operation principle of this measuring transducers type determines the presence of irremovable methodological errors in the measurements results obtained with their help. These errors reduce the efficiency of target systems. Their accounting and further compensation are possible in the presence of the mathematical apparatus for simulation of the measurement results. In this article substantiation and synthesis of this apparatus which includes the main encoder's parameters are carried out. The generated mathematical model can be used for the selection or design of encoding transducers to electronic monitoring and control systems for automobiles, tractors as well as other self-moving machines and technical objects at all.

Keywords: sensor, primary transducer, measuring transducer, error, methodological error, accuracy, measurement, impulses, encoder, encoding transducer, discretization, motion characteristics, movement, speed, acceleration.

Неотъемлемыми компонентами большинства использующих электронику систем — в том числе применяемых на автотракторной технике — являются измерительные преобразователи.

Под измерительным преобразователем здесь понимается совокупность технических средств, чьим назначением является измерение величин, информация о которых необходима системе для ее функционирования. Измерение же согласно приведенной в [1] энциклопедической статье есть совокупность операций, целью которых является определение количественного соотношения одной величины, называемой измеряемой, с другой однородной величиной, принимающей за единичную.

Также уместно ввести здесь понятия объекта измерений — того, к чему приложены измерительные операции — и предмета измерений, под

которым подразумевается измеряемая величина. Данные понятия важны в дальнейшем развитии темы, поскольку одному объекту могут быть сопоставлены различные предметы измерений, характерный пример чего будет рассмотрен ниже.

Большая часть современных систем электроники основана на цифровых вычислительных устройствах. В связи с этим в перечень функций измерительных преобразователей входит не только получение данных о значениях измеряемых (как правило, неэлектрических и непрерывных) величин, но и представление этих данных в форме, которая обеспечивает возможность их восприятия цифровым устройством.

На рис. 1 показана обобщенная функциональная схема измерительного преобразователя (ИП), архитектура которого сообразна изложенной концепции.

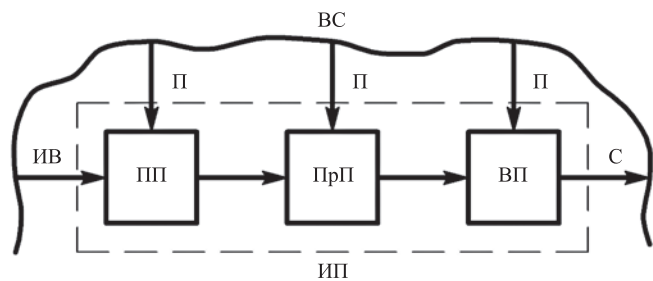


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема измерительного преобразователя

В общем случае он состоит из первичных (ПП), промежуточных (ПрП) и вторичных (ВП) преобразователей. Непременным является наличие в его составе только первой из перечисленных групп компонентов, присутствие же остальных является вариативным и определяется назначением измерительного преобразователя и предъявляемыми к нему требованиями.

В процессе функционирования измерительный преобразователь взаимодействует с внешней по отношению к нему средой (ВС), к которой относятся как прочие компоненты информационно-измерительной системы, так и не входящие в ее состав объекты. Внешняя среда оказывает на измерительный преобразователь воздействия, которые можно разделить на два типа. С одной стороны, имеют место воздействия, потенциально содержащие информацию о значении измеряемой величины (характеризующие ее прямо или косвенно). Такие воздействия назовем информационными воздействиями (ИВ). С другой стороны, всегда наличествуют нежелательные воздействия, которые изменяют (чаще всего непредсказуемым образом) состояния и, как следствие, передаточные функции компонентов измерительного преобразователя. Их мы будем именовать возмущающими воздействиями или — относительно рассматриваемой проблемы — помехами (П).

Первичные преобразователи часто именуются датчиками или сенсорами (от англ. "sensor" — "чувствительный элемент"). Их назначением является восприятие со стороны внешней среды информационных воздействий и преобразование их в электрические величины. Стоит отметить, что в настоящее время термину "датчик" в литературе сопоставляется достаточно широкий класс устройств, начиная от простейших первичных преобразователей и заканчивая измерительными преобразователями в целом (такие датчики иногда именуют интеллектуальными [2, 3]). Опуская ради краткости рассуждения о корректности по-

добной терминологии, подчеркнем, что в данной работе под датчиком будет подразумеваться исключительно первичный преобразователь.

В промежуточных преобразователях осуществляется нормализация полученных электрических величин и подготовка их к использованию путем усиления, фильтрации, линеаризации, оцифровки и других операций. Наконец, вторичные преобразователи производят над подготовленными величинами необходимые математические преобразования.

Результатом функционирования исправного измерительного преобразователя является формируемый им и передающийся во внешнюю среду сигнал (С), который являет собой электрическое дискретное воздействие, однозначно характеризующее значение измеряемой величины. Идеальный измерительный преобразователь должен обеспечивать равенство истинного значения измеряемой величины и значения, полученного в измерении. В реальных же измерительных преобразователях несовершенство методик измерений и конструкций компонентов, а также их инерционность и возмущающие воздействия в совокупности обуславливают наличие в сигнале погрешности, которую не всегда представляется возможным устранить или даже минимизировать.

Характер и степень влияния этих факторов на результирующую погрешность разнообразны. В посвященных рассмотрению данных вопросов разделах работ [4, 5] в качестве одного из основных классификационных признаков погрешностей указывается их отношение к изменению измеряемых величин во времени. В рамках данного классификационного признака выделяются статические погрешности, не зависящие от скорости изменения измеряемой величины, и погрешности динамические, обусловленные таковой и представляющие собой запаздывание сигнала вследствие упомянутой инерционности компонентов измерительных преобразователей. В свою очередь, статические погрешности по характеру влияния подразделяются на аддитивные и мультипликативные погрешности, погрешности нелинейности и гистерезиса. Отдельно как проявления системного свойства историчности [6] рассматриваются прогрессирующие погрешности, появление которых связано с постепенным "старением" элементов преобразователя.

Если через x обозначить истинное значение измеряемой величины, а через ту же литеру с диакритическим знаком тильда (\tilde{x}) — ее измеренное значение, то второе практически всегда будет от-

личаться от первого некоторым значением абсолютной погрешности измерения Δx [4]:

$$\tilde{x} = x + \Delta x. \quad (1)$$

Сама по себе абсолютная погрешность безотносительно диапазона, в котором происходит изменение измеряемой величины, не характеризует точность измерения, т. е. степень близости результата измерения к истинному значению. В связи с этим вводят понятие относительной погрешности, которая является отношением погрешности абсолютной к модулю истинного значения измеряемой величины [7]:

$$\delta_{\tilde{x}} = \Delta x / |x|.$$

Точностью измерения при этом будет называться величина, обратная $\delta_{\tilde{x}}$ (без учета знака) [1].

Коль скоро в реальных процессах эксплуатации значение x доподлинно неизвестно, неизвестно и значение абсолютной погрешности. Как информационные, так и возмущающие воздействия, могут быть подвержены различным изменениям, вследствие чего значение Δx зависит от множества разнородных факторов, что и обуславливает трудности, связанные с его минимизацией.

В большинстве случаев можно, исходя из технического задания, сформулировать требования насчет допустимых значений $[\Delta x]_- < 0$ и $[\Delta x]_+ > 0$, за границы которых текущее значение Δx не должно выходить в сторону преуменьшения значения x и в сторону его преувеличения соответственно [8]:

$$[\Delta x]_- \leq \Delta x \leq [\Delta x]_+. \quad (2)$$

В общем случае значения $[\Delta x]_-$ и $[\Delta x]_+$ не равны по модулю. Способом их нормирования является выражение через соответствующие допустимые значения относительной погрешности $[\delta_{\tilde{x}}]_- < 0$ и $[\delta_{\tilde{x}}]_+ > 0$, а также допуск измерений, который, в свою очередь, определяется как разница между верхней и нижней границами измерений (т. е. наибольшим x_{\max} и наименьшим x_{\min} значениями измеряемой величины):

$$[\Delta x]_- = [\delta_{\tilde{x}}]_- (x_{\max} - x_{\min});$$

$$[\Delta x]_+ = [\delta_{\tilde{x}}]_+ (x_{\max} - x_{\min}).$$

Когда условие (2) не выполняется, имеет место грубая погрешность, называемая также промахом [1]. Ее возникновение позволяет констати-

ровать, что измерительный преобразователь не удовлетворяет точностным требованиям и подлежит замене. Или же он является неисправным, и налицо нештатная эксплуатационная ситуация, которая может привести к потере системой возможности корректно выполнять свои функции. Рассмотрение подобных ситуаций выведем за рамки настоящей статьи.

Но даже если значение абсолютной погрешности не превышает максимально допустимого, ее влияние следует учитывать, что обосновывают результаты работы [9], где показано, что наличие неучтенных погрешностей измерительных преобразователей может ухудшить эффективность системы. В то же время актуальные тенденции повышения безопасности и экономичности автомобилей и тракторов подразумевают предъявление все более строгих требований к надежности, устойчивости и качеству их электронных систем и, стало быть, к точности компонентов, входящих в их состав.

Совокупность перечисленных обстоятельств обуславливает целесообразность учета названных погрешностей уже на стадии проектирования системы для их дальнейшей конструктивной или методической компенсации и предполагает потребность в построении математической модели их формирования.

В [9] также указывается на то, что в настоящее время, благодаря развитию электроники, составляющие результирующей погрешности, обусловленные промежуточными и вторичными преобразователями, сравнительно невелики, и наиболее значимый вклад в ее формирование вносят первичные преобразователи. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что именно их следует считать приоритетными объектами исследования в рассматриваемой проблеме (тем более прочие компоненты, как отмечалось ранее, могут попросту отсутствовать).

В задачах, связанных с созданием автотракторных электронных систем, может возникнуть потребность в измерении характеристик линейных или угловых движений машины в целом или ее компонентов. К означенным характеристикам, прежде всего, относятся перемещения, скорости, ускорения и рывки объектов измерения.

Основой одной из методик измерения данных характеристик является счет электрических импульсов, чье возникновение непосредственно связано с перемещением объекта измерений φ [10]. Генерирование электрической величины, являющейся основой для формирования импуль-

сов, обеспечивает первичный преобразователь, где происходит контактное или бесконтактное взаимодействие чувствительного и задающего компонентов, один из которых является неподвижным, а другой связан с объектом измерения (иногда называемым задатчиком [11]). В связи с тем что задатчик и задающий компонент жестко связаны, в дальнейшем, рассуждая о характеристиках движения, будем без дополнительных оговорок подразумевать, что для данных объектов они идентичны.

Конструкция задающего компонента подразумевает наличие равномерно расположенных и идентичных друг другу задающих элементов (зубьев, магнитных полюсов и т. п.), каждый из которых образован двумя частями. Одна из них отвечает высокому уровню импульсного сигнала $U_{и\max}$, а другая — низкому $U_{и\min}$.

В зависимости от специфики конструкции и принципа действия датчика электрическая величина на его выходе $U_{д}$ может изменяться различным образом. Для обеспечения возможности обработки цифровыми устройствами ее преобразуют в импульсы, сколь возможно близкие к прямоугольной форме.

Преобразование может осуществляться посредством программных или схемотехнических решений, чьей общей чертой является наличие в характеристике петли гистерезиса, обусловленной различными уставками выходной электрической величины датчика для передних $U_{д\uparrow}$ и задних $U_{д\downarrow}$ фронтов импульсов [11]. Передним фронтом или просто фронтом импульса принято называть изменение уровня сигнала с низкого на высокий, а его задним фронтом или срезом — обратное изменение.

Область неоднозначности, задаваемая гистерезисной петлей, позволяет устранить негативное влияние помех в электрической величине на выходе датчика.

Наглядным примером изложенного могут послужить изображенные на рис. 2 диаграммы. На верхней из них схематически представлен график изменения перемещения задатчика во времени t , на средней — график изменения выходной электрической величины датчика с областью неоднозначности преобразователя ее формы, а на нижней — получаемые в результате импульсы.

Измерения по описанному принципу могут быть реализованы посредством измерительных преобразователей на базе гальваномагнитных, индукционных оптоэлектронных и некоторых других типов датчиков [4, 5, 8, 11, 13, 14].

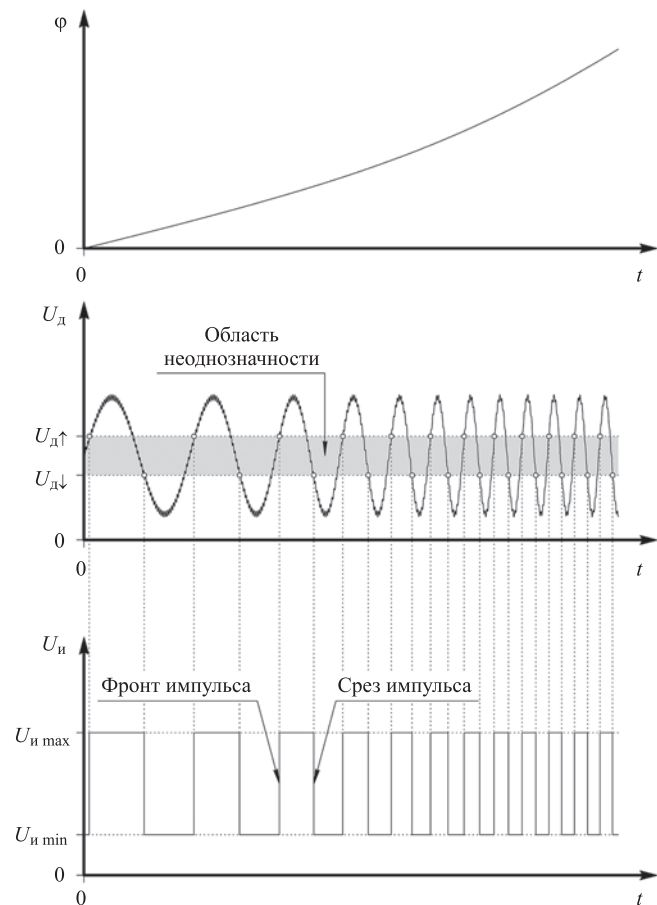


Рис. 2. Графическая интерпретация преобразования перемещения задатчика в изменение электрической величины на выходе первичного преобразователя и в результирующий импульсный сигнал

В совокупности такие преобразователи именуется кодирующими преобразователями [11] или энкодерами [13] (от англ. "encode" — "кодировать"). Область их применения на современной автотракторной технике чрезвычайно широка. Они используются для автоматического и автоматизированного управления двигателем внутреннего сгорания и агрегатами трансмиссии, в антиблокировочных, противобуксовочных, телематических и других системах [2, 3, 9, 10, 14–16].

Одним из преимуществ энкодеров по сравнению с измерительными преобразователями иных принципов действия является большая помехоустойчивость. Существенное влияние на результирующие погрешности измерений корректно сконструированных кодирующих преобразователей помехи оказывают, только если они вызваны экстраординарными причинами (например, сильными магнитными полями). При отсутствии таких причин это влияние можно не учитывать.

Однако вне зависимости от типа и конструктивных особенностей кодирующие преобразователи обладают принципиально неустранимой методической погрешностью. Под методической погрешностью подразумевается погрешность, которая возникает из-за недостатков, свойственных методике измерений. В рассматриваемых случаях она обусловлена представлением континуальных величин дискретными сигналами.

При использовании в системе цифровых вычислительных устройств это представление неизбежно. Если оно реализуется посредством аналого-цифрового преобразователя, характеризующегося значительной частотой существенной глубины квантования по уровню (разрядностью), то значение соответствующей погрешности с учетом приведенного выше положения об успехах современного приборостроения допустимо считать пренебрежимо малым. Первичные же преобразователи в энкодерах обуславливают возникновение многократно больших значений погрешностей, что делает актуальным их исследование методами математического моделирования.

Некоторые аспекты проблемы наличия у кодирующих преобразователей погрешности дискретизации затрагиваются авторами [10], но математическая модель ее формирования ими не приводится, как не приводится она и в [9].

Построение интересующей нас математической модели произведем на примере вращательного движения, констатируя тот факт, что применительно к движению поступательному рассуждения будут аналогичными с заменой угловых величин на линейные.

Тогда перемещение φ есть абсолютный угол поворота задающего компонента. Так как угловая скорость, угловое ускорение и угловой рывок являются, соответственно, первой, второй и третьей производными угла поворота по времени, сопоставим этим величинам сообразно нотации Ньютона следующие обозначения: $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ и $\overset{\cdot}{\ddot{\varphi}}$.

В принципе, рассуждения можно было бы распространить и на величины, являющие собой производные более высоких порядков. Но при решении практических задач, относящихся к автотракторным системам, такая необходимость возникает сравнительно редко, в связи с чем ограничимся рассмотрением только названных характеристик движения.

Итак, пусть имеется некоторый вращающийся объект измерений, предметами измерений по отношению к которому являются перечисленные ранее характеристики движения. Через m_3

обозначим общее число задающих элементов, определяющее число электрических импульсов, возникающих за один полный оборот задатчика (2π , рад). Понятно, что значениями данной величины могут быть только отличные от нуля натуральные числа ($m_3 \in \mathbb{N}_+$).

Заметим, что в современной математике наличествуют два подхода к определению множества натуральных чисел. В рамках одного из них (теоретико-множественного, предлагаемого, например, в трудах Н. Бурбаки) ноль относится к таковым, в рамках другого — не относится [7]. Здесь для удобства изложения мы будем придерживаться первого подхода. При необходимости же исключить ноль из множества натуральных чисел будем применять обозначение, приведенное выше.

Допустим, что погрешности геометрии задающего компонента пренебрежимо малы, а амплитудно-частотные и динамические характеристики чувствительного компонента и преобразователя формы электрической величины идеальны. Ввиду этого не будем накладывать никаких ограничений на максимальное значение m_3 и размеры задающих элементов, учитывать запаздывание сигнала и конечность времени изменения уровня сигнала по фронту и срезу. Подобное представляется оправданным, ибо компоненты современных энкодеров характеризуются достаточно высокими показателями точности изготовления, быстродействия и стабильности.

Кроме того, опираясь на тот факт, что тактовые частоты, на которых работают современные цифровые устройства, весьма велики, также не станем учитывать погрешность измерения времени.

Таким образом, из производящегося здесь рассмотрения будет исключена обусловленная несовершенством конструкции, "старением" и инерционностью преобразователя инструментальная погрешность, и дальнейшие рассуждения будут вестись по отношению к вышеупомянутой погрешности методической.

Разрешающей способностью или разрешением по углу кодирующего преобразователя назовем величину, обратную угловому шагу задающих элементов и равную их числу, соотносящемуся с углом 1 рад:

$$D = \frac{m_3}{2\pi}.$$

В качестве частного примера, иллюстрирующего геометрический смысл рассматриваемых величин, на рис. 3 приведена схема задающего компонента одного из возможных видов.

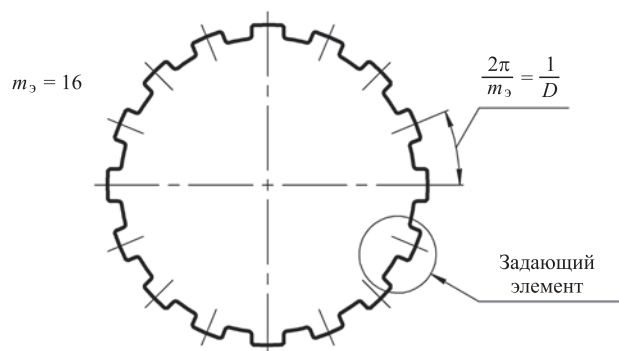


Рис. 3. Схема задающего компонента в виде зубчатого диска

При данной угловой скорости $\dot{\phi}$ частота следования импульсов

$$\omega_{и} = D\dot{\phi} = \frac{m_3}{2\pi} \dot{\phi}.$$

Поскольку угловая скорость есть непрерывная величина, такой же величиной является и $\omega_{и}$ ($\omega_{и} \in 0 \cup \mathbb{R}_+$).

Определенный интеграл от полученного выражения представляет собой общее число периодов сигнала, уложившихся в тот промежуток времени, на котором осуществляется интегрирование. Так же, как и $\omega_{и}$, эта величина является непрерывной и имеет ту же область значений.

Вместе с тем в рассматриваемой задаче интерес представляет не число периодов, но число зарегистрированных импульсов $m_{и}$. Помимо того что эта величина может принимать лишь натуральные значения ($m_{и} \in \mathbb{N}$), она зависит не только от числа периодов, но также от скважности сигнала s и выраженного в радианах его начального смещения ϕ .

Ввиду идентичности задающих элементов область значений начального смещения представляет собой полуинтервал с длиной, равной угловому шагу задающих элементов: $\phi \in [0; 2\pi/m_3]$.

При этом с нулевым начальным смещением сопоставим такое состояние системы, когда передний фронт импульса совпадает с началом измерений ($t = 0$).

При различных параметрах сигнала за одни и те же по длительности T_0 промежутки времени (которые в дальнейшем мы будем называть отсчетами) для одного и того же движения задатчика могут быть получены различные значения $m_{и}$, причина чего понятна из анализа рис. 4.

Сравнивая диаграммы на рис. 4, а и рис. 4, б, можно видеть, что наличие во втором случае ненулевого начального смещения сигнала той же частоты приводит к регистрации дополнительного седьмого импульса. С другой стороны, даже в случае идентичных значений начального смещения, длительностей отсчетов и частоты сигналов число зарегистрированных импульсов может различаться, если эти сигналы обладают разными значениями скважности, что видно из сопоставления диаграмм на рис. 4, б и рис. 4, в.

Скважность сигнала есть безразмерная величина, являющая собой отношение периода импульсов $T_{и}$ к их продолжительности $t_{и}$ при любом постоянном значении $\dot{\phi}$ [1]:

$$s = T_{и}/t_{и}. \quad (3)$$

Графическая интерпретация величин $T_{и}$ и $t_{и}$ дана среди прочего на рис. 4. Там же введена имеющая размерность времени величина t_{ϕ} , пропорциональная ϕ .

Среднестатистическое (с учетом помех в выходном сигнале датчика и вызванных ими флуктуаций) значение $T_{и}$ определяется угловой скоростью задающего компонента и угловым шагом его задающих элементов:

$$T_{и} = \frac{1}{D\dot{\phi}} = \frac{2\pi}{m_3\dot{\phi}}. \quad (4)$$

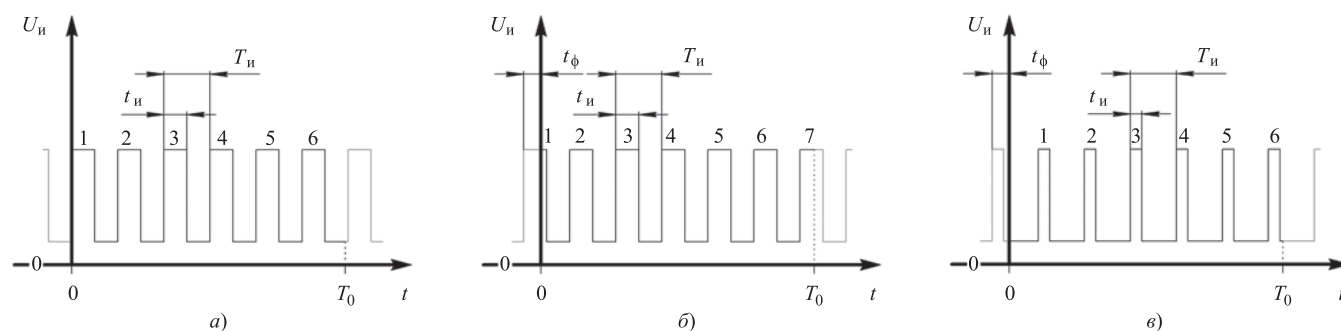


Рис. 4. Сравнение результатов счета импульсов для сигналов с различными параметрами

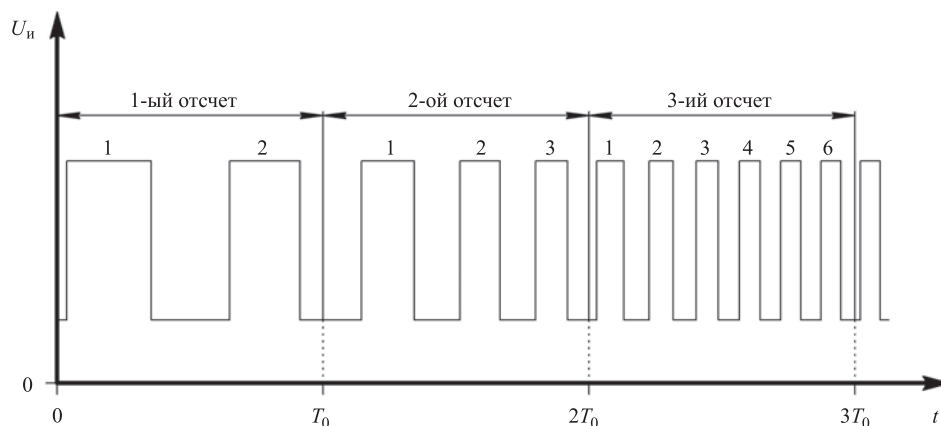


Рис. 5. Графическая интерпретация отсчетов импульсов

Среднестатистическое же значение $t_{и}$ находится в зависимости как от угловой скорости, так и от соотношения между окружными ширинами составных частей каждого задающего элемента, а также от их формы, характера изменения выходной электрической величины датчика и гистерезисной характеристики ее преобразователя. Поскольку на практике наблюдается существенное разнообразие перечисленных факторов, рассматривать то, как именно соотносится с ними среднестатистическое значение величины $t_{и}$, здесь мы не станем, полагая, что таковое легко может быть найдено в натурном эксперименте с конкретным измерительным преобразователем.

Очевидно, что регистрация дополнительного импульса (вернее — части такового) имеет место тогда, когда значение угла поворота задающего компонента, отвечающее высокому уровню сигнала, $\varphi_{и}$ не меньше значения его начального смещения.

Для представления $\varphi_{и}$ через известные величины временно предположим постоянство $\dot{\varphi}$. Если $\dot{\varphi} = \text{const}$, то

$$\varphi_{и} = \dot{\varphi} t_{и}. \quad (5)$$

Выражая $t_{и}$ из (3) и (4) через $m_{э}$, $\dot{\varphi}$ и s и подставляя получившееся соотношение в (5), получаем формулу, из которой, в частности, видно, что $\varphi_{и}$ не зависит от угловой скорости задающего компонента:

$$\varphi(i_0) = \begin{cases} \varphi & \Leftarrow i_0 = 1; \\ \frac{m_{э}}{2\pi} \int_{(i_0-2)T_0}^{(i_0-1)T_0} \dot{\varphi} dt + \varphi(i_0 - 1) - \left[\frac{m_{э}}{2\pi} \int_{(i_0-2)T_0}^{(i_0-1)T_0} \dot{\varphi} dt + \varphi(i_0 - 1) \right] & \Leftarrow i_0 \neq 1. \end{cases} \quad (7)$$

$$\varphi_{и} = \frac{2\pi}{m_{э}s}.$$

Таким образом, полагая, что по истечении каждого очередного отсчета счет импульсов начинается заново (см. рис. 5), можем рассчитать число импульсов, зарегистрированных в отсчете с любым порядковым номером $i_0 \in \mathbb{N}_+$:

$$m_{и}(i_0) = \begin{cases} \left[\frac{m_{э}}{2\pi} \int_{(i_0-1)T_0}^{i_0 T_0} \dot{\varphi} dt + \varphi(i_0) \right] \Leftarrow \varphi(i_0) \leq \frac{2\pi}{m_{э}s}; \\ \left[\frac{m_{э}}{2\pi} \int_{(i_0-1)T_0}^{i_0 T_0} \dot{\varphi} dt + \varphi(i_0) \right] \Leftarrow \varphi(i_0) > \frac{2\pi}{m_{э}s}. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь и далее $\lceil \cdot \rceil$ и $\lfloor \cdot \rfloor$ — соответственно обозначения округления аргумента до ближайшего большего целого (функция "потолок") и ближайшего меньшего целого (функция "пол"), предложенные К. Ю. Айверсоном [17], а $\varphi(i_0)$ — начальное смещение в отсчете с порядковым номером i_0 .

Начальное смещение в каждом последующем отсчете по сути есть не что иное, как разница вычисленного без округления числа импульсов в отсчете и его антье. Поэтому если значение начального смещения в первом отсчете обозначить как φ , значения данной величины в отсчете с любым порядковым номером можно найти из рекуррентной формулы следующего вида:

ИССЛЕДОВАНИЯ. РАСЧЕТ

Несложно понять, что в (6) и (7) нижние пределы интегрирования $(i_0 - 2)T_0$ соотносятся с множеством начал отсчетов, а верхние i_0T_0 — с множеством их окончаний.

Необходимое для вычисления значения $m_{и}$ интегрирование может быть осуществлено численными методами, реализованными средствами вычислительной техники. Однако с целью уменьшения объема вычислений и, как следствие, сокращения времени, потребного для их произведения, можно принять допущение о постоянстве значения $\dot{\phi}$ на протяжении отсчета. В этом случае выражения в правых частях формул (6) и (7) упрощаются, сводясь до совокупностей чисто арифметических операций и предикатов:

$$m_{и}(i_0) = \begin{cases} \left[\frac{m_3 T_0}{2\pi m(i_0)} \sum_{i=1}^{m(i_0)} \dot{\phi}|_{t=t_i(i_0)} + \phi(i_0) \right] \Leftarrow \phi(i_0) \leq \frac{2\pi}{m_3 s}; \\ \left[\frac{m_3 T_0}{2\pi m(i_0)} \sum_{i=1}^{m(i_0)} \dot{\phi}|_{t=t_i(i_0)} + \phi(i_0) \right] \Leftarrow \phi(i_0) > \frac{2\pi}{m_3 s}, \end{cases} \quad (8)$$

а

$$\phi(i_0) = \begin{cases} \phi & \Leftarrow i_0 = 1; \\ \left[\frac{m_3 T_0}{2\pi m(i_0 - 1)} \sum_{i=1}^{m(i_0)} \dot{\phi}|_{t_i(i_0-1)} + \phi(i_0 - 1) - \right. \\ \left. - \left[\frac{m_3 T_0}{2\pi m(i_0 - 1)} \sum_{i=1}^{m(i_0)} \dot{\phi}|_{t_i(i_0-1)} + \phi(i_0 - 1) \right] \right] \Leftarrow i_0 \neq 1. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь $\dot{\phi}|_{t_i(i_0)}$ и $\dot{\phi}|_{t_i(i_0-1)}$ — значения угловой скорости в моменты времени $t_i(i_0)$ и $t_i(i_0 - 1)$ соответственно, выделенные в отсчете с порядковыми номерами i_0 и $i_0 - 1$ соответственно; $m(i_0) \in \mathbb{N}_+$ — общее число этих моментов; $i = 1$; $m(i_0)$ — порядковый номер момента в рассматриваемом отсчете.

Причем

$$t_i(i_0) = \begin{cases} T_0(i_0 - 1/2) & \Leftarrow m(i_0) = 1; \\ T_0(i_0 - 1) + T_0(i - 1) / [m(i_0) - 1] & \Leftarrow m(i_0) \neq 1. \end{cases} \quad (10)$$

Исходя из очевидных соображений, можно вынести предельно общую рекомендацию, касающуюся адекватности результатов, которые обеспечиваются применением формул (8) — (10): $m(i_0) \geq 3$. Впрочем, при существенных значениях угловой ускорения получить удовлетворительные резуль-

таты, допуская, что $\dot{\phi} = \text{const}$, будет невозможно при сколь угодно большом $m(i_0)$, что предполагает сугубую необходимость обращения к более сложным формулам (6), (7).

Зная найденное по формулам (6), (7) или (8) — (10) значение $m_{и}$, путем умножения его на угловой шаг задающих элементов возможно определить измеренное значение угла поворота задатчика $\tilde{\phi}$, которое сообразно (1) будет отличаться от истинного значением абсолютной погрешности:

$$\tilde{\phi} = \frac{1}{D} \sum m_{и}(i_0) = \frac{2\pi}{m_3} \sum m_{и}(i_0).$$

Несколько более сложные рассуждения потребны при рассмотрении величин $\tilde{\phi}$, $\tilde{\ddot{\phi}}$ и $\tilde{\ddot{\ddot{\phi}}}$, ибо определение их значений подразумевает отнесение числа импульсов, зарегистрированных в отсчетах, к длительностям этих отсчетов T_0 .

С целью оценки осредненного значения угловой скорости достаточно рассмотреть один отсчет, найдя уже известным способом из $m_{и}(i_0)$ соответствующее значение угла поворота и разделив его на T_0 .

Для любого i_0

$$\tilde{\phi}(i_0) = \frac{m_{и}(i_0)}{DT_0} = \frac{2\pi m_{и}(i_0)}{m_3 T_0}.$$

Оценить осредненное значение углового ускорения возможно, рассмотрев уже не менее двух последовательных отсчетов, поскольку ускорение есть не что иное, как приращение скорости за единицу времени.

Для любого $i_0 \geq 2$

$$\tilde{\ddot{\phi}}(i_0) = \frac{\tilde{\phi}(i_0) - \tilde{\phi}(i_0 - 1)}{T_0} = \frac{2\pi [m_{и}(i_0) - m_{и}(i_0 - 1)]}{m_3 T_0^2}.$$

Наконец, оценка осредненного значения углового рывка подразумевает необходимость в рассмотрении минимум трех последовательных отсчетов. Рывок является приращением ускорения за единицу времени, поэтому сначала вычисляется значение ускорения во втором отсчете по отношению к первому, а затем — в третьем по отношению ко второму, после чего разница этих значений относится к соответствующему промежутку времени.

Для любого $i_0 \geq 3$

$$\begin{aligned} \tilde{\ddot{\ddot{\phi}}}(i_0) &= \\ &= \frac{\tilde{\ddot{\phi}}(i_0) - \tilde{\ddot{\phi}}(i_0 - 1)}{T_0} = \frac{\tilde{\phi}(i_0) - 2\tilde{\phi}(i_0 - 1) + \tilde{\phi}(i_0 - 2)}{T_0^2} = \\ &= \frac{2\pi [m_{и}(i_0) - 2m_{и}(i_0 - 1) + m_{и}(i_0 - 2)]}{m_3 T_0^3}. \end{aligned}$$

Если в измерительном преобразователе предусмотрен реализованный теми или иными средствами репер, позволяющий в каждом новом цикле измерений приводить сигнал к нулевому начальному смещению, то математическая модель с учетом принятых допущений будет детерминированной. При отсутствии репера величина ϕ является случайной, поскольку начальное положение задающего компонента в каждом новом цикле измерений абсолютно произвольно. В таком случае следует прибегнуть к методике, предложенной в [9] и развитой в [18].

Согласно ей для начала необходимо определить закон распределения вероятностей для величины ϕ . Исходя из очевидных соображений, можно с достаточной уверенностью предположить, что она распределена по закону равномерной плотности [19]:

$$p_\phi = \begin{cases} m_\phi/2\pi & \Leftarrow \phi \in [0; 2\pi/m_\phi]; \\ 0 & \Leftarrow \phi \notin [0; 2\pi/m_\phi], \end{cases}$$

где p_ϕ — плотность распределения вероятностей величины ϕ .

Так как носитель распределения конечен, его надлежит рассматривать целиком. Если $m_\pi \in \mathbb{N}_+$ — общее число выделенных в нем вложенных промежутков, а $i_\pi = 1; m_\pi$ — порядковый номер промежутка, то по упомянутой методике должно быть установлено отношение эквивалентности:

$$(\phi)_{i_\pi} \sim \forall \phi \in \left[\frac{2\pi(i_\pi - 1)}{m_\pi m_\phi}; \frac{2\pi i_\pi}{m_\pi m_\phi} \right],$$

где $(\phi)_{i_\pi}$ — эквивалентное значение величины ϕ для вложенного промежутка с порядковым номером i_π .

Ввиду равномерности плотности распределения эквивалентные значения ϕ будут совпадать с серединами выделенных в носителе вложенных промежутков:

$$(\phi)_{i_\pi} = \frac{\pi(2i_\pi - 1)}{m_\pi m_\phi}.$$

События же попадания действительного значения ϕ в любой из выделенных в носителе вложенных промежутков равновероятны. В связи с этим одинаковым весом при прочих равных условиях обладают все режимы эксплуатации, что исключает необходимость вычисления вероятностей, играющих в упомянутой методике роль состав-

ляющих весовых коэффициентов для подсчета среднего взвешенного значения целевой функции.

Потребность оценки эффективности измерительного преобразователя в точностном аспекте и количественного сравнения моделируемых процессов подразумевает необходимость синтеза критерия, чье значение будет характеризовать близость результатов измерений к истине.

Информация о значениях рассматриваемых величин может быть получена только по истечении отсчета. В продолжение отсчета последующего используется именно она. Исключением является угол поворота, при измерении которого соответствующие расчеты можно осуществлять не по истечению отсчета, как предлагается здесь, а при возникновении каждого импульса, что обеспечит большую точность. Для величины ϕ также известно, что в начале цикла измерений она равна нулю. На основании данных тезисов искомым критерий представим в виде следующего интегрального функционала, к минимизации значения которого следует стремиться при выборе или проектировании кодирующего преобразователя:

$$\begin{aligned} E_{\phi^{(k)}} &= \int_{kT_0}^{T_0(k+i_0)} |\Delta\phi^{(k)}| dt = \\ &= \int_{kT_0}^{T_0(k+i_0)} |\phi^{(k)} - \phi_{\text{изм}}^{(k)}| dt \rightarrow \min, \end{aligned}$$

где (k) в верхнем индексе — обозначение производной по времени порядка k , который принимает значение 0 для угла поворота, 1 — для угловой скорости, 2 — для углового ускорения и 3 — для углового рывка, а $\Delta\phi^{(k)} = \phi^{(k)} - \phi_{\text{изм}}^{(k)}$ — обусловленная дискретизацией абсолютная погрешность измерения соответствующей величины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Большая Советская энциклопедия** [Электрон. ресурс]: Электрон. версия энциклопедии. — М.: Большая Рос. энцикл.; Гласнет, 2003. 3 опт. диска (PC CD-ROM).
2. **Набоких В. А.** Системы электроники и автоматики автомобилей: Учеб. пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2016. — 204 с.
3. **Асмолов Г. И., Рожков В. М., Соколов В. Г.** Виды информации и датчики в системах транспортной телематики: Учеб. пособие. — М.: МАДИ, 2008. — 74 с.
4. **Проектирование датчиков для измерения механических величин** / Е. П. Осадчий, А. И. Тихонов, В. И. Карпов [и др.]; под ред. Е. П. Осадчего. — М.: Машиностроение, 1979. — 480 с.

5. **Электрические** измерения неэлектрических величин / А. М. Туричин, П. В. Новицкий, Е. С. Левшина [и др.]; под ред. П. В. Новицкого. — Л.: Энергия, 1975. — 576 с.
6. **Волкова В. Н.** Теория информационных процессов и систем: Учебник и практикум для академического бакалавриата. — М.: Юрайт, 2016. — 502 с.
7. **Зорич В. А.** Математический анализ. Часть I. — М.: МЦНМО, 2012. — XVIII + 702 с.
8. **Фрайден Дж.** Современные датчики. Справочник. — М.: Техносфера, 2005. — 592 с.
9. **Есаков А. Е.** Методика создания алгоритмов для систем управления фрикционными сцеплениями автомобильных автоматических трансмиссий: дис. ... канд. техн. наук. — М., 2010. — 161 с.
10. **Гируцкий О. И., Есеновский-Лашков Ю. К., Поляк Д. Г.** Электронные системы управления агрегатами автомобиля. — М.: Транспорт, 2000. — 213 с.
11. **Вульвет Дж.** Датчики в цифровых системах. — М.: Энергоиздат, 1981. — 200 с.
12. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. — М.: Бинум, 2014. — 704 с.
13. **Платт Ч., Янссон Ф.** Энциклопедия электронных компонентов. Том 3. Датчики местоположения, присутствия, ориентации, вибрации, жидкости, газа, света, тепла, звука, электричества. — СПб.: БХВ-Петербург, 2017. — 288 с.
14. **Литвиненко В. В., Майструк А. П.** Автомобильные датчики, реле и переключатели. Краткий справочник. — М.: За рулем, 2004. — 176 с.
15. **Автомобильная техника:** введение в специальность: Учебник / Р. Фишер, Р. Гшайде, У. Хайдер [и др.]; под общ. ред. Р. Гшайде. — Астана: Фолиант, 2017. — 720 с.
16. **Соснин Д. А.** Электрическое, электронное и автотронное оборудование легковых автомобилей (Автотроника-4): учеб. для вузов. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2015. — 416 с.
17. **Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О.** Конкретная математика. Основание информатики. — М.: Мир, 1998. — 703 с.
18. **Есаков А. Е., Кретов А. В.** Об уточненной постановке задач синтеза алгоритмов автоматического робастного управления техническими системами // Известия МГТУ "МАМИ". — 2014. — № 4 (22). — Т. 1. — С. 83–88.
19. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: учебник. — М.: КноРус, 2010. — 664 с.

"Сименс" и КАМА TYRES заключили соглашение о продолжении сотрудничества

Компания "Сименс" и ПАО "Татнефть" КАМА TYRES заключили договор о расширении логистической системы, ранее внедренной на Нижнекамском заводе грузовых шин (НЗГШ) силами "Сименс". Этот важный для завода шаг — часть общей стратегии по модернизации и расширению производственных мощностей. Новое соглашение стало прямым продолжением сотрудничества "Сименс" и КАМА TYRES — ведущего российского производителя шин для грузовых автомобилей и автобусов. Предприятия комплекса выпускают более 80 моделей шин общей производительностью 1,2 млн единиц в год. В числе заказчиков КАМА TYRES — крупнейшие отечественные и зарубежные бренды, в том числе "КамАЗ", Группа "ГАЗ", "НефАЗ", "УАЗ", "Фольксваген Груп Рус", "Форд Соллерс Холдинг" и др.

КАМА TYRES планирует удвоить производство шин, поэтому в рамках общей модернизации в компании приняли решение о расширении логистической системы, введенной в эксплуатацию в мае 2020 г. Благодаря успешной реализации первой фазы проекта заказчик выбрал "Сименс" для проведения следующего этапа работ. Работы в рамках проекта будут проводиться российским подразделением "Сименс" совместно с глобальной компанией, которая возьмет на себя поставку оборудования, инжиниринг и общее руководство. "Сименс" Россия обеспечит шеф-монтаж, пуско-наладочные работы и консультирование.

В состав логистической системы входит WMS-система управления складом, транспортная система, контроллеры S7-1500, системы визуализации, двигатели, частотные преобразователи, распределенная периферия, сетевое оборудование, покрасочный робот, склады сырых шин и готовой продукции, электроподвесная дорога. Такая же техника была установлена на первом этапе проекта, и в рамках нового договора будет производиться расширение логистической системы на всех ее участках. Основная задача проекта — обеспечить своевременную доставку и складирование сырых и готовых шин с учетом увеличения производственных мощностей на заводе.

"Мы очень рады продолжению сотрудничества с ПАО "Татнефть" КАМА TYRES — одним из лидеров шинной промышленности в России. Для нас значимо, что компания выбрала "Сименс" для реализации нового этапа проекта благодаря высокой оценке наших усилий и их результата на первом этапе", — говорит Жанна Шалыгина, директор управления "Цифровое производство" компании "Сименс" в России.

Пресс-офис ООО "Сименс"

ЭКСПЛУАТАЦИЯ. РЕМОНТ

УДК 656.13.07

DOI: 10.36652/1684-1298-2021-1-26-28

А. Л. Бараш, канд. техн. наук, доцент, e-mail: a.l.barash@yandex.ru,
Р. В. Волокушин, канд. техн. наук, Военный институт (инженерно-технический)
Военной академии материально-технического обеспечения, г. Санкт-Петербург

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБНОСТИ ПАРКОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ И АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ЗАПАСНЫХ ЧАСТЯХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДОМ ОБЪЕДИНЕНИЯ ПРОГНОЗОВ

В статье рассматривается возможность применения для прогнозирования потребности парков автомобильной и строительной техники в запасных частях и эксплуатационных материалах метода объединения прогнозов, как достаточно простого, менее трудоемкого и достаточно точного в сравнении с применяемыми на практике.

Ключевые слова: парк автомобильной и строительной техники, прогноз потребности в запасных частях и эксплуатационных материалах, метод объединения прогнозов.

The article considers the possibility of using the method of combining forecasts for predicting the needs of car and construction equipment fleets in spare parts and operational materials, as it is quite simple, less time-consuming and quite accurate in comparison with those used in practice.

Keywords: fleet of automotive and construction equipment, forecast of the need for spare parts and operational materials, method of combining forecasts.

В организации и реализации мероприятий технической эксплуатации парков автомобильной и строительной техники прогнозирование играет заметную роль, сфера применения методов прогнозирования не ограничивается обеспечением процессов планирования, логистики, снабжения, организации производства и т. д. В настоящее время существует и применяется достаточно широкий спектр математических моделей, позволяющих с той или иной степенью точности провести прогноз потребности в том или ином виде запасов на краткосрочное и перспективное планирование, большинство из применяемых в этих моделях методов прогнозирования достаточно изучены и апробированы. Но с момента появления профилактических стратегий технической эксплуатации до настоящего времени актуальным остается вопрос применимости прогнозных моделей, прежде всего точности и перспективного периода прогноза, к условиям эксплуатации конкретного парка. Многообразие факторов воздействия внешней среды, влияющих на конечные показатели готовности техники парков к применению, обуславливает существование множества отличающихся

неоднородностью показателей, характеризующих разные эксплуатационные процессы, которые развиваются по различным направлениям и одновременно имеют неодинаковую значимость.

Очевидно, что при всем многообразии применяемых методов и их особенностях, желательно, чтобы построенные на их основе модели были многофакторными, с прозрачной обратной связью, а оценка результатов — многокритериальной. Однако стремление к достижению этого неизбежно влечет повышение сложности и увеличение трудозатрат при реализации таких моделей, что объективно ограничивает область их применения прежде всего потерей оперативности при решении текущих задач планирования, необходимостью дополнительного обучения персонала, привлечения сложных программных средств и т. д. Однако значимость и важность результатов планирования могут диктовать высокие требования к точности результатов прогнозирования и периода их достоверной реализации.

Одним из способов решения поставленных задач при высоком требовании к точности прогноза можно рассмотреть применение модели, допуска-

ющей так называемое "объединение прогнозов", т. е. использование результатов исследования прогнозируемого процесса, полученных различными методами прогнозирования с последующим объединением в единый результат. Подобные методы в последнее время все чаще находят применение в экономическом прогнозировании в России и за рубежом [1, 4].

Сама по себе поставленная задача, учитывая вышесказанное, представляется достаточно громоздкой, а достигнутая достоверность прогнозов по локальным направлениям очевидно будет диссипативна в общем потоке прогнозных показателей, имеющих различную степень точности. Кроме того, следует отдавать себе отчет в том, что практикующие инженерно-технические работники, давно покинувшие учебную скамью, владеют только общеинженерными методиками, их специальные знания и навыки в области математического анализа, общей теории статистики нуждались бы в восстановлении. Принимая во внимание вышесказанное, в целях увеличения степени применимости рассматриваемой методики в ряде случаев на практике можно воспользоваться известным законом "больших чисел".

В общем виде объединенный прогноз представляется как [3]

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i, \quad (1)$$

где F — объединенный прогноз; i — локальный прогноз, полученный по i -му направлению; f — весовой коэффициент, с которым i -й прогноз был включен в совокупность F .

Некоторые авторы, рассматривающие аспекты применения метода объединения прогнозов в экономическом прогнозировании [1, 4, 6], отмечают, что на практике достаточно часто значения весовых коэффициентов усредняют, буквально: "Среднее арифметическое для весовых коэффициентов является наиболее используемым методом на практике" [5]. Однако эти же авторы совершенно справедливо замечают, что при строгом подходе к определению весовых коэффициентов необходимо учитывать точность (явную или предполагаемую) каждого индивидуального прогноза и величину весового коэффициента назначать в этом соответствии: "... если есть основания считать, что один из индивидуальных прогнозов более точен по сравнению с другими, то ему необходимо придавать больший вес, чем остальным" [3].

В специальной литературе рассматриваются различные методики определения значений весовых коэффициентов, основная идея заключается в поиске таких весовых коэффициентов для индивидуальных прогнозов, чтобы ошибка данного объединенного прогноза была минимальной. Определению весовых коэффициентов посвящено достаточно много исследований [4], однако большинство авторов сходятся во мнении, что этот вопрос остается до конца не решенным.

Учитывая предположение, сделанное ранее, для достижения цели повышения степени применимости рассматриваемого метода к практике эксплуатации реальных парков машин строительной и автомобильной техники целесообразно применить один из методов, известных из общей теории статистики, в котором в качестве весового коэффициента принимается величина, обратно пропорциональная величине отклонения прогнозного от фактического значения временного ряда:

$$\omega' = \frac{1}{|f_i - y_i|}, \quad (2)$$

где f_i — прогнозное значение; y_i — фактическое значение временного ряда.

Сами весовые коэффициенты, естественно, должны иметь положительные значения, что обеспечивается формой выражения (2), а их сумма должна составлять единицу, для достижения этого коэффициенты для частных прогнозов нормируются по сумме всех весовых коэффициентов объединенного прогноза:

$$\omega_i = \frac{\omega'_i}{\sum_{j=1}^k \omega'_j}, \quad (3)$$

где k — число индивидуальных прогнозов.

В качестве примера можно рассмотреть прогноз потребности в запасных частях парка машин, выполненный объединением трех частных прогнозов, каждый из которых составлен по одному из наиболее часто применяемых в практике технической эксплуатации парков строительной и автомобильной техники методу экстраполяции временных рядов: первый метод, позиционируемый как наиболее часто применимый, описанный в [6], основанный на модели, включающей в себя три составляющие: тренд и составляющие, описывающие сезонные колебания и случайные отклонения; второй и третий методы представляют собой относительно простые и наиболее часто реализуемые в общей теории прогнозирования метод скользящей взвешенной

ЭКСПЛУАТАЦИЯ. РЕМОНТ

Результаты прогнозирования потребности парков строительной и автомобильной техники в запасных частях и эксплуатационных материалах различными методами

t_i	y_i	y_i	Методы прогнозирования		
			Взвешенной средней	Экспоненциального сглаживания	Объединения прогнозов
1	20	19	—	22	19
2	21	21	—	22	22
3	30	29	29,0	30	29
4	38	32	31,3	36	34
5	28	31	27,9	28	28
6	19	26	22,6	21	22
7	20	24	20,9	22	22
8	18	27	24,9	20	22
9	38	32	31,9	36	34
10	40	35	35,0	38	37
11	30	34	27,6	30	30
12	30	31	28,5	30	30
σ		4,7	4,2	3,6	2,6

средней и метод экспоненциального сглаживания. Расчет выполнен применительно к примеру, приведенному в [6]. В качестве примечания: при реализации метода взвешенной средней расчет велся для пятичленного периода (четыре скользящие средние), при определении весов уровней использовался бином Ньютона (трафарет 1-4-6-4-1); при реализации метода экспоненциального сглаживания параметр сглаживания определялся по методу профессора Брауна, среднее начальное определялось как среднее арифметическое [7].

Результаты расчетов приведены в таблице.

Для сравнительного анализа точность прогноза целесообразно оценить также с помощью средней относительной ошибки [7]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}, \quad (4)$$

здесь n — число уровней, входящих в интервал сглаживания; ε_i — случайная величина отклонения прогноза на уровне.

Точность прогноза в рассматриваемом примере повышена на 28 % по сравнению с самым точным из полученных локальных прогнозов, выполненного методом экспоненциального сглаживания, и на 45 % по сравнению с рекомендуемым.

Таким образом, можно заключить, что использование объединенного прогноза существенно повышает точность прогнозирования и может быть применено в практике эксплуатации парков

строительной и автомобильной техники при прогнозировании потребности в запасных частях, эксплуатационных и расходных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сурков А. А. Применение метода попарных сравнений при объединении экономических прогнозов: <https://orcig.org/0000-0002-2464-5853>.
2. Френкель А. А., Волкова Н. Н., Сурков А. А. Повышение точности прогнозирования интегральных показателей на основе объединения прогнозов // Финансы: теория и практика. — 2017. — Т. 21. — Вып. 5. — С. 118–127.
3. Сурков А. А. Объединение экономических прогнозов с использованием экспертной информации // Статистика и экономика. — 2019. — Т. 16. — № 5. — С. 4–15.
4. Френкель А. А., Сурков А. А. Определение весовых коэффициентов при объединении прогнозов // Вопросы статистики. — 2017. — № 17. — С. 3–15.
5. Сурков А. А. Повышение точности экономического прогнозирования на основе объединения экономических прогнозов // Вестник МФЮА. — 2016. — № 2. — С. 267–276.
6. Щетина В. А., Лукинский В. С., Сергеев В. И. Снабжение запасными частями на автомобильном транспорте. — М.: Транспорт, 1988. — 112 с.
7. Венецкий И. Г., Венецкая В. И. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: Справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Статистика, 1979. — 447 с.
8. Kolassa S. Combining exponential smoothing forecasts using Akaike weights // International Journal of Forecasting. — 2011. — No. 27 (2). — P. 238–251.
9. Tian J., Anderson H. M. Forecast combinations under structural break uncertainty // International Journal of Forecasting. — 2014. — No. 30 (1). — P. 161–175.

УДК 629.017

DOI: 10.36652/1684-1298-2021-1-29-36

А. М. Ромашко, канд. техн. наук, доцент, Московский государственный университет им. Н. Э. Баумана, e-mail: romash.am@mail.ru,

До Суан Тхань, аспирант, Московский государственный университет им. Н. Э. Баумана, e-mail: Xuanthanhnb2012@gmail.com

МОДЕЛЬ МИКРОКОНТАКТА ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В данной статье описана компьютерная модель контакта фрикционных материалов в тормозных устройствах строительных дорожных машин и подъемно-транспортных машин при различных температурах. В результате моделирования получены такие характеристики контакта, как сближение, распределение контактного давления, фактическая площадь контакта, зазор между поверхностями. Приведено сравнение полученных зависимостей с расчетами по методу конечных элементов (МКЭ).

Ключевые слова: компьютерное моделирование контакта при различных температурах, влияние температур, фрикционные материалы, фактическая площадь контакта, распределение контактного давления.

In the paper there is proposed computer model of the contact of friction materials in the brake devices of building road machines and lifting transport machines at different temperatures. The contact surface is modeled by a microrelief composed of a set of elements in the form of rods. As a result of modelling, there are such contact characteristics as rapprochement, distribution of contact pressure, real contact area and the gap between the surfaces. The obtained dependencies are compared with the finite element method.

Keywords: computer model of contact at diggerent temperatures, temperature influence, contact of friction material, actual contact area, contact pressure distribution.

Процесс трения пар тел происходит в точках их фактического контакта, также при торможении тормозной колодки и колеса. Износ зависит не только от свойств материала, но и от давления на этой площади. Суммарная площадь этих контактов незначительна по сравнению с площадью [1, 2], перекрываемой тормозной колодкой. Так как тепловыделение при трении происходит на пятнах фактического касания поверхностей [3], то плотности тепловых потоков и температура на поверхности могут достигать больших величин, под влиянием которой меняются физико-механические свойства поверхности трения [4]. Соответственно происходит изменение площади контакта и перераспределяется нагрузка на контакте.

Были изучены температурные режимы работы автомобильных тормозов. Температура дисковых автомобильных тормозов на поверхности трения может достигать 500...600 °С. При кратковременных торможениях скользящий контакт железно-дорожных тормозов нагревается до температур не более 250...300 °С. При длительных торможениях локальная температура на поверхности трения может достигать 800 °С [5, 6]. Температура в тормозе самолета достигает 1000...1100 °С [5, 7, 8].

Прочностные свойства материалов очень существенно зависят от температуры. В определенных диапазонах температур твердость материалов *НВ* уменьшается во много раз, причем до минимума при температуре плавления [3].

Профессор А. В. Чичинадзе с соавторами в своих работах [5] проводил эксперименты и подтвердил, что зависимость прочностных показателей (пределы прочности при разрыве, сжатии, срезе) и твердости от температуры для большинства фрикционных полимерных материалов имеет падающий характер и описывается экспонентой. При изменении температуры от 20 до 300 °С снижение показателей достигает значительной величины — до 90 %. В среднем для всех исследуемых материалов снижение прочности при растяжении, сжатии и срезе составляет около 65 %, а снижение твердости достигает примерно 75 %.

Зависимость твердости от температур хорошо описывается формулой Ито Шишокина [9]:

$$HB = HB_0 e^{-\alpha \vartheta}, \quad (1)$$

где ϑ — температура в градусах.

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС

Обычно HB_0 соответствует температуре 20 °С или 0 °С. Форма показывает, что с ростом температуры твердость падает.

Интенсивность изнашивания с повышением температуры до 600 °С во всех случаях возрастает [5]. Для большинства фрикционных пар возрастание температуры трения и удельного давления обычно приводит к снижению коэффициента трения и повышению интенсивности износа [8].

При моделировании процесса трения в качестве параметров моделирования логично рассматривать влияние температуры характеристики контакта. В данной статье рассмотрена компьютерная модель контакта фрикционных материалов в узлах трения ПТМ при различных температурах реальных технических поверхностей на языке C++. Модель предназначена, в первую очередь для расчета нагрузки на контакте, т. е. для расчета таких механических характеристик контакта, как величина контактной деформации, площадь фактического контакта, распределение давления на поверхности контакта.

Модель состоит из двух подмоделей: подмодель микроповерхности и подмодель контакта при различных температурах.

Подмодель микроповерхности. Существуют различные подходы к моделированию поверхностных микронеровностей. Один из подходов основан на представлении поверхности в виде простейших структурных элементов в виде: сферических сегментов, цилиндров, конусов, стержней, пирамид, эллипсоидов, полусфер [10–18].

Другой подход связан с использованием фракталов при моделировании микроструктуры поверхности, пример в работах [19–21].

Такие модели микроструктуры поверхности при численном моделировании могут отражать с высокой точностью микрорельеф поверхности. Основная проблема, которая возникает при моделировании, заключается в том, что в большинстве случаев мы не имеем полной информации о реальной структуре поверхности. В ряде случаев для решения конкретных инженерных задач можно обойтись обобщенными характеристиками шероховатой поверхности, без точного ее моделирования.

Входными параметрами являются стандартные характеристики микро топографии контактирующих поверхностей по ГОСТ 2789–73:

- l – базовая длина;
- R_a – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатой поверхности;
- R_{max} – полная высота профиля;
- R_p – максимальная высота выступа шероховатой поверхности;

- S_m – средний шаг неровностей;
- S – среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины;
- t_m – относительная опорная длина профиля по средней линии;
- t_{20} – относительная опорная длина профиля по уровню p , равному 20 % полной высоте профиля;

Особенности подмодели микроповерхности (рис. 1).

1. Вся поверхность разбивается на отдельные площадки с базовой длиной l . При численном моделировании эта отдельная площадь аппроксимируется матрицей $n \times n$ элементов стержней, имеющих одинаковое прямоугольное сечение, но разную высоту.

2. Значениями высот стержней на базовой длине сформулируем следующие условия:

Условие 1. Значение принимается в промежутке от $R_p - R_{max}$ до R_p и среднее арифметическое значение высот стержней, находящихся в каждом ряде матрицы, должно быть равно R_a .

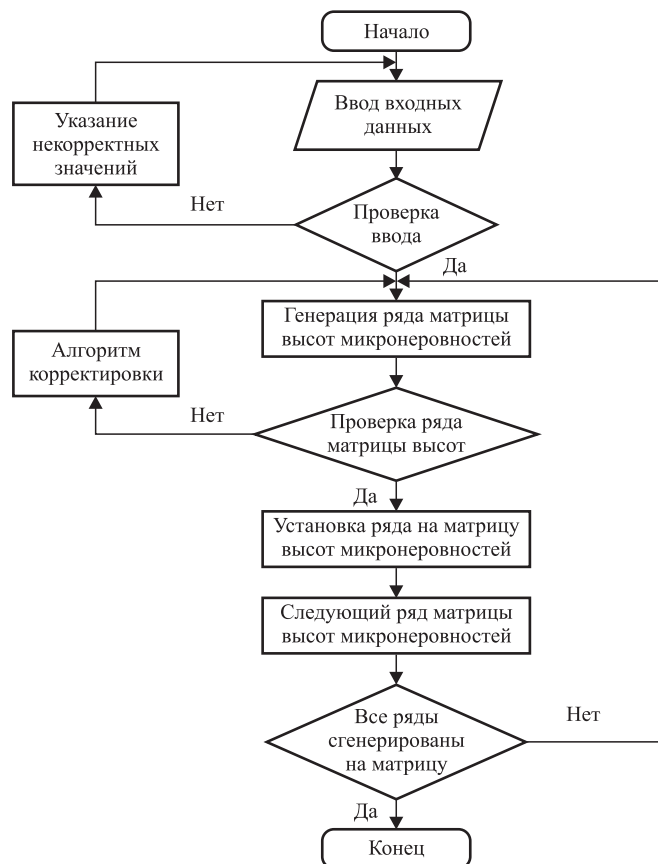


Рис. 1. Алгоритм подмодели микроповерхности

Условие 2. Среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины равно S ;

Условие 3. Среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины равно S_m .

Условие 4. Относительное значение суммы длин элементов, у которых высота больше или равна 0, на базовой длине l равно t_m .

Условие 5. Относительное значение суммы длин элементов, у которых высота больше или равна $(R_p - 0,2R_{\max})$, на базовой длине l равно t_{20} .

Условия могут соблюдаться все одновременно, но для упрощения модели могут выбираться отдельные условия или комплексы условий.

Подмодель контакта при различных температурах

При моделировании учитываются следующие предварительные допущения (рис. 2).

1. Элементы модели шероховатой поверхности расположены на жестком основании.

2. Ближайшие контакты не влияют друг на друга. На практике при использовании фрикционных полимерных материалов редко применяются давления более 1 МПа, а еще реже — в несколько МПа. В большинстве барабанных и ленточных тормозов, в которых тормозные накладки изготавливаются из фрикционных полимерных материалов на каучуковом, каучуковосмоляном и смоляном связующем, применяются давления, не превышающие 1 МПа [22]. Отметим, что при таких давлениях плотность пятен контакта яв-

ляется малой. Таким образом, это допущение не вносит существенных погрешностей в расчеты.

3. Место соприкосновения двух шероховатых поверхностей можно рассмотреть контакт жесткой плоской гладкой поверхности с телом, имеющим эквивалентную шероховатость.

4. Предполагается, что один из материалов пары трения имеет существенно более низкие механические характеристики по сравнению с другим. То есть, предполагается, что деформируется только более мягкий материал. Это соответствует фрикционным тормозам и муфтам, в которых контактируют сталь или чугун и фрикционные пластмассы.

Особенности модели: предполагается, что при нагружении фрикционный материал деформируется сначала упруго, затем упругопластически, а при достижении давления в контакте достигающего твердости Бринелля, — пластически; предполагается, что площадь контакта определяется механическими характеристиками фрикционного материала (более "мягкого"); механические характеристики материала при различных температурах должны быть заранее определены экспериментально; контакт шероховатых поверхностей имеет дискретный характер.

Основные механические характеристики конкретного материала для использования в модели можно получить в результате испытания материала на сжатие по ГОСТ 4651—2014 (ISO 604:2002) при различных температурах по ГОСТ 14359—69. По результатам испытания для каждой температуры создается функция зависимости $\sigma = f(\epsilon)$ с помощью кубического сплайна. Программа реализуется на языке C++ [23]. В модели принимаем контактное давление, при котором начинается пластическая деформация, соответствующая твердости HB более мягкого материала в рассмотренной температуре, и обозначаем относительную деформацию при этом ϵ_k .

Компьютерная модель контакта шероховатых поверхностей работает по следующему алгоритму. В рассмотренной температуре T_i имеются функция зависимости $\sigma_i = f_i(\epsilon)$, твердость HB_i и относительная деформация ϵ_{ki} при начале пластической деформации. При заданной общей нормальной нагрузке на пару трения, по характеристикам микрогеометрии поверхностей определяются относительные деформации каждого выступа. Если найденная величина меньше ϵ_{ki} , то контактное напряжение находится по функции $\sigma_i = f_i(\epsilon)$, если больше или равна ϵ_{ki} , то контактное напряжение равно твердости HB_i . Таким образом, для каждого

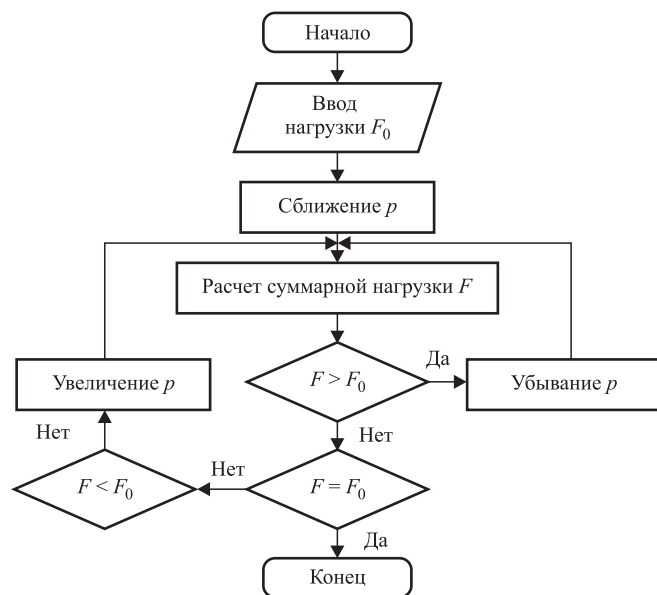


Рис. 2. Алгоритм модели контакта

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС

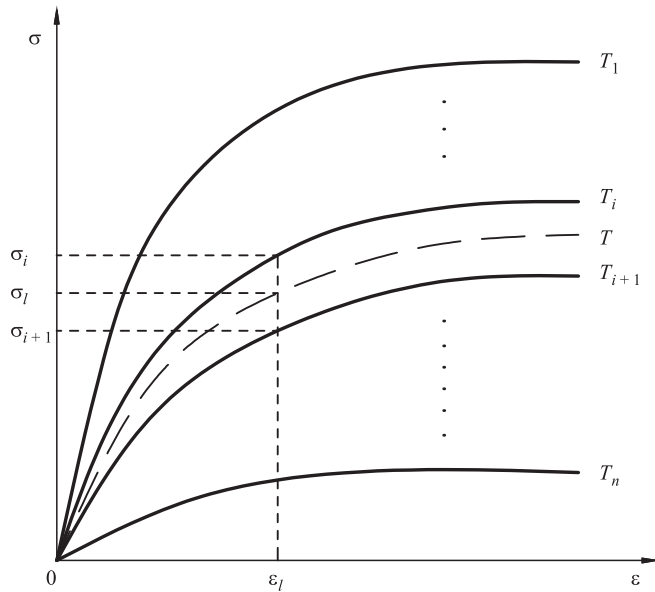


Рис. 3. Диаграмма сжатия фрикционных материалов при различных температурах

выступа, в зависимости от его площади и контактного давления, определяется нагрузка. В итоге моделирования сумма нагрузок всех выступов должна быть равна заданной нормальной нагрузке.

В случае отсутствия данных зависимости напряжения от деформации в рассмотренной температуре T (рис. 3), находящейся между T_i и T_{i+1} , для нахождения напряжения σ_T при относительной деформации ε_T рассчитывают по способу линейной интерполяции [24, 25]:

$$\sigma_T = \left(\frac{T - T_i}{T_{i+1} - T_i} \right) (\sigma_{i+1} - \sigma_i) + \sigma_i. \quad (2)$$

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим пример моделирования шероховатой поверхности, полученной предварительным шлифованием. Параметры шероховатости, представленные в работе [26] и по ГОСТ 2789–73, приведены в табл. 1.

На рис. 4 приведена модель профилограммы поверхностей № 1 и № 2.

Таблица 1

Распределение напряжений

Поверхность	l , мм	R_a , мкм	R_{max} , мкм	R_p , мкм	S_m , мкм	S , мкм	t_m	t_{20}
№ 1	0,8	2,0	10,0	5,0	160	125	0,5	0,1
№ 2	2,5	4,0	16,0	9,0	200	160	0,4	0,1

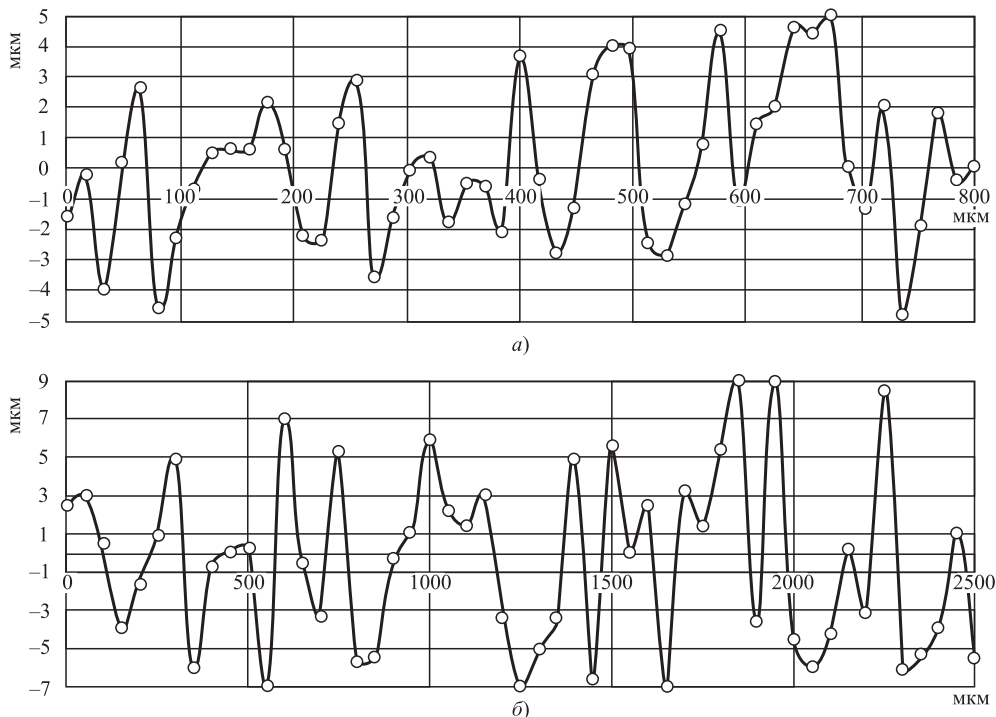


Рис. 4. Модель профилограммы поверхностей:

a – № 1; b – № 2

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС

Таблица 2

Распределение напряжений

q_r , МПа \ q_a , МПа	A_r/A_a						
	0,1	0,5	1	1,5	2	3	4
0...2,3	0	0,0024	0,0012	0,0012	0,002	0,0012	0,0024
2,3...4,6	0,0008	0,0004	0,0008	0,0008	0,002	0,0032	0,0036
4,6...6,9	0,0008	0,0008	0,0008	0,002	0,002	0,0016	0,0028
6,9...9,2	0,0008	0,0016	0,0016	0,0012	0,0028	0,0024	0,002
9,2...11,5	0	0,0012	0,002	0,002	0,0008	0,0016	0,002
11,5...13,8	0,0016	0,002	0,0032	0,0012	0,0016	0,0032	0,0016
13,8...16,1	0,0008	0,0012	0,0008	0,0028	0,002	0,0024	0,0028
16,1...18,4	0,0032	0,0028	0,002	0,0012	0,002	0,0024	0,004
18,4...20,7	0	0,0016	0,0028	0,002	0,0032	0,0028	0,0016
20,7...23	0	0,0148	0,0356	0,0584	0,0784	0,1216	0,1652

На рис. 5 показано 3D-микроповерхности № 2, которые построены в программе APDL по результатам подмодели.

На рис. 6 показано сравнение кривой опорной поверхности, рассчитанной по формуле, рекомендуемой профессором Демкиным Н. Б. [26], и аналогичных кривых, рассчитанных по комплексам условий K1, K2, K3, K4, K5 поверхностей № 1 и № 2. Из рис. 6 видно, что модельная кривая опорная у симметричной микроповерхности № 1 лучше соответствует кривой, рассчитанной по формуле, чем микроповерхности № 2. Нужно отметить, что в формулу входят только такие характеристики микроповерхностей, как R_{max} , R_p ,

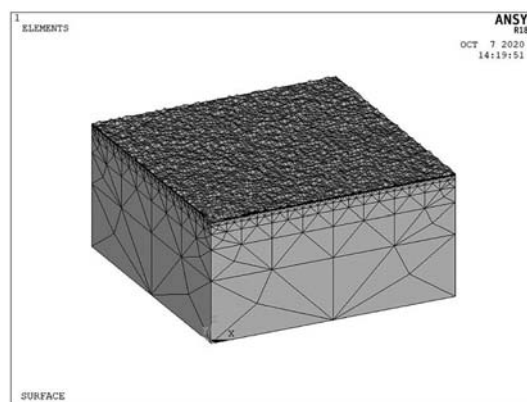


Рис. 5. 3D-микроповерхности № 2

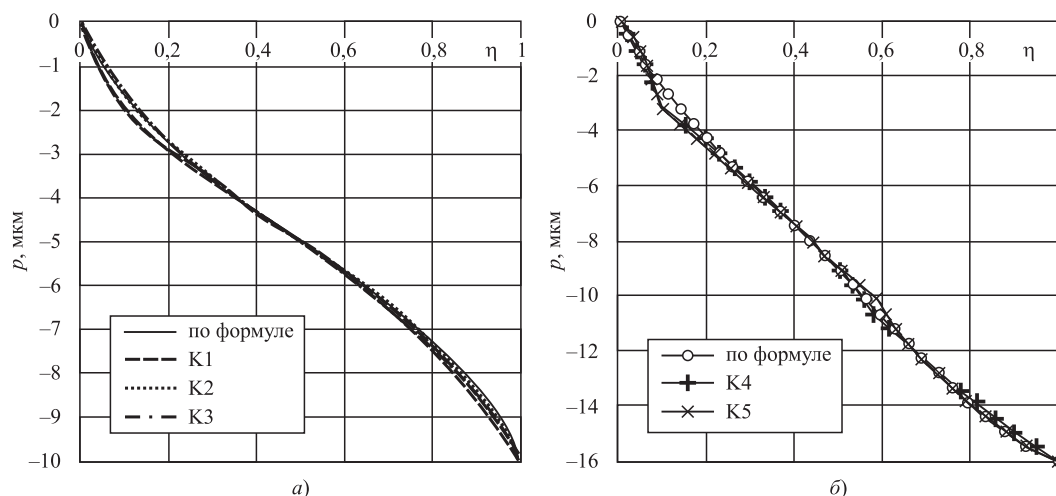


Рис. 6. Кривые опорные поверхности:

а — № 1, K1 — комплекс из условий 1 и 5, K2 — комплекс из условий 1 и 3, K3 — комплекс из условий 1 и 4; б — № 2, K4 — комплекс из условий 1, 3, 4 и 5, K5 — комплекс из условий 1, 2, 3, 4 и 5

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС

R_a , t_m . Кривая, рассчитанная в нашей программе по комплексу условий К2 поверхности № 1, лучше всего соответствует кривой, рассчитанной по формуле.

В качестве примера расчета по программе имитационного моделирования контакта проведено моделирование контакта шероховатой поверхности фрикционного материала 2339,62 с твердостью $HB = 23$ МПа (тормоза грузовых автомобилей) с гладкой стальной поверхностью при температурах 20 и 100 °С.

В табл. 2 представлено распределение напряжений на фактических площадях контакта при различных номинальных давлениях: 0,1; 0,5; 1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4 МПа при температуре 20 °С. A_r/A_a — отношение фактической площади к номинальной.

На рис. 7 представлены результаты моделирования. А именно: влияние номинального давления q_a на отношение фактической площади к номинальной A_r/A_a , отношение сближения к максимальной высоте шероховатости p/R_{max} , фактическое максимальное давление q_r и объем зазора V при температурах 20 и 100 °С.

Графики рис. 7 подтверждают, что в диапазоне общепринятых значений номинальных давлений для этого материала фактическая площадь контакта составляет сотые и десятые доли от номинальной площади, что соответствует результатам, приведенным во многих работах. С момента, когда номинальное давление достигает 2,4 МПа при 20 °С и 1,2 МПа при 100 °С, максимальное давление на фактической площади контакта мало изменяется и соответствует твердости материала

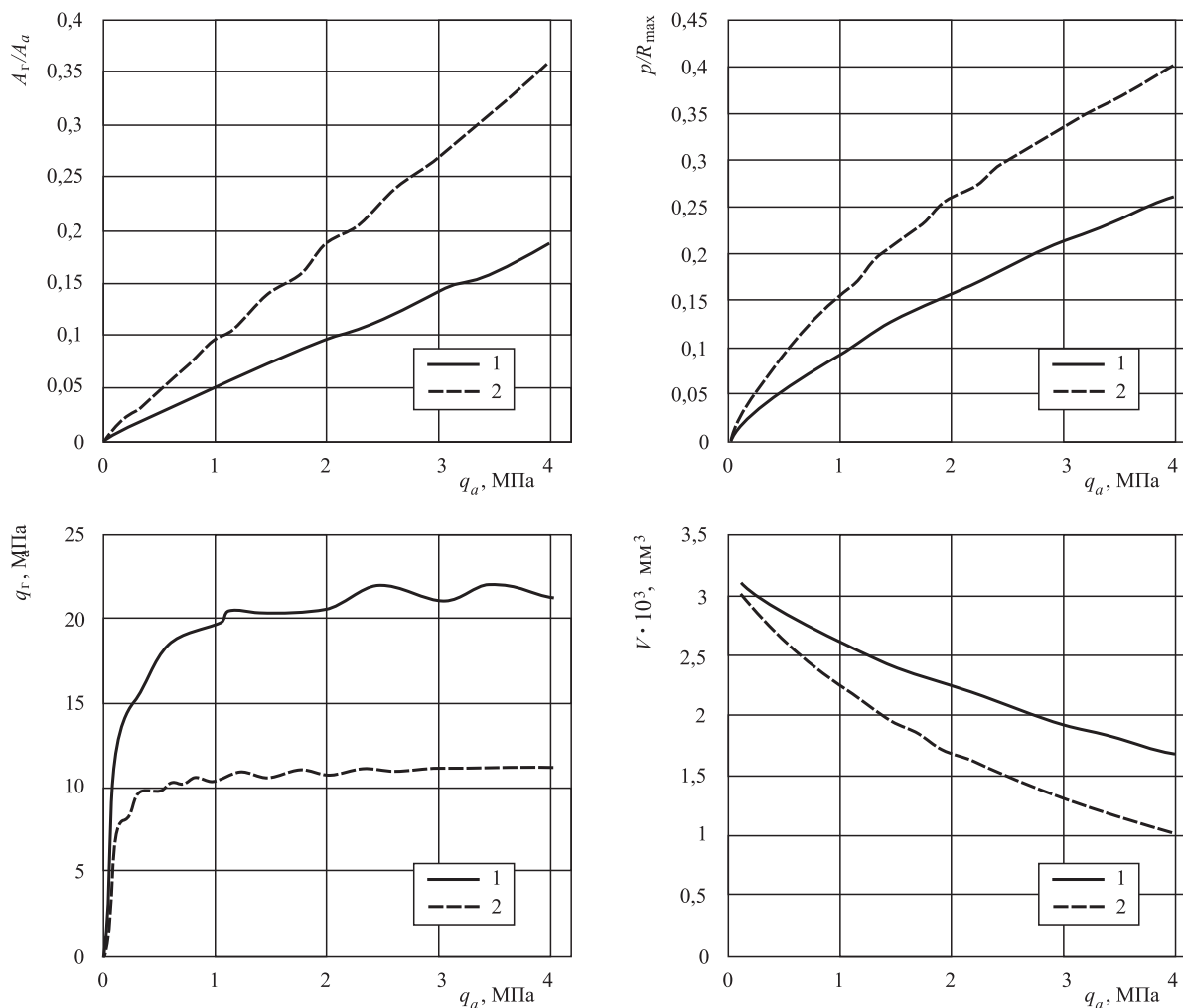


Рис. 7. Влияние номинального давления q_a на характеристики контакта:

1 — при температуре 20 °С; 2 — при температуре 100 °С

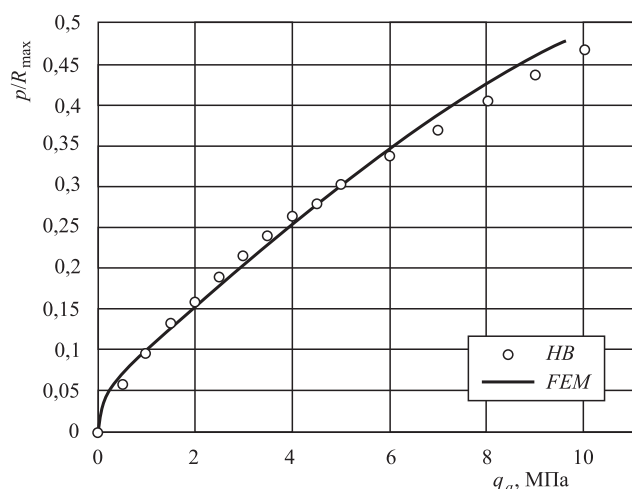


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования с методом конечных элементов

при соответствующих температурах. Это можно объяснить тем обстоятельством, что с этого момента много отдельных пятен контакта уже находятся в состоянии пластической деформации и хотя постепенно новые выступы входят в контакт, фактическое максимальное давление изменяется мало. Только увеличивается площадь выступов с максимальным давлением на контакте. С увеличением номинального давления сближение увеличивается и объем зазора уменьшается.

Для проверки достоверности разработанной имитационной модели было проведено моделирование напряженно-деформированного состояния контакта методом конечных элементов.

Моделирование проводилось с использованием программы APDL(ANSYS). На рис. 8 представлены зависимости отношения p/R_{\max} от номинального давления при 20 °С, где p — сближение. Сплошной линией показан результат расчета по МКЭ; круглыми точками — результат моделирования с условием, когда критерием перехода от упругой к пластической деформации является твердость HB рассматриваемого материала. Из рис. 8 следует, что результат моделирования с использованием HB в качестве критерия перехода от упругой деформации к пластической дает результаты, близкие результатам расчета по МКЭ (FEM).

Заключение. Предложенная модель позволяет учесть особенности микрогеометрии поверхности при использовании стандартных характеристик шероховатости поверхности и отражает характер сближения шероховатых поверхностей и характер распределения давления по микронеровностям

при различных температурах. Такая модель контактирования фрикционных материалов может использоваться для оценки нагрузок также температур на фактических площадках контакта, при сопоставлении результатов лабораторных и натуральных испытаний фрикционных устройств подъемно-транспортных машин.

В дальнейшем модель предполагается использовать для расчета температур, возникающих при сухом трении в зоне фактического контакта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Трение**, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. — М.: Машиностроение. — 1978. — 400 с.
2. **Теоретические** основы проектирования и эксплуатации автотормозов / В. М. Казаринов, В. Т. Иноземцев, В. Ф. Ясенцев. — М.: Транспорт. — 1968. — 400 с.
3. **Основы** трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.; под ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение. — 2001. — 664 с.
4. **Механика** и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. Н. Б. Демкина. — Тверь: ТГТУ. — 2006. — 232 с.
5. **Полимеры** в узлах трения машин и приборов: Справочник / А. В. Чичинадзе, А. Л. Левин, М. М. Бородулин, Е. В. Зиновьев; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение. — 1988. — 328 с.
6. **Расчет** фрикционных тормозов / Л. М. Пыжевич. — М.: Машиностроение. — 1964. — 228 с.
7. **Проектирование** авиационных колес и тормозных систем / И. И. Зверев, С. С. Коконин. — М.: Машиностроение. — 1973. — 224 с.
8. **Расчет** и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. — М.: Наука. — 1967. — 232 с.
9. **Основы** расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
10. **Журавлев В. А.** К вопросу о теоретическом обосновании закона Амонтова—Кулона для трения несмазанных поверхностей // Журнал технической физики. — 1940. — Т. 10. — Вып. 17. — 1447 с.
11. **Крагельский И. В.** Влияние различных параметров на величину коэффициента трения несмазанных поверхностей // Журнал технической физики, 1943. — Вып. 3. — Т. XIII. — С. 145—151.
12. **Демкин Н. Б.** Упругое контактирование шероховатых поверхностей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 1959. — № 6. — С. 44—51.

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС

13. **Lodge A. S., Howell H. G.** Friction of Elastic Solid // Proc. Phys. Soc. — 1954. — Vol. 67. — No. 410. — Ser. B. — P. 89—97.
14. **Lincoln B.** Elastic Deformation and the Laws of Friction // Nature. — 1953. — Vol. 172. — P. 169.
15. **Ling F. F.** On Asperity Distributions of Metallic Surfaces // J. Appl. Phys. — 1958. — Vol. 29. — No. 8. — P. 1168—1174.
16. **Hisakado T.** On the Mechanism of Contact between Solid Surfaces (4th report). Surface Roughness Effect on Dry Friction // Bull. JSME. — 1970. — Vol. 13. — No. 55. — P. 129—139.
17. **Рыжов Э. В.** Технологическое управление геометрическими параметрами контактирующих поверхностей // В кн.: Расчетные методы оценки трения и износа. Брянск, Приокское книжное издательство, 1975. — С. 98—138.
18. **Greenwood J. A., Williamson B. P.** Contact of nominally flat surfaces // Proceedings of Royal Society. — 1965. — Vol. 295. — No. 1442. — P. 300—319.
19. **Manjundar C. J. Tien.** Fractal Characterization and Simulation of Rough Surfaces // Wear. — 1990. — Vol. 136. — P. 313—327.
20. **Mulvaney D. J., Newland D. E., Gill K. F.** A Complete Description of Surface Texture Profiles // Wear. — 1989. — Vol. 132. — P. 173—182.
21. **Аксенова О. А.** Фрактальное моделирование шероховатой поверхности при аэродинамическом расчете в разреженном газе // В кн. Аэродинамика. — СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета. — 2000. — С. 120—129.
22. **Справочник** по триботехнике. В 3-х т. Т. 3. Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение. — 1992. — 730 с.
23. **Numerical Analysis** / R. L. Burden, J. D. Faires. Publisher: Brooks/Cole, 2011. — 872 p.
24. **Основы** вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. — М.: Наука, 1970. — 664 с.
25. **Численные** методы / А. А. Самарский, А. В. Гулин. — М.: Наука, 1989. — 432 с.
26. **Качество** поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. — М.: Машиностроение, 1981. — 244 с.

ИЗДАТЕЛЬСТВО

"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

принимает подписку на журнал

"ГРУЗОВИК"

ТРАНСПОРТНЫЙ КОМПЛЕКС. СПЕЦТЕХНИКА

на 2021 год

Подписавшись в издательстве, вы:

- 1) получаете без задержек журнал с первого номера;
- 2) экономите на стоимости почтовой доставки;
- 3) получаете скидку до 5 %.

Наши реквизиты:

E-mail: realiz@mashin.ru

Тел.: 8 (495) 785-60-69.

Отдел продаж, маркетинга, рекламы

WWW.MASHIN.RU

А. В. Попов, ст. преподаватель, Волжский политехнический институт (филиал ВолГТУ), г. Волжский, e-mail: alexandrus238@yandex.ru, **Р. О. Соколов**, аспирант, Институт мозга человека им. Н. П. Бехтеревой, г. Санкт-Петербург, e-mail: sokolovrol34@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ УТОМЛЕНИЯ СРЕДИ ВОДИТЕЛЕЙ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В статье приводятся результаты исследования, проведенного авторами. Установлено, что большое количество водителей грузовых автомобилей испытывали сильную сонливость при работе, имели место случаи кратковременного засыпания за рулем в предшествующий период. Основная причина сонливости — слишком долгая продолжительность работы. Подавляющее большинство опрошенных заявили, что им приходилось работать более 8 часов в предшествующий период. Большинство опрошенных считают необходимым наличие устройства для контроля состояния водителя, наиболее предпочтительным датчиком является выполненный в виде браслета и звуковой сигнал в качестве предупреждения. Значительное количество опрошенных имеют симптомы, свидетельствующие о риске возникновения СОАС.

Ключевые слова: водитель, утомление, грузовой автомобиль, дорожно-транспортное происшествие.

The article presents the results of the research conducted by the authors. It was found that a large number of truck drivers experienced severe drowsiness at work, there were cases of short-term falling asleep at the wheel in the previous period. The main reason for sleepiness is too long work hours. The vast majority of respondents stated that they had worked more than 8 hours in the previous period. The majority of respondents consider it necessary to have a device for monitoring the driver's condition, the most preferred sensor is made in the form of a bracelet and an audible signal as a warning. A significant number of respondents have symptoms that indicate a risk of OSA.

Keywords: driver, fatigue, truck, traffic accident.

Управление автомобилем в утомленном состоянии является причиной 10...30 % всех дорожно-транспортных происшествий и одной из основных причин несчастных случаев со смертельным исходом. Важность засыпания за рулем как причины ДТП в значительной степени недооценивается в опубликованной официальной статистике, где она составляет лишь около 1...3 % всех несчастных случаев [19]. За последние два десятилетия большое число исследований по частоте засыпания за рулем в различных странах дали оценки, варьирующиеся между 20 и 57 % [8]. Согласно данным Национальной Администрации Безопасности Дорожного Движения США 2,5 % аварий со смертельным исходом и 2,0 % всех аварий с несмертельными травмами связаны с утомлением во время вождения [15]. Это свидетельствует о необходимости проведения исследований, которые повысят осведомленность о данном вопросе в России.

Утомление — это закономерный процесс временного снижения работоспособности, наступа-

ющий в результате деятельности. Иностранная научная литература отражает широкий спектр определений, связанных с концепцией утомления. Общим понятийным определением является состояние сонливости, вызванной недостаточным количеством или качеством сна [1, 9, 18]. В некоторых исследованиях выделяются определенные уровни утомления. Например, при определении утомления методом анализа видео лица водителя установлены следующие уровни: бодрый (голова остается в вертикальном положении, а мимика разнообразна, водитель активно воспринимает информацию из окружающей среды, глаза широко открываются и быстро моргают, а глазные яблоки активно двигаются), сонный (внимание к внешней среде снижается, водитель трогает лицо, качает головой, сглатывает, вздыхает, глубоко дышит и зевает, глаза имеют тенденцию закрываться, медленно моргать, активность глазного яблока снижена), очень сонный (глаза закрываются сильнее и на большее время, веки становятся тяжелее,

водитель может задремать, кивнуть, наклонить голову, а затем потерять способность управлять автомобилем) [10].

Чаще всего утомление понимают как двухфакторное понятие, связанное как с физическими, так и с когнитивными аспектами [17]. Многие описывают утомление как многомерное понятие, включающее физический, умственный и эмоциональный компоненты [14]. Эмоциональная составляющая имеет огромное влияние на общее утомление. Проявления эмоционального утомления включают эмоциональное истощение и снижение мотивации. Таким образом, эмоциональная составляющая утомления влияет на осведомленность об окружающей среде и на процесс принятия решений. Риски безопасности могут восприниматься ниже, чем они есть в действительности [20]. Физические изменения, вызванные утомлением, могут происходить ближе к состоянию сна. Проявления утомления, вытекающие из истощения физиологических ресурсов, могут включать снижение активности движения глаз, активности мозга и мышечных реакций [5]. Умственное утомление возникает при продолжительной и интенсивной умственной работе [11]. Атрибуты умственного утомления включают нарушение бдительности [4], концентрации и внимания [7], ухудшая получение данных из окружающей среды. Таким образом, умственное утомление снижает способность быстро обрабатывать ситуационные данные и принимать безопасные решения [16]. Длительная бессонница, недосыпание и недостаточное восстановление после предыдущей работы часто были определены как предшественники к физическому и умственному утомлению [13].

Чувствуя сонливость, водитель может бороться со сном, но он должен знать, что засыпание может наступить внезапно. Это создает очень серьезную угрозу для безопасности дорожного движения. Внезапное засыпание иногда приводит к тому, что сон, который видит водитель, принимается им за реальность. Так, известны случаи, когда водитель внезапно засыпал за рулем и во сне видел неожиданно появившееся препятствие на дороге (человека, собаку и др.); при быстром пробуждении, принимая сон за реальность, он резко тормозил или поворачивал рулевое колесо, что приводило к ДТП. Показаниями пассажиров и других водителей устанавливалось, что никаких препятствий на дороге в это время не было.

Сонливость водителя может появиться не только при утомлении, но и в монотонной обстановке.

Однообразный ландшафт окружающей местности, движение с постоянной скоростью, монотонный шум двигателя вызывают заторможенное состояние, которое иногда называют дорожным гипнозом, ступором или сонным опьянением. При этом возникает сонливость, вялость, апатия, появляются отвлеченные мысли и представления, не имеющие никакого отношения к управлению автомобилем, резко снижается готовность к действиям при неожиданном изменении дорожной обстановки. По зарубежным данным, заторможенному состоянию в сильной степени подвержены 23 % водителей, в легкой степени — 74 % и лишь 3 % водителей такого состояния не испытывают. Важной особенностью является тот факт, что водители продолжают движение, несмотря на то что чувствовали сонливость. Этот вывод может указывать на отсутствие знаний по учету рисков, связанных с сонливостью во время вождения [8].

Одной из основных причин, из-за которых водитель в течение дня может испытывать чрезмерную сонливость и затруднения с концентрацией внимания является Синдром обструктивного апноэ сна (СОАС). Важность нарушений сна в контексте безопасности дорожного движения официально была признана созданием рабочей группы Европейской Комиссии. Эта рабочая группа подготовила доклад, содержащий рекомендации относительно предоставления водительской лицензии для пациентов с установленным СОАС, на основании которого была принята соответствующая директива Евросоюза. Водительские удостоверения могут выдаваться водителям с умеренным или тяжелым синдромом обструктивного апноэ сна только при надлежащем контроле за их состоянием, подтвержденным медицинским заключением. Водители с умеренным или сильным СОАС подлежат периодическому медицинскому обследованию, не реже 1 раза в 3 года для водителей некоммерческих автомобилей и 1 раз в год для водителей коммерческих автомобилей, с целью установления уровня соответствия лечения и необходимости продолжения лечения [3]. В России, к сожалению, обследованию водителей на наличие признаков СОАС не уделяется должное внимание. Ввиду значительного количества дорожно-транспортных происшествий, вызванных утомлением водителя и отсутствия масштабных исследований по данному вопросу в РФ, поставлена цель исследовать проявления утомления среди водителей грузовых автомобилей. В рамках реализации данной цели требуется провести анкетный

БЕЗОПАСНОСТЬ

опрос водителей и проанализировать полученные результаты.

В ноябре 2019 г. был подготовлен вопросник для исследования проявлений утомления среди водителей. Необходимо было получить следующую основную информацию: возраст и ежемесячное расстояние движения; недавняя история засыпания за рулем оценивалась через вопросы: Были ли у Вас случаи кратковременного засыпания за рулем за последние 2 года? Случались ли у Вас ДТП из-за утомленного состояния? Чувствовали ли Вы сильную сонливость при управлении транспортным средством за последние 30 дней? Чувствовали ли Вы сильную сонливость при управлении транспортным средством за последние 7 дней? Далее респондентам предлагалось выбрать предполагаемую причину утомленного состояния и ответить на вопрос о соблюдении режима труда и отдыха. Водителям было предложено указать, считают ли они необходимым наличие дополнительного устройства для контроля утомленного состояния, предпочтительный вид датчика для его определения и вид сигнала об опасном состоянии. В вопросник были включены вопросы относительно риска возникновения СОАС.

В ноябре—декабре 2019 г. и январе—феврале 2020 г. проводился опрос граждан РФ, имеющих водительское удостоверение, опыт управления транспортным средством и работающих на грузовых автомобилях, в разных регионах страны (Волгоградская обл., Краснодарский край, Ростовская обл., Москва и др.). Всего опрошено 100 человек. Применялся непосредственный опрос, проводимый силами студентов ВПИ (филиал) ВолгГТУ. Также использовалась платформа <https://docs.google.com/forms>, ссылка на анкету размещалась

в наиболее активных сообществах водителей в социальных сетях "Вконтакте" и "Facebook".

По возрасту опрошенные водители распределились следующим образом: более 50 лет — 2 % респондентов, от 35 до 50 — 18 %, от 18 до 25 лет — 42 %, от 25 до 35 лет — 38 %. Километраж за месяц: 17 % — более 20 000 км, 24 % — менее 10 000, 59 % — от 10 000 до 20 000. Распределение ответов на вопросы об утомленном состоянии представлено в табл. 1.

Причинами сонливости в процессе управления транспортным средством названы: прием лекарств, доля опрошенных составила 2 %; учеба, доля опрошенных составила 2 %; сдвиги графика и долгая поездка, доля опрошенных составила 2 %; постоянный плохой сон, доля опрошенных составила 9 %; плохой сон в предыдущую ночь, доля опрошенных составила 24 %; нахождение слишком долго за рулем, доля опрошенных составила 45 %.

Большинство опрошенных — 45 % — считают, что предпочли бы звуковой сигнал при обнаружении усталости, 11 % — холод в область головы, 11 % — вибрацию, 29 % — небольшой электро-разряд и 4 % — световой сигнал (рис. 1). По данным зарубежных исследований, большинство водителей также предпочитает в качестве сигналов в кабине звуковое оповещение, а не визуальное или вибрационное [12]. Кроме того, для оповещения о скором наступлении критического состояния большинство водителей предпочитает сигнал в кабине в сочетании с сообщением от диспетчера [6]. Виды датчиков, предпочитаемые водителями, представлены на рис. 2.

Таким образом, можно говорить о том, что достаточно большое количество водителей грузовых автомобилей испытывали сильную сонливость

Таблица 1

Распределение ответов на вопросы об утомленном состоянии

Вопрос	Да	Нет
Были ли у Вас случаи кратковременного засыпания за рулем за последние 2 года?	44 %	56 %
Случались ли у Вас ДТП из-за утомленного состояния?	9 %	91 %
Чувствовали ли Вы сильную сонливость при управлении транспортным средством за последние 30 дней?	69 %	31 %
Распределение ответов на вопрос «Чувствовали ли Вы сильную сонливость при управлении транспортным средством за последние 7 дней?»	39 %	61 %
Приходилось ли вам работать более 8 ч за последние 30 дней?	93 %	7 %
Как Вы считаете, необходимо ли устройство для контроля состояния водителя?	67 %	33 %

БЕЗОПАСНОСТЬ

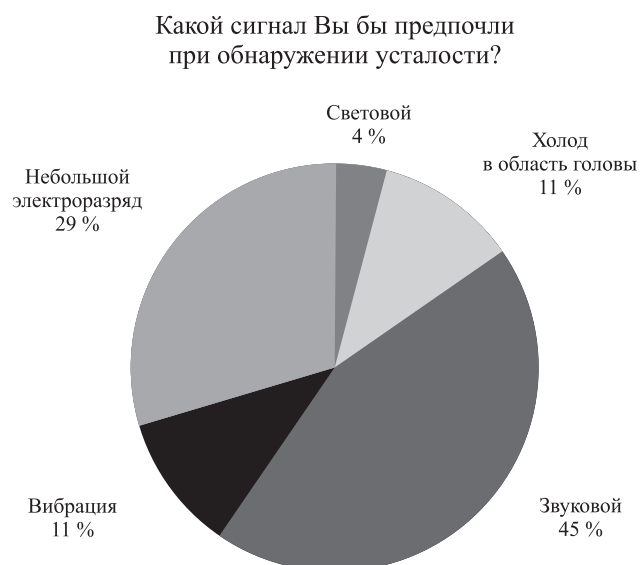


Рис. 1. Распределение ответов на вопрос "Какой сигнал вы бы предпочли при обнаружении усталости?"

при работе, имели место случаи кратковременного засыпания за рулем в предшествующий период. Основная причина сонливости — слишком долгая продолжительность работы. Подавляющее большинство опрошенных заявили, что им приходилось работать более 8 ч в предшествующий период. Большинство опрошенных считают необходимым наличие устройства для контроля состояния водителя, наиболее предпочтительным датчиком является выполненный в виде браслета и звуковой сигнал в качестве предупреждения. Можно сделать вывод, что значительное количество опрошенных имеют симптомы, свидетельствующие о риске возникновения СОАС. Нет оснований считать, что данная проблема распространена в России меньше, чем в других странах, где проводятся регулярные обследования водителей на наличие СОАС.



Рис. 2. Распределение ответов на вопрос "Какой вид датчика вы бы предпочли для определения усталости?"

Для снижения количества ДТП по причине утомления водителя, опираясь на опыт европейских стран, рациональным видится принятие ряда мер.

1. Введение государственной статистики общего количества ДТП, погибших и раненых в подобных происшествиях, с особым акцентом на утомление водителя как первоочередную причину.

2. Проведение просветительской работы среди водителей, начиная с этапа подготовки в автошколе по вопросу важности соблюдения режима труда и отдыха и более серьезного отношения к своему состоянию при управлении автомобилем (проведение тематических лекций с демонстрацией наглядных материалов о результатах ДТП, издание и распространение печатных материалов по данной тематике).

3. Включение идентификации медицинских состояний, вызывающих сонливость в обязатель-

Таблица 2

Распределение ответов на вопросы о проявлениях СОАС

Вопрос	Да	Нет
Вы храпите громко (достаточно, чтобы быть услышанным через закрытые двери)?	13 %	87 %
Часто ли чувствуете усталость или сонливость в дневное время?	49 %	51 %
Кто-нибудь замечал, что вы переставали дышать во время сна?	9 %	91 %
У Вас бывает высокое давление?	38 %	62 %
Есть ли у Вас проблемы с избыточным весом?	22 %	78 %
Окружность шеи более 40 см?	9 %	91 %

ный медицинский осмотр при получении (замене) водительского удостоверения. Обязательность подобного обследования для профессиональных водителей не реже 1 раза в год.

4. Проведение научных исследований для выявления новых решений и мониторинга инновационных методов определения усталости по всему миру для дальнейшего использования в РФ.

5. Усиление контроля за соблюдением режима труда и отдыха водителей на транспортных предприятиях и предпринимателями-перевозчиками.

6. Использование приборов (систем) определения усталости водителя. Это является особенно актуальным при длительных междугородних рейсах и перевозке детей.

7. Разработка мер поощрения предприятий и предпринимателей за четкое соблюдение режимов труда и отдыха и установку оборудования контроля утомления водителя (например, отмена или снижение транспортного налога, взносов через систему "Платон").

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Baulk S. D., & Fletcher A.** At home and away: Measuring the sleep of Australian truck drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 45(Suppl.), 36—40. DOI:10.1016/j.aap.2011.09.023.
2. **Chung F., Yegneswaran B., Liao P.** et al. Validation of the Berlin Questionnaire and American Society of Anesthesiologists checklist as screening tools for obstructive sleep apnea in surgical patients. *Anesthesiology*. — 2008; 108 (5): 822—830.
3. **Commission Directive 2014/85/EU** of 1 July 2014, amending Directive 2006/126/EC of the European Parliament and of the Council on driving licences. *Official J. Eur. Union*, 2.7.2014.
4. **Dorrian J., Sweeney M., & Dawson D.** Modeling fatigue-related truck accidents: Prior sleep duration, recency and continuity. *Sleep and Biological Rhythms*, 9, 3—11. DOI:10.1111/j.1479-8425.2010.00477.x.
5. **Feng J., & Guiming H.** Real-time eye detection and tracking under various light conditions. *Data Science Journal*, 6, 636—640. DOI:10.2481/dsj.6.S636-S640.
6. **Fitzharris M., Liu S., Stephens A. N., & Lenné M. G.** The relative importance of real-time in-cab and external feedback in managing fatigue in real-world commercial transport operations. *Traffic Injury Prevention*, 18(sup1), S71—S78. DOI:10.1080/15389588.2017.1306855.
7. **Friswell R. & Williamson A.** Exploratory study of fatigue in light and short haul transport drivers in NSW, Australia. *Accident Analysis & Prevention*, 40(1), 410—417. DOI:10.1016/j.aap.2007.07.009.
8. **Sleepiness at the wheel across Europe: a survey of 19 countries / M. Gonçalves, R. Amici, R. Lucas, T. Åkerstedt, F. Cirignotta, J. Horne // Journal of Sleep Research, 24(3), 242—253. DOI:10.1111/jsr.12267.**
9. **Understanding** the role of sleep quality and sleep duration in commercial driving safety / M. K. Lemke, Y. Apostolopoulos, A. Hege, S. Sönmez, & L. Wideman // *Accident Analysis & Prevention*, 97, 79—86. DOI:10.1016/j.aap.2016.08.024.
10. **Li Z., Chen L., Peng J., & Wu Y.** Automatic Detection of Driver Fatigue Using Driving Operation Information for Transportation Safety. *Sensors*, 17(6), 1212. DOI:10.3390/s17061212.
11. **Mathisen G. E., & Bergh L. I. V.** Action errors and rule violations at offshore oil rigs: The role of engagement, emotional exhaustion and health complaints. *Safety Science*, 85, 130—138. DOI:10.1016/j.ssci.2016.01.008.
12. **Designing** Fatigue Warning Systems: The perspective of professional drivers / F. Meng, S. Li, L. Cao, Q. Peng, M. Li, C. Wang, & W. Zhang // *Applied Ergonomics*, 53, 122—130. DOI:10.1016/j.apergo.2015.08.003.
13. **Meuleners L., Fraser M. L., Govorko M. H., & Stevenson M. R.** Determinants of the occupational environment and heavy vehicle crashes in Western Australia: A case-control study. *Accident Analysis & Prevention*, 99, 452—458. DOI:10.1016/j.aap.2015.11.023.
14. **Morgan J. I., Jones F. A., & Harris P. R.** Direct and indirect effects of mood on risk decision making in safety-critical workers. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 472—482. DOI:10.1016/j.aap.2012.05.026.
15. **National Highway Traffic Safety Administration.** Traffic safety facts crash stats: drowsy driving. Washington, DC: US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration; 2011. <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/811449> (дата обращения 04.03.2019).
16. **Evaluation** of 3D cognitive fatigue using heart-brain synchronization / S. Park, M. JuWon, E. ChulLee, S. Mun, & M. Whang // *International Journal of Psychophysiology*, 97, 120—130. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2015.04.006
17. **Sabir A. A., & Isha A. S. N. B.** Assessing the fatigue related psychological risk factors among oil and gas tankers drivers in Malaysia. *International Review of Management and Marketing*, 6, 138—142.
18. **Naturalistic** field study of the restart break in US commercial motor vehicle drivers: Truck driving, sleep, and fatigue / A. R. Sparrow, D. J. Mollicone, K. Kan, R. Bartels, B. C. Satterfield, S. M. Riedy, H. P. A. Van Dongen // *Accident Analysis & Prevention*, 93, 55—64. DOI:10.1016/j.aap.2016.04.019.
19. **Data** and methods for studying commercial motor vehicle driver fatigue, highway safety and long-term driver health / H. S. Stern, D. Blower, M. L. Cohen, C. A. Czeisler, D. F. Dinges, J. B. Greenhouse, ... D. H. Wegman // *Accident Analysis & Prevention*. DOI:10.1016/j.aap.2018.02.021.
20. **Welp A., Meier L. L., & Manser T.** Emotional exhaustion and workload predict clinician-rated and objective patient safety. *Frontiers in Psychology*, 2015, 5, 1—13. DOI:10.3389/fpsyg.2014.01573.

Д. С. Аликин, аспирант, Д. В. Головин, аспирант, М. Ю. Петухов, канд. техн. наук, доцент, e-mail: pmu@pstu.ru, А. М. Щелудяков, канд. техн. наук, e-mail: sam@pstu.ru, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), г. Пермь

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОПЕРЕЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БОЛИДА "ФОРМУЛА СТУДЕНТ" ПНИПУ

В настоящее время в мире активно набирают популярность автоспортивные соревнования класса "Формула Студент". Данные соревнования проводятся исключительно для студенческих команд, целью которых являются разработка, сборка и испытания гоночных болидов. Соревнования подразделяются на статические и динамические дисциплины. Наиболее важную роль среди данных дисциплин играют динамические, в которые входят такие испытания, как тест на ускорение, маневренность, точность управления, гонка на выносливость и энергетическая эффективность. Основные задачи данных испытаний заключаются в прохождении различных видов поворотов и сложных участков трассы, ввиду этого для получения наилучших результатов необходимо выполнить данные испытания за кратчайший промежуток времени. Добиться требуемого результата возможно путем достижения наилучших динамических показателей болида. Одной из основных, решаемых при проектировании и изготовлении болида "Формула Студент", является задача проектирования стабилизаторов поперечной устойчивости.

Ключевые слова: болид "Формула Студент" ПНИПУ, задний и передний стабилизатор поперечной устойчивости, проектирование, расчет, эксплуатация.

Currently Formula Student Motorsport competitions are actively gaining popularity in the world. These competitions are held exclusively for student teams whose goal is to develop, build and test racing cars. Competitions are divided into static and dynamic disciplines. The most important role among these disciplines is played by dynamic ones, which include such tests as: acceleration test, maneuverability, control accuracy, endurance race and energy efficiency. The main tasks of these tests are to pass various types of turns and difficult sections of the route. therefore, to get the best results, it is necessary to complete these tests in the shortest possible time. It is possible to achieve the desired result by achieving the best dynamic performance of the car. One of these problems solved in the design and manufacture of the Formula Student car is the problem of designing cross-stability stabilizers.

Keywords: Car "Formula Student" PNRPU, rear and front stabilizer bar, design, calculation, operation.

Одной из задач при проектировании собственного болида команды "Формула Студент" ПНИПУ [1] явилась проблема проектирования подвески, позволяющей добиться наилучших показателей устойчивости и управляемости. Кроме этого, необходимо было произвести прочностный анализ спроектированных конструктивных элементов подвески для оценки их способности воспринимать возникающие нагрузки. Данная процедура позволит спрогнозировать и исключить возможность деформации и разрушения спроектированных элементов в условиях эксплуатации [2–6].

Актуальность рассматриваемого вопроса обусловлена необходимостью получения студента-

ми опыта по созданию своего гоночного болида, изучению отличительных особенностей спортивных автомобилей, а также знакомство с современными технологиями и последующим использованием их при работе над проектом [7–10].

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведен анализ компоновочных решений и конструкций элементов подвески болидов "Формула Студент" [11].

2. Проведен анализ и определены основные параметры подвески болида "Формула Студент" ПНИПУ [12].

3. Разработана кинематическая схема подвески болида "Формула Студент" ПНИПУ.

4. Определены усилия и нагрузки, возникающие при движении болида.

5. Разработаны 3D-модели элементов подвески болида согласно кинематической схеме.

6. Проведен прочностный проверочный расчет разработанных конструктивных элементов подвески болида "Формула Студент" ПНИПУ.

7. Разработана технология и способ изготовления элементов подвески.

В ходе выполнения текущих задач по проектированию болида разработаны модели стабилизаторов поперечной устойчивости, которые представлены на рис. 1 [13, 14].

Установка стабилизаторов поперечной устойчивости производится путем закрепления их на кронштейнах посредством болтового соединения. В свою очередь, сами кронштейны будут приварены на пространственной раме болида, место и способ установки представлены на рис. 2.

Математическое моделирование стабилизаторов поперечной устойчивости болида "Формула Студент" ПНИПУ. Перед началом изготовления спроектированных конструктивных элементов подвески болида "Формула Студент" ПНИПУ

проведен проверочный прочностный расчет, на основании которого оценена способность сопротивляться возникающим нагрузкам.

В качестве инструмента для проведения проверочного прочностного расчета спроектированных элементов подвески выбран программный продукт Ansys, включающий в себя модуль для механического анализа Ansys Mechanical. Данный модуль использован для задания граничных условий в виде закреплений, приложений нагрузок и перемещений, расчета и определения напряженно-деформированного состояния, а также вывода полученных результатов.

Для определения прочностных и жесткостных характеристик спроектированного стабилизатора поперечной устойчивости сформирована математическая модель его механического поведения. Данный переход осуществляется посредством ряда операций. В первую очередь осуществлялся импорт геометрической модели с ее последующим упрощением. Далее заданы механические характеристики телам модели, представляющие в модели элементы стабилизатора. Сформирована сетка конечных элементов, установлены граничные ус-

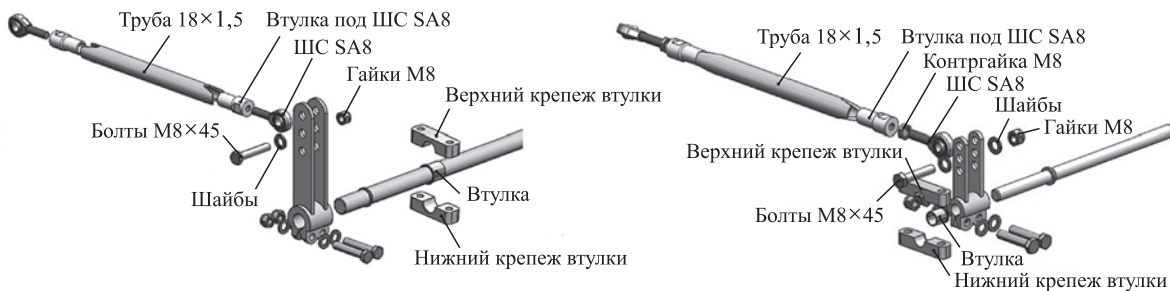


Рис. 1. Модели переднего и заднего стабилизаторов поперечной устойчивости

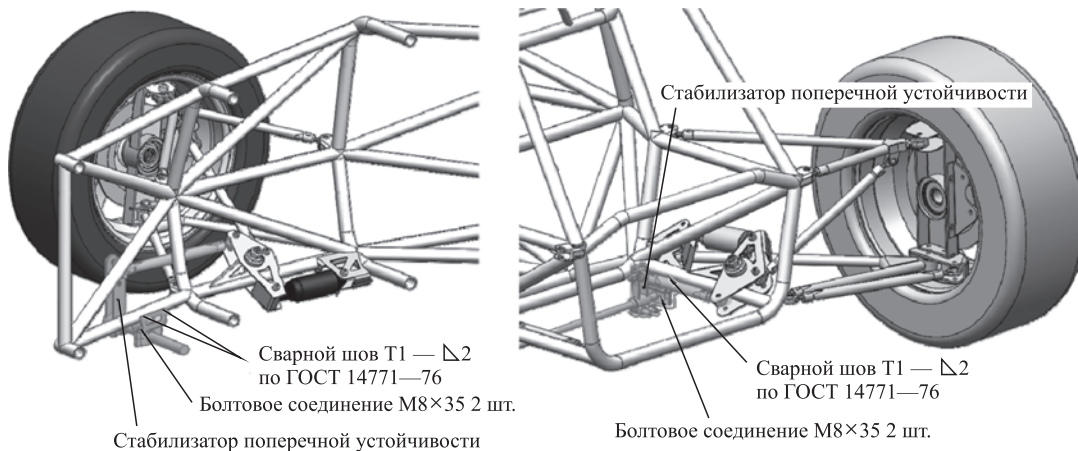


Рис. 2. Модели места и способов установки переднего и заднего стабилизаторов на раме болида

ловия, имитирующие эксплуатационные нагрузки при работе подвески. Осуществлен расчет, в результате которого определены величины напряжений и деформаций в спроектированном узле. Полученные значения напряжений сравниваются с предельно допустимыми, на основании чего определяется коэффициент запаса прочности конструкции.

Для расчетов использовалась упрощенная модель переднего стабилизатора поперечной устойчивости, представленная на рис. 3. Данная модель экспортирована из программы для трехмерного моделирования SolidWorks в геометрический редактор Design Modeler, применяемый в расчетном комплексе Ansys.

Для изготовления элементов стабилизатора применяются различные материалы. Так, торсион стабилизатора изготавливается из стали марки 65Г. Клеммы стабилизатора планируется изготовить из стали марки 30 ХГСА, а втулки крепления стабилизатора — из сплава бронзы марки БР-Б2Т. Данные материалы являются изотропными, а их упругое механическое поведение описывается такими характеристиками, как модуль упругости (E), коэффициент Пуассона (μ) и модуль сдвига (G). Прочность данных материалов при расчете будет оцениваться по показателю предела текучести ($\sigma_{0,2}$). В таблице приведены основные характеристики материалов, которые присваивались элементам конструкции в расчетной модели.

На основании геометрической модели осуществлялось создание сетки КЭ. Расчетная модель состоит из нескольких деталей, поэтому генерировалась совместная в узлах сетка КЭ в зонах контакта отдельных тел. Для создания сетки использовались четырехузловые тетраэдральные элементы типа Solid, данные элементы обладают шестью степенями свободы в каждом из узлов. При создании данной модели проведено исследование зависимости решения от плотности сетки.

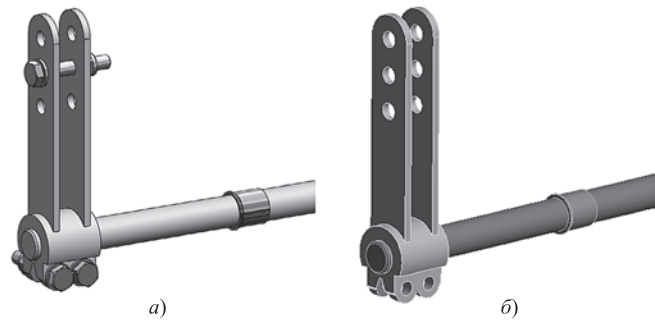


Рис. 3. Модель переднего стабилизатора поперечной устойчивости:

a — исходная модель; *б* — импортированная модель

Механические характеристики материалов

Материал	E , ГПа	μ	G , ГПа	$\sigma_{0,2}$
Сталь 65 Г	215	0,3	82,6	1790
Сталь 30 ХГСА	215	0,3	82,6	880
Бронзовый сплав БР-Б2Т	131	0,34	48,9	1350

Считается, что выбор оптимального размера ячейки КЭ завершен, в случае если при переходе к более плотной сетке результаты численного расчета количественно и качественно изменяются незначительно (для инженерных расчетов порядка 5 %). Исследование сходимости сетки КЭ осуществлялось для моделей с размерами элементов от 10 до 1 мм. На рис. 4 показана зависимость максимальных напряжений по Мизесу от размера конечного элемента в расчетной модели.

Таким образом, на основании графика сходимости сетки КЭ расчетной модели был выбран размер ячейки элемента, равный 3 мм. Количество КЭ в расчетной модели составило 350 тыс., а узлов — 536 тыс.



Рис. 4. График сходимости сетки КЭ

Расчет напряженно-деформированного состояния спроектированных конструктивных элементов осуществляется на основе метода конечных элементов (МКЭ) в форме перемещений. Механическое поведение рассчитываемых конструкций описывается линейной теорией упругости в матричной форме. Ниже в общем виде представлена матричная система (1), решение которой осуществляется в программном комплексе Ansys.

$$[K]\{u\} = \{F\}, \quad (1)$$

где $[K]$ — матрица жесткости; $\{u\}$ — матрица перемещений; $\{F\}$ — матрица усилий.

При нагружении стабилизатора в торсионном валу возникает изгиб с кручением, поэтому оценка прочности будет производиться по максимальным касательным напряжениям согласно III теории прочности (2), а также по критерию Мизеса — критерию удельной энергии изменения формы, при котором предельное значение деформации получает та часть детали, где потенциальная энергия максимальная вследствие изменения формы (IV теория прочности) (3).

$$k_{kas} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{\sigma_{0,2}} \leq 1, \quad (2)$$

$$k_{Mis} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} \leq 1, \quad (3)$$

где k_{kas} — коэффициент запаса прочности по максимальным касательным напряжениям; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести; k_{Mis} — коэффициент запаса прочности по Мизесу.

В качестве граничных условий задавалось ограничение перемещений втулок во всех направ-

лениях в области их креплений в кронштейнах рамы (4), а также максимальное закручивание плеча стабилизатора за счет заданных перемещений в отверстиях крепления тяги стабилизатора к плечам (5), взятым из кинематической схемы. На рис. 5 приведена схема граничных условий для расчетной модели переднего стабилизатора поперечной устойчивости.

$$U_x|_{\Gamma_1} = U_y|_{\Gamma_1} = U_z|_{\Gamma_1} = 0, \quad (4)$$

$$U_x|_{\Gamma_2} = 11 \text{ мм}. \quad (5)$$

В расчетной модели между плечами стабилизатора и торсионным валом задавались контактные условия типа Bonded, которые обеспечивали совместность закручивания и изгиба. В местах контакта втулок и торсионного вала задавались контактные условия типа No Separation, которые обеспечивали вращение торсионного вала во втулках.

В результате численного моделирования удалось определить напряженно-деформированное состояние передних и задних узлов стабилизаторов поперечной устойчивости. На рис. 6 продемонстрировано их деформированное состояние.

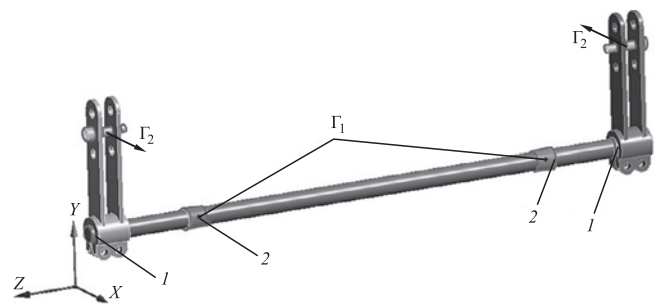


Рис. 5. Пример схемы граничных условий

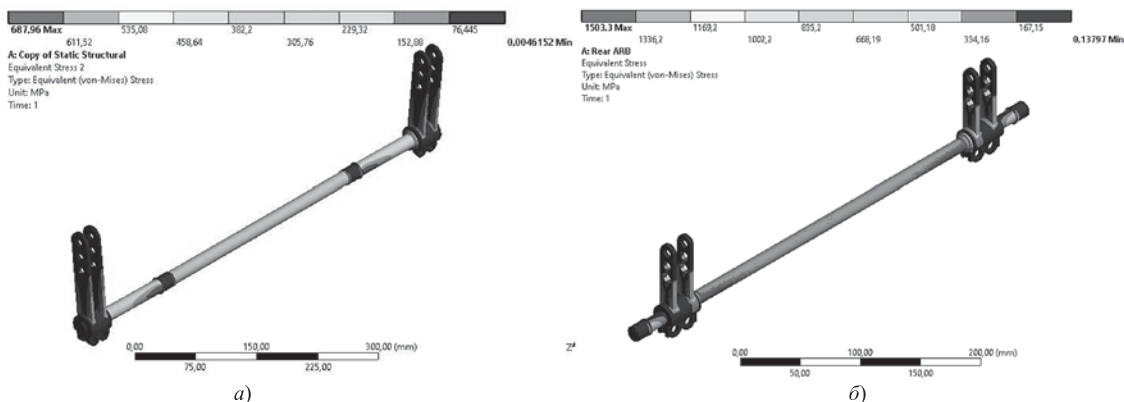


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в переднем (а) и заднем (б) стабилизаторах, МПа

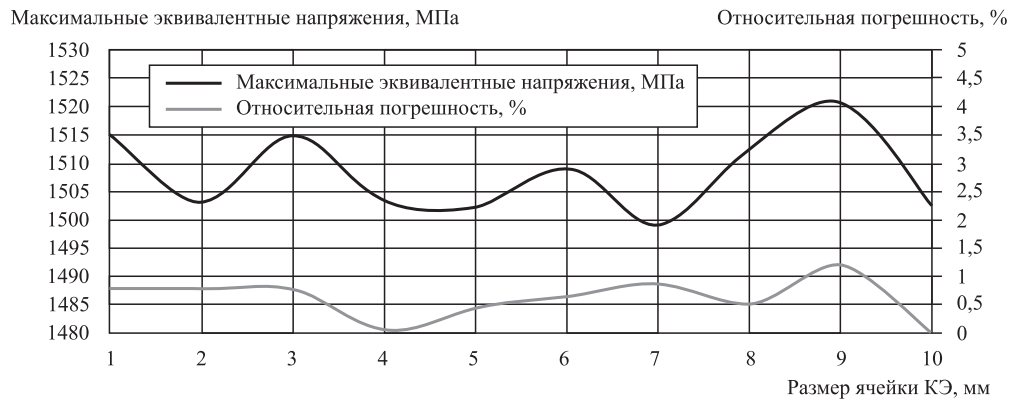


Рис. 7. График сходимости сетки КЭ

Помимо этого, были получены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу и максимальных касательных напряжений, возникающих в стабилизаторах поперечной устойчивости. Таким же образом получены распределения коэффициентов запаса прочности по критериям максимальных эквивалентных напряжений и максимальных касательных напряжений.

По результатам проведенного расчета получены следующие предельные значения напряжений, возникающих в торсионном валу: максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составляют 687,96 МПа, а максимальные касательные напряжения — 368,83 МПа. Данные напряжения возникают в местах контакта торсиона и втулок вследствие возникающего изгиба вала. Также были получены значения максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в плечах и втулках стабилизатора, они составляют 318,79 и 683,81 МПа. Полученные значения напряжений не превышают пределов текучести, представленных в таблице. Из этого следует, что в стабилизаторе поперечной устойчивости происходит упругая деформация всех его элементов. Минимальный коэффициент запаса прочности по критерию максимальных эквивалентных напряжений составляет 2,6, а по критерию максимальных касательных напряжений — 4,9.

Аналогичным образом произведен механический анализ заднего стабилизатора поперечной устойчивости. Исследование сходимости сетки КЭ осуществлялось для моделей с размерами элементов от 10 до 1 мм. На рис. 7 показана зависимость максимальных напряжений по Мизесу от размера конечного элемента в расчетной модели.

Таким образом, на основании графика сходимости сетки КЭ расчетной модели был выбран размер ячейки элемента, равный 4 мм. Количе-

ство КЭ в расчетной модели составило 85,5 тыс., а узлов — 139,5 тыс. На рис. 8 показан общий вид конечно-элементной модели заднего стабилизатора поперечной устойчивости.

Отличием в граничных условиях является другое значение максимальных перемещений (6) в месте креплений тяг стабилизатора, взятое из кинематического расчета задней подвески:

$$U_x|_{\Gamma_2} = 13 \text{ мм.} \quad (6)$$

При построении конечно-элементной сетки, представленной на рис. 8, получено 120 тыс. элементов и 195,5 тыс. узлов.

В результате численного моделирования удалось определить напряженно-деформированное состояние узлов рассматриваемых стабилизаторов

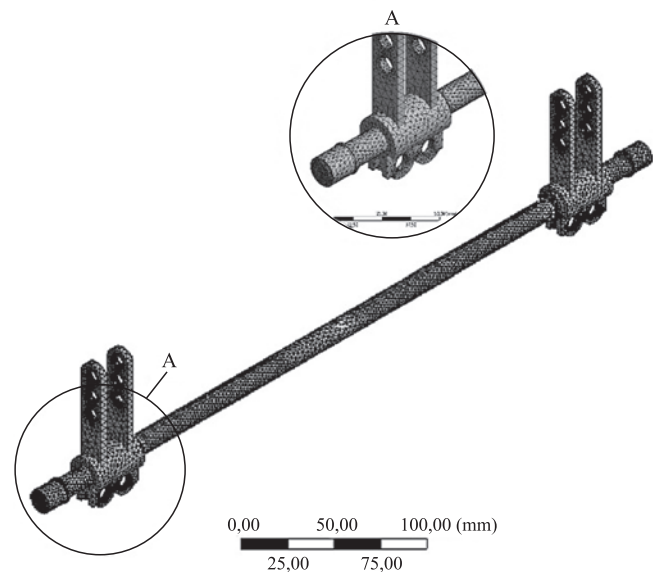


Рис. 8. Конечно-элементная сетка модели заднего стабилизатора поперечной устойчивости

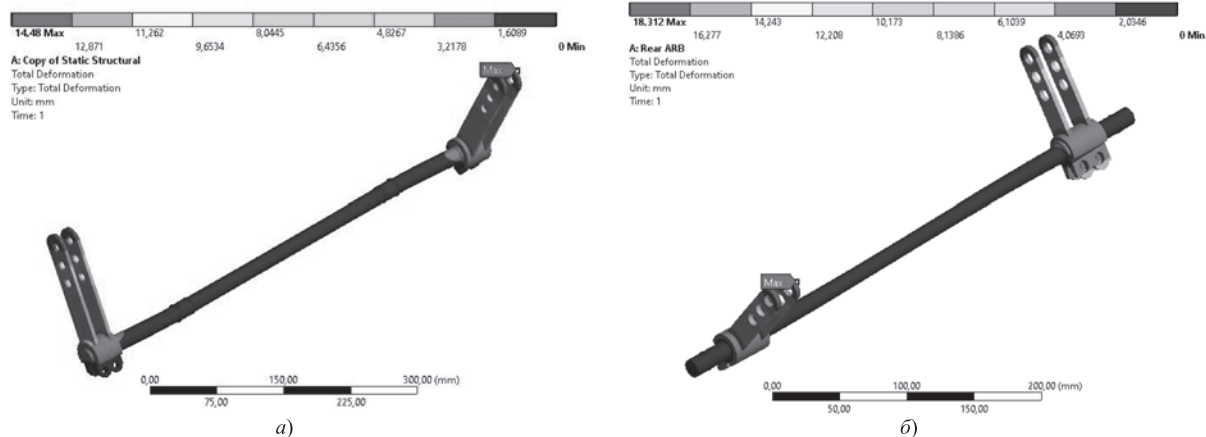


Рис. 9. Суммарные перемещения в переднем и заднем стабилизаторах:

а — передний; б — задний. Масштаб 10:1, мм

поперечной устойчивости. На рис. 9 продемонстрировано их деформированное состояние.

В результате были получены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу и максимальных касательных напряжений, возникающих в заднем стабилизаторе поперечной устойчивости. Таким же образом рассчитаны распределения коэффициентов запаса прочности по критериям максимальных эквивалентных напряжений и максимальных касательных напряжений.

По результатам проведенного расчета выявлены следующие предельные значения напряжений, возникающих в торсионном валу: максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составляют 1503,3 МПа, а максимальные касательные напряжения — 858,83 МПа. Данные напряжения появляются в месте галтели опорного буртика вала вследствие возникающего изгиба. Также были получены значения максимальных эквивалентных напряжений, возникающих в плечах и втулках стабилизатора, они составляют 678,72 и 587,04 МПа. Полученные значения напряжений не превышают пределов текучести. Из этого следует, что в стабилизаторе поперечной устойчивости происходит упругая деформация всех его элементов. Минимальный коэффициент запаса прочности по критерию максимальных эквивалентных напряжений составляет 1,19, а по критерию максимальных касательных напряжений — 2,08.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Formula Student Rules:** регламент соревнований. — 2019.
2. **Раймпель Й.** Шасси автомобиля / пер. В. П. Агапова; под ред. И. Н. Зверева. — М.: Машиностроение, 1983. — 356 с.
3. **Раймпель Й.** Шасси автомобиля: элементы подвески / пер. с нем. А. Л. Карпухина; под ред. Г. Г. Гридасова. — М.: Машиностроение, 1987. — 288 с.
4. **Раймпель Й.** Шасси автомобиля: амортизаторы, шины и колеса / пер. с нем. В. П. Агапова; под ред. О. Д. Златовратского. — М.: Машиностроение, 1986. — 320 с.
5. **Нарбут А. Н.** Автомобили. Рабочие процессы и расчет механизмов и систем. — М.: 2007. — 251 с.
6. **Литвиннов А. С., Фаробин Я. Е.** Автомобиль: теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов по специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство". — М.: Машиностроение, 1989. — 240 с.
7. **Орлов П. И.** Основы конструирования. 3 изд. — М.: Машиностроение, 1977. — 567 с.
8. **Trzesniowski M.** Rennwagentechnik Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. Mit 1228 Abbildungen. PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch. — 2010.
9. **Milliken William F., Milliken Douglas L.** Race car vehicle dynamics. — 1995. — 891 p.
10. **Formula SAE Interchangeable / Suspension Solutions Design team.** — 2009. — 96 p.
11. **Головин Д. В.** Выбор эффективных решений при проектировании болида "Формула Студент" // Международный научно-практический журнал. — 2017. — № 1. — С. 54—55.
12. **Бражкин А. В., Головин Д. В.** Выбор основных параметров подвески болида "Формула Студент" // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 1 (43). — С. 16—18.
13. **Theander A.** Design of a suspension for a Formula Student Race Car. — 2004. — 74 p.
14. **Roielle P. C. J. N.** Design of a Formula Student race car spring-damper system. — 2010. — 66 p.

ИНФОРМАЦИЯ

ВЫСТАВКИ • КОНФЕРЕНЦИИ • ПРЕЗЕНТАЦИИ

"МАГНИТ" И DRIVE ELECTRO ПРЕДСТАВИЛИ В МОСКВЕ ПЕРВЫЙ РОССИЙСКИЙ ЭЛЕКТРОГРУЗОВИК

Первый российский крупнотоннажный электрогрузовик MOSKVA передан вместе с зарядной станцией в опытную эксплуатацию розничной сети. Автомобиль создан Drive Electro, компанией-разработчиком батарей московского электробуса, электрогрузовик полностью спроектирован по требованиям компании "Магнит".

Транспорт приспособлен к особенностям российского климата, не создает шумового загрязнения, что особенно важно для комфорта жителей мегаполиса. При этом, по оценкам экологов компании "Магнит", снижение выбросов углекислого газа в атмосферу от одного электрогрузовика может составить почти 87 т в год. По данным производителя, за счет использования альтернативного вида энергии и низкой изнашиваемости основных узлов автомобиля стоимость владения электрогрузовиком за 10 лет будет ниже, чем традиционным на 20...25 %.

Снаряженная масса электрогрузовика MOSKVA аналогична дизельному такого же класса и составляет порядка 10 т, а максимальная грузоподъемность — 9 т, максимальная скорость — 110 км/ч, а запас хода — 200 км, что является одним из самых высоких показателей в мире среди аналогов. 40 % всех торговых точек "Магнит" в России расположены в радиусе 80 км от распределительных центров, поэтому запаса хода нового транспорта хватит на обеспечение свежей продукцией большого количества магазинов. В настоящее время у розничной сети в столице насчитывается около 600 точек разных форматов.



Зарядка электрогрузовика возможна в двух режимах: быстрая зарядка — 20 мин и ночная — 8 ч. Источником питания может стать обычная промышленная сеть напряжением 380 В. В дополнение ко всем техническим характеристикам автомобиль оснащен изотермическим фургоном и холодильной установкой для сохранения максимальной свежести продуктов, а также гидробортом грузоподъемностью 1500 кг.

"Магнит" будет эксплуатировать пилотный образец в тестовом режиме 6—12 месяцев и доставлять продукцию из собственного распределительного центра в Дмитрове в магазины сети в Москве. В случае успешного завершения тестовой эксплуатации компания примет решение о крупной поставке электрогрузовиков данной комплектации. На первом этапе потенциально это может быть до 200 автомобилей.

"Магнит" первым в России тестирует возможности электрогрузовика. "Мы рады, что задаем тренд на "зеленую" логистику в стране и апробируем альтернативные виды энергии для транспорта при дистрибуции товаров. Мы не только крупнейшая сеть в России по количеству магазинов, но и ведущий частный логистический оператор: наша инфраструктура включает 38 распределительных центров и более 5 тыс. собственных автомобилей. Мы придаем важное значение эффективности логистики и снижению ее воздействия на окружающую среду. Кроме электрогрузовика, мы начали использовать автомобили на газомоторном топливе и к концу года планируем перевести на этот вид энергии до 250 единиц транспорта", — прокомментировала член правления, директор по цепочкам поставок розничной сети "Магнит" Мария Дей.

"Сейчас мы видим большой спрос на электрогрузовики, многие мировые автобренды активно работают над своими пилотными образцами. Но дело не только в экологическом аспекте. Наше решение, включающее помимо электрогрузовика, еще и зарядную станцию и сервисное обслуживание, обойдется дешевле в пересчете на 10 лет эксплуатации, чем аналогичный комплекс для дизельной машины", — рассказал генеральный директор Drive Electro Сергей Иванов.

Пресс-служба ПАО "Магнит"

Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 05.11.2020. Подписано в печать 28.12.2020. Формат 60 × 88 1/8. Усл. печ. л. 5,88.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru