

DOI: [10.34220/2311-8873-2025-26-35](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2025-26-35)



УДК 629.21; 656.025.4

UDC 629.21; 656.025.4

2.9.5 – эксплуатация автомобильного транспорта

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА СТЕНДЕ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ
КОЛЁС КОРОБОК ПЕРЕДАЧ**

Лелиовский Константин Ярославич,
к.т.н., доцент, кафедра «Строительные и
дорожные машины», Нижегородский государ-
ственный технический университет им.
Алексеева, г. Нижний Новгород,
e-mail: kleliovskiy@mail.ru

Аннотация. В рамках данной статьи рассмат-
риваются вопросы, связанные с исследова-
нием проявления дефектов и эксплуатацион-
ных повреждений зубчатых колёс коробок пе-
редач транспортно-технологических машин.
Даны примеры графиков вибрационных спек-
тров, зарегистрированных в ходе стендовых
экспериментов. При этом исследовались ха-
рактеристики колебаний коробок передач,
возникающих при их работе в составе сило-
вых передач транспортных средств. Модели-
ровалось в ходе экспериментов присутствие
эксплуатационных повреждений и дефектов и
их отсутствие. Анализируется их вид и пред-
лагается вариант классификации привязки
производственных, технологических дефек-
тов и эксплуатационных повреждений к ча-
стотам спектров. Кроме того, проводилось
численное имитационное моделирование
наличия тех же дефектов, которые исследова-
лись в ходе стендовых экспериментов.

Ключевые слова: СПЕКТРЫ ВИБРАЦИЙ,
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС, КЛАССИФИКАЦИОН-
НЫЕ ТАБЛИЦЫ НЕИСПРАВНОСТЕЙ
КОРОБОК ПЕРЕДАЧ, ЭКСПРЕСС-ВИБРО-
ДИАГНОСТИРОВАНИЕ.

**DETERMINATION OF THE SPECTRAL
CHARACTERISTICS OF OPERATIONAL
DAMAGE TO GEARBOXES
ON THE STAND**

Leliovsky Konstantin Yaroslavich,
candidate of technical sciences, associate professor,
department of construction and road machinery,
Nizhny Novgorod state technical university named
after Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: kleliovskiy@mail.ru

Annotation. Within the framework of this article,
issues related to the study of the manifestation of
defects and operational damage to gears of gear-
boxes of transport and technological machines are
considered. Examples of graphs of vibration spec-
tra recorded during bench experiments are given.
At the same time, the characteristics of the vibra-
tions of gearboxes that occur during their opera-
tion as part of the power transmissions of vehicles
were studied. During the experiments, the pres-
ence of operational damages and defects and their
absence were modeled. Their type is analyzed and
a classification option is proposed for linking pro-
duction, technological defects and operational
damages to the frequencies of the spectra. In addi-
tion, numerical simulation of the presence of the
same defects that were investigated during the
bench experiments was carried out.

Keywords: VIBRATION SPECTRA, OPERA-
TIONAL DAMAGE TO GEARS, CLASSIFICA-
TION TABLES OF GEARBOX FAILURES,
EXPRESS VIBRATION DIAGNOSIS.

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Диагностирование технического состояния является частью технической эксплуатации транспортно-технологических машин. Для автотранспортной техники, эксплуатирующейся в тяжелых условиях, получение оперативной информации о ее техническом состоянии в экспресс-формате является важным. Это – одна из актуальных задач, решаемых в ходе эксплуатации. Его проведение даст возможность оперативно определять работоспособность машин и делать назначение на транспортную работу или отправлять в ремонт или обслуживание. Это, в свою очередь, обеспечит отсутствие безвозвратных потерь автотранспортной техники на линии.

Изучению вопросов технической эксплуатации транспортных средств, в том числе их технической диагностики посвящены работы Г.В. Крамаренко, В.И. Рассохи, И.Н. Аринина, А.П. Болдина, В.И. Крагодина, Р.Ф. Калимуллина, Е.С. Кузнецова и др. В их исследованиях диагностика рассматривается как необходимая мера по обеспечению работоспособности автотранспортной техники. Диагностирование зачастую предваряет техническое обслуживание или ремонт. Их трудоемкость определяется на основе диагностики. При эксплуатации транспортно-технологических машин в тяжелых условиях подобное технологическое решение труднореализуемо. На практике, в подобных условиях транспортные средства эксплуатируются либо до серьёзного отказа одного из основных агрегатов или систем, или до полного исчерпания ресурса. Это распространяется также и на агрегаты трансмиссии. Следовательно, в сложившейся ситуации своевременное диагностирование приобретает значимость. В таких условиях диагностика должна базироваться на косвенных методах. Методы вибродиагностики, рассматривающиеся в данной статье, являются одними из таких. В данной отрасли науки можно выделить работы таких учёных как М.Д. Генкин, А.Г. Соколова, Б.В. Павлов, Э.Л. Айрапетов и др.

2 Материалы и методы

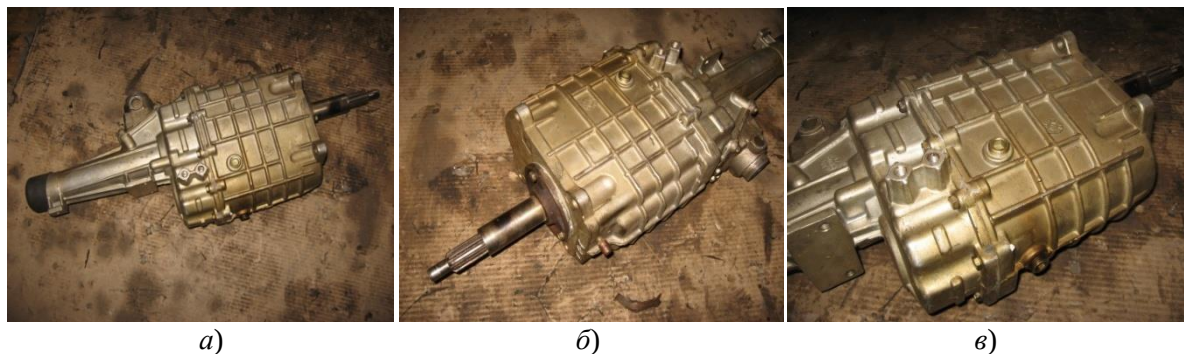


Рисунок 1 – Лабораторный испытательный стенд

Для формирования массива данных, в том числе тех, которые могут быть приняты за эталонные, целесообразно предварительно провести соответствующие исследовательские испытания. Они состоят в записи спектров вибрационных сигналов, снимаемых с исследуемых коробок передач. Таким способом был собран достаточный массив данных, а именно графиков вибрационных спектров, характерных для присутствия и прогрессирования эксплуатационных повреждений. Зубчатые колеса, являющиеся элементами конструкции объектов исследования, были в общем работоспособном состоянии, но в них имелись изучаемые эксплуатационные дефекты различных стадий, в том числе – критичных [1,2]. Эталонные спектры потребовались для последую-

щей быстрой постановки диагноза, которые необходимы при экспресс-диагностировании. Испытания рациональнее всего проводить в лаборатории, на силовом стенде, оснащённом гидравлическим тормозом – замедлителем (рис. 1). Особенностью стендов данной конструкции является обеспечение возможности создания переменной силовой нагрузки на шестерни изучаемых коробок передач (рис. 2), величины которой могут быть эквивалентными силам сопротивления дороги, по которой может двигаться машина в ходе выполнения транспортной работы. Поршневой двигатель, входящий в состав конструкции стенда, аналогичен применяемому на автотранспортной технике, трансмиссии которой являются объектами данного иссле-

дования. Из опыта проведения вибродиагностических испытаний известно, что сигналы, записываемые аппаратурой, установленной непосредственно на движущихся транспортных средствах по участкам местности, могут содержать в себе как нужную информацию, так и лишнюю, т.е. помехи. Это обстоятельство является общим недостатком метода вибродиагностики [3,4]. Наличие помех обуславливается возмущающим воздействием опорного основания, а также работой соседних агрегатов. Проведение виброизмерений в лабораторных условиях позволяют, до определенной степени, снизить влияние недостатков метода.



а – коробка передач с неизвестным техническим состоянием элементов; *б* – коробка передач, на которую устанавливались шестерни с различным техническим состоянием; *в* – подменная коробка передач, на которую при испытаниях устанавливались шестерни с различным техническим состоянием

Рисунок 2 – Исследуемые коробки передач

Методика испытаний предложена автором в [5]. Испытуемые зубчатые колёса приведены на рис. 3-5. Значения их изнашивания были предварительно установлены метрологически, в ходе соответствующих измерений. Согласно данным проведенных измерений был сделан вывод об удовлетворительном техническом состоянии зубчатых колес, внешний вид которых указан на photographиях. Подшипники опор валов пребывали в штатном техническом состоянии. Это было необходимо для исключения влияния их вибраций на результаты измерений. Шестерни коробки передач, приведённой на рис. 2,б, изначально установленные на её валах, были заменены указанными на рис. 3. После этого была проведена окончательная сборка и установка на моторный стенд. Затем были проведены испытательные мероприятия согласно принятой методике [9]. После них – обработка полученной диагностической информации. Её можно признать универсальной.

3 Результаты исследований

Для верификации результатов, полученных в ходе экспериментов, были проведены расчеты в программной среде *MathCAD 15.0*. Производился численный расчет эквивалентной математической модели [6] динамического звена исследуемых коробок передач. Он включал в себя вычисление амплитудно-частотных спектров вибраций, форма и вид которых зависели от того, вносились ли в исходную модель данные, отражающие наличие и степень развития неисправности или отсутствие каких бы то ни было дефектов. Известно, что для механических систем, в том числе автомобильных коробок передач, эффективным при моделировании считается сообщение ей импульсного воздействия.

По полученным в ходе расчета спектральным характеристикам делается вывод о наличии повреждения и степени его развития [7,8]. В данном случае, изучался характер изменения огибающей энергетического спектра амплитуд мощности вибраций при наличии эксплуатационных дефектов. Для удобства верификации графики огибающей спектра, полученные расчетом при моделировании, изобразим совместно с графиками амплитудных спектров сигналов, зарегистрированных при стендовых испытаниях данных коробок передач при наличии в них аналогичных повреждений (рис. 6, 7).



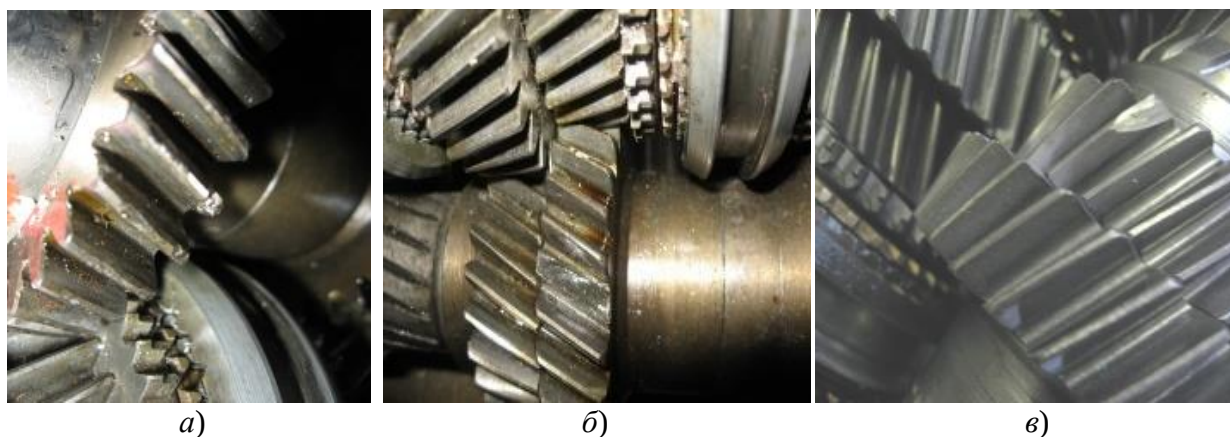
a – первая ступень; *б* – вторая ступень; *в* – третья ступень (два комплекта);
г – задняя передача, *д* – ступени постоянного зацепления; *е* – пятая передача

Рисунок 3 – Шестерни коробки передач производства ООО «Нижегородские моторы», износ боковых поверхностей которых составляет 2 % от предельно допустимого



a – первая ступень; *б* – вторая ступень; *в* – третья ступень (два комплекта);
г – задняя передача, *д* – ступени постоянного зацепления; *е* – пятая передача

Рисунок 4 – Шестерни коробки передач производства ООО «Нижегородские моторы», износ боковых поверхностей которых составляет 80 % от предельно допустимого



а – скол зуба; *б* – выкрашивание зубьев; *в* – поломка зуба

Рисунок 5 – Шестерни коробки передач производства ООО «Нижегородские моторы» с присутствием эксплуатационных повреждений

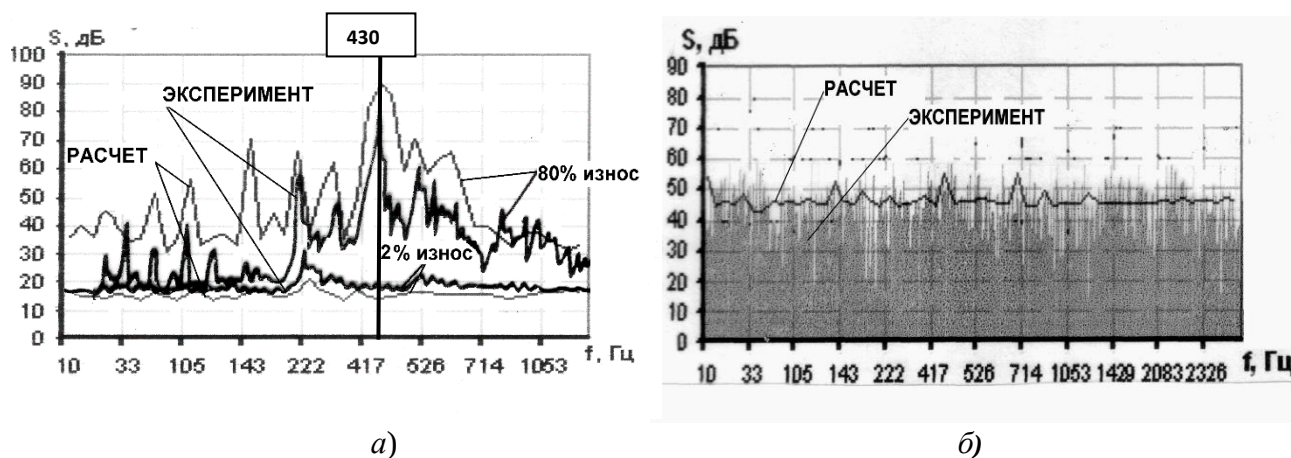
4 Обсуждение и заключение

Повышенное контактное трение боковых поверхностей зубьев, как правило, бывает обусловлено наличием силовых перегрузок. Они, в свою очередь, являются причиной их ускоренного изнашивания. Это может быть вызвано при неграмотном проведении ремонтных работ, например, при неправильном проведении центрирования вторичного вала или нарушении преднатяга подшипников и др. Постоянные силовые перегрузки, возникающие вследствие указанных причин, в итоге приводят к значительному сокращению механического ресурса сопрягающихся деталей.

В результате проведенных испытаний зубчатые колеса (рис. 3-5) устанавливались на испытуемые коробки передач (рис. 2). Пример графиков спектральных характеристик вибраций для 2-й и 3-й ступени приведен на рис. 6 и рис. 7. Испытательные режимы при этом выбирались согласно методике, приведенной в [5], так же, как и размещение датчиков на картере коробки передач. Из приведенных в данной статье графиков можно сделать вывод о том, что наличие эксплуатационных повреждений, рассмотренных в ходе данного исследования, являются причиной повышения значений амплитуд. Каждому повреждению или дефекту соответствуют их увеличение на характерных частотах. Проявления могут быть разнообразны и возрастание амплитуд может быть в широком диапазоне или в виде выраженного локального всплеска (рис. 6, 7). Огибающая спектра вибраций, полученная расчетом математической модели, накладывалась на графики экспериментальных спектров. Это было сделано для улучшения сравнения. По его итогам сходимость результатов была признана удовлетворительной. Это свидетельствует о том, что разработанная математическая модель [10] пригодна для решения задач экспресс-вибродиагностики по спектральным характеристикам без организации испытательных мероприятий [11-17].

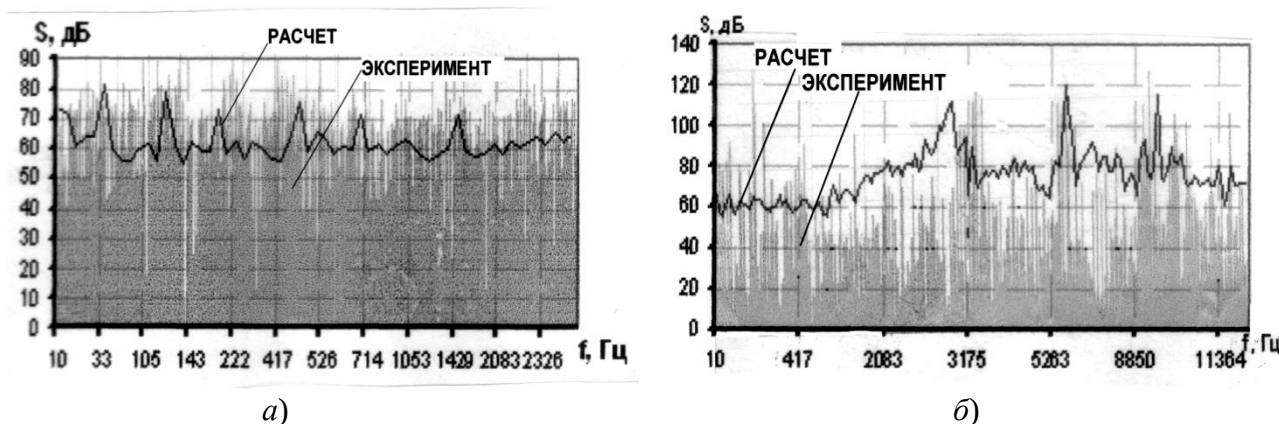
Возрастание амплитуд спектра вибросигналов наблюдалось на тех частотах, которые свидетельствует о проявлении некоего повреждения. Например, общее их повышение во всей широте частотных диапазонов было свойственно при возрастании трения в пятнах контакта зубьев шестерен, что, в свою очередь, может быть вызвано появлением микрорадилов, микродеформаций и т.п. Наличие поломок и сколов зубьев отражается скачками амплитуд вибраций на графиках их спектров на частотах, кратных оборотам шестерен. Величина амплитуд тем выше, чем больше степень развития данного дефекта или повреждения. Также на значения амплитудного всплеска влияют кинематические параметры зубчатого зацепления. На основании исследований численными методами и в ходе натурального стендового эксперимента неко-

торых дефектов зубчатых колес, а также на основе обзора источников, изданных по аналогичным исследованиям, проведенным отечественными учеными [1-7,13,17-20], предлагается следующий диагностический паспорт (табл. 1).



а – случай различной степени изнашивания шестерен; б – случай выкрашивания зуба

Рисунок 6 – Графики спектральных характеристик вибрационного сигнала шестерен коробки передач производства ООО «Нижегородские моторы», полученные в ходе эксперимента и расчётом



а – случай скола зуба; б – случай поломки зуба

Рисунок 7 – Графики спектральных характеристик вибрационного сигнала шестерен коробки передач производства ООО «Нижегородские моторы», полученные в ходе эксперимента и расчётом

Необходимо заметить, что приведенная таблица признаков эксплуатационных повреждений зубчатых колес, которые могут быть диагностированы в ходе эксплуатации транспортных средств, не является абсолютно полной и окончательной. Она является одним из возможных вариантов диагностического паспорта неисправностей и предусматривает возможности дополнения и уточнения.

Таблица 1 – Частоты основных амплитуд вибрации дефектных зубчатых колес

Частота	Конструкционные дефекты	Производственные дефекты	Эксплуатационные дефекты
Кратная частоте зацепления по гармоническому ряду	Регламентированы не все важные погрешности параметров шестерен	Изменение бокового зазора в зацеплении	Износ боковых поверхностей зубьев, нарушение смазки
Кратная собственной частоте вращения шестерни	Неправильный подбор допусков формы корпусных деталей	Перекас осей валов	Выкрашивание, заедание зубьев, трещины в нескольких зубьях
Кратная собственной частоте вращения шестерни с коэффициентом 2	Неправильный подбор допусков отклонения от формы корпусных деталей, шестерен и зубчатых колес	Перекас корпусных конструкций. Изменение бокового зазора, изменение коэффициента перекрытия	Износ боковых поверхностей зубьев, трещина, поломка 2 и более зубьев
Сумма частот, кратных собственным частотам вращения шестерен	Регламентированы не все важные погрешности параметров шестерен	Погрешности изготовления шестерен	Заедание, сколы на нескольких шестернях

Список литературы

- 1 Вейц, В.Л. Колебательные системы машинных агрегатов / В.Л. Вейц, А.Е. Кочура, А.И. Федотов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1979. 256 с.
- 2 Вейц, В.Л. О математическом описании голономных механических систем / В.Л. Вейц, А.Е. Кочура // Прикладная механика. 1975. Т.9. Вып. 11. С.23-28.
- 3 Вибрации в технике: справочник / В.С. Авдуевский, И.И. Артоболевский [и др.]; под ред. М.Д. Генкина. – М.: Машиностроение, 1981. Т5. – 496 с.
- 4 Махоткин, О.А. Принципы построения систем акустической диагностики механизмов / О.А. Махоткин, Ю.В. Тимофеев и др. // Матер. к конф. – семинару; под ред. Б.В. Павлова. – Новосибирск: СибВИМ, 1967. – 106 с.
- 5 Лелиовский, К.Я. Определение на стенде вибрационных характеристик функционирования подшипников коробок передач и влияния на них эксплуатационных дефектов / К.Я. Лелиовский, Ю.И. Молев // Воронежский науч. – техн. вестник. – Воронеж, 2023, Т.3, №3(45), С.87 – 97.
- 6 Лелиовский, К.Я. Расчет спектральных характеристик вибраций элементов трансмиссии транспортных средств, обусловленных эксплуатационными повреждениями / К.Я. Лелиовский, Ю.И. Молев // Вестник гражд. инженеров. – СПб, 2024, №1 (102), С. 95 – 103.
- 7 Асриян, Г.М. Возможности диагностирования вибрации сложных динамических систем / Г.М. Асриян // Колебания редукторных систем. – М.: Наука, 1980. – С.70 - 74.
- 8 Соколов, О.В. Методика определения нагрузочных характеристик шестерен / О.В. Соколов // Автомобильная промышленность, 1978, № 2, С.30-31.
- 9 Лелиовский, К.Я. Определение текущего технического состояния агрегатов трансмиссии транспортных средств посредством вибродиагностики при тестовых заездах по дорожному участку / К.Я. Лелиовский, Ю.И. Молев // Воронежский науч. – техн. вестник. – Воронеж, 2023, Т.4, №4(46), С.97 – 106.
- 10 Лелиовский, К.Я. Моделирование динамики трансмиссии транспортных средств, эксплуатирующихся в ухудшенных дорожных условиях / К.Я. Лелиовский // Мир транспорта и тран. – техн. машин. – Орёл, 2023. № 3-5(82). С. 18 - 25
- 11 Альгин, В.Б. Динамика агрегатов трансмиссии автомобиля / В.Б. Альгин, И.С. Цитович, С.Н. Поддубко. – Минск: Высшая школа, 1989. – 195 с.
- 12 Биргер, И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
- 13 Вейц, В.Л. Динамика машинных агрегатов, работающих с двигателями внутреннего сгорания // В.Л. Вейц, А.Е. Кочура. – Л.: Машиностроение, 1976. – 384 с.
- 14 Вейц, В.Л. Эквивалентные динамические схемы многоступенчатых редукторов / В.Л. Вейц, А.Е. Кочура // Механика машин. 1975. Вып. 31 – 32. С.123 –136.

- 15 Вибрации в технике: справочник / В.С. Авдуевский, И.И. Артоболевский [и др.]; под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. Т6. – 456 с.
- 16 Вибрации в технике: справочник / В.С. Авдуевский, И.И. Артоболевский [и др.]; под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1981. Т3. – 544 с.
- 17 Соколов, О.В. О методике исследования режимов работы шестерен и подшипников трансмиссии в условиях эксплуатации / О.В. Соколов, Ю.Г. Стефанович // Труды НАМИ. – 1972. - № 8. - С.55-66.
- 18 Цитович, И.С. Зубчатые колеса автомобилей и тракторов / И.С. Цитович, В.А. Вавуло, Б.Н. Хваль. – Минск: Изд-во Мин-ва высшего, ср. спец. образования, 1962. – 396 с.
- 19 Шупляков, В.С. Колебания и нагруженность трансмиссии автомобиля / В.С. Шупляков. – М.: Транспорт, 1974. – 328 с.
- 20 Явленский, К.В. Вибродиагностика и прогнозирование качества механических систем / К.В. Явленский, А.К. Явленский. – Л.: Машиностроение, 1983. – 239 с.

References

- 1 Veits, V.L. Oscillatory systems of machine units / V.L. Veits, A.E. Kochura, A.I. Fedotov. - L.: Leningrad State University Publishing House, 1979. 256 p.
- 2 Veits, V.L. On the mathematical description of holonomic mechanical systems / V.L. Veits, A.E. Kochura // Applied Mechanics. 1975. Vol. 9. Issue. 11. Pp. 23-28.
- 3 Vibrations in engineering: reference book / V.S. Avduevsky, I.I. Artobolevsky [et al.]; ed-ited by M.D. Genkin. - M.: Mechanical Engineering, 1981. Vol. 5. - 496 p.
- 4 Makhotkin, O.A. Principles of constructing systems of acoustic diagnostics of mechanisms / O.A. Makhotkin, Yu.V. Timofeev, et al. // Proc. to the conf. – seminar; edited by B.V. Pavlov. – Novosibirsk: SibVIM, 1967. – 106 p.
- 5 Leliovsky, K.Ya. Determination of vibration characteristics of gearbox bearings function-ing and the influence of operational defects on them on the stand / K.Ya. Leliovsky, Yu.I. Molev // Voronezh scientific – technical bulletin. – Voronezh, 2023, Vol. 3, No. 3 (45), Pp. 87 – 97.
- 6 Leliovsky, K.Ya. Calculation of spectral characteristics of vibrations of transmission ele-ments of vehicles caused by operational damage / K.Ya. Leliovsky, Yu.I. Molev // Bulletin of civil engineers. – SPb, 2024, No. 1 (102), P. 95 – 103.
- 7 Asriyan, G.M. Possibilities of vibration diagnostics of complex dynamic systems / G.M. Asriyan // Oscillations of gearbox systems. – M.: Nauka, 1980. – P.70 - 74.
- 8 Sokolov, O.V. Methodology for determining the load characteristics of gears / O.V. Sokolov // Automobile industry, 1978, No. 2, P.30-31.
- 9 Leliovsky, K.Ya. Determination of the current technical condition of transmission units of vehicles by means of vibration diagnostics during test runs on a road special section / K.Ya. Leliovsky, Yu.I. Molev // Voronezh scientific. – technical. bulletin. – Voronezh, 2023, Vol.4, No.4(46), P.97–106.
- 10 Leliovsky, K.Ya. Modeling the dynamics of the transmission of vehicles operated in de-teriorated road conditions / K.Ya. Leliovsky // The world of transport and trans. – tech. machines. – Orel, 2023. No. 3-5(82). P.18–25
- 11 Algin, V.B. Dynamics of vehicle transmission units / V.B. Algin, I.S. Tsitovich, S.N. Poddubko. – Minsk: Higher School, 1989. – 195 p.
- 12 Birger, I.A. Technical diagnostics / I.A. Birger. – M.: Mechanical Engineering, 1978. – 240 p.
- 13 Veits, V.L. Dynamics of machine units operating with internal combustion engines // V.L. Veits, A.E. Kochura. - L.: Mechanical Engineering, 1976. - 384 p.
- 14 Veits, V.L. Equivalent dynamic schemes of multistage gearboxes / V.L. Veits, A.E. Kochura // Mechanics of machines. 1975. Issue. 31 - 32. Pp. 123 -136.
- 15 Vibrations in engineering: reference book / V.S. Avduevsky, I.I. Artobolevsky [et al.]; edited by K.V. Frolov. - M.: Mechanical Engineering, 1981. Vol. 6. - 456 p.
- 16 Vibrations in engineering: reference book / V.S. Avduevsky, I.I. Artobolevsky [et al.]; edited by F. M. Dimentberg, K. S. Kolesnikov. - M.: Mashinostroenie, 1981. Vol. 3. - 544 p.
- 17 Sokolov, O. V. On the methodology for studying the operating modes of transmission gears and bearings under operating conditions / O. V. Sokolov, Yu. G. Stefanovich // Proceedings of NAMI. - 1972. - No. 8. - P. 55-66.
- 18 Tsitovich, I. S. Toothed wheels of cars and tractors / I. S. Tsitovich, V. A. Vavulo, B. N. Khval. - Minsk: Publishing house of the Ministry of Higher, Secondary Specialized Education, 1962. - 396 p.

19 Shuplyakov, V. S. Oscillations and loading of the car transmission / V. S. Shuplyakov. - М.: Transport, 1974. - 328 p.

20 Yavlensky, K.V. Vibration diagnostics and forecasting of the quality of mechanical systems / K.V. Yavlensky, A.K. Yavlensky. - L.: Mechanical Engineering, 1983. - 239 p.

© Лелиовский К. Я., 2025