

СХЕМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА НЕСУЩУЮ СИСТЕМУ КОЛЕСНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

SCHEMATIZATION OF OPERATIONAL LOADS ON THE CARRIER SYSTEM OF WHEELED AGRICULTURAL VEHICLES

В.И. КЛЕПЦОВ, к.т.н.

Группа компаний «Ростсельмаш», Ростов-на-Дону,
Россия, 032474@oaorsm.ru

V.I. KLEPCOV, PhD in Engineering

«Rostselmash» group of companies, Rostov-on-Don, Russia,
032474@oaorsm.ru

В статье изложен подход к схематизации процессов случайного стационарного и нестационарного нагружения каркаса машины со стороны колес и тягово-цепных устройств, а также детерминированного нагружения со стороны работающих функциональных систем. В целях сокращения объема исходных данных для расчета долговечности предложено, во-первых, выявление нагрузок, являющихся линейными комбинациями друг друга, во-вторых, замена корреляционной таблицы средних и амплитудных значений, полученной обработкой исходной реализации, на линейные комбинации корреляционных таблиц более коротких участков. Выражение одних компонент нагрузки через другие компоненты домножением на некоторую, предварительно определенную, константу позволяет уменьшить количество независимых аргументов и, следовательно, продолжительность расчета. Аналогично, оптимизация корреляционной таблицы всей записи заключается в поиске интервалов этой же записи с такими корреляционными таблицами, которые после применения простых преобразований (суммирования и умножения) способны воспроизвести исходную корреляционную таблицу с заданной погрешностью. Тогда расчет долговечности можно выполнить только для найденных интервалов, а с результатами расчета проделать те же операции, что и с корреляционными таблицами. Время расчета может быть сокращено, результаты расчета усталостной долговечности от схематизированных реализаций будут эквивалентны результатам расчета усталостной долговечности от исходных реализаций в силу теории линейного суммирования повреждений.

Подход опробован при схематизации нагружения зерноуборочного комбайна шестого класса, разработанного на «Ростсельмаш», оценены погрешности расчета долговечности от схематизированных нагрузок. Показано сокращение времени расчетов от схематизированных реализаций по сравнению с исходными реализациями.

Ключевые слова: нагружение, схематизация, когерентность, повреждаемость, долговечность.

The article presents an approach to the schematization of the processes of random stationary and non-stationary loading of the vehicle structural frame from the side of the wheels and traction coupling devices, as well as deterministic loading from the operating functional systems. In order to reduce the amount of input data for calculating durability, it was proposed, first, to identify loads that are linear combinations of each other, and second, to replace the correlation table of average and amplitude values obtained by processing the original implementation with linear combinations of correlation tables of shorter sections. The expression of some components of the load through other components by multiplying by some predetermined constant allows to reduce the number of independent arguments and, therefore, the duration of the calculation. Similarly, the optimization of the correlation table of the entire record consists in finding the intervals of the same record with such correlation tables that, after applying simple transformations (summation and multiplication), are able to reproduce the original correlation table with a given error. Then the calculation of durability can be performed only for the intervals found, and with the results of the calculation to do the same operations as with the correlation tables. The calculation time can be reduced, the results of the calculation of fatigue life from the schematized realizations will be equivalent to the results of the calculation of the fatigue life from the original realizations by virtue of the theory of linear summation of damage. The approach was tested when schematizing the loading of a combine harvester (ZUK) of the sixth class, developed at Rostselmash, the errors in calculating the durability of the schematized loads were estimated. The reduction of the computation time from schematized implementations in comparison with the initial implementations is shown.

Keywords: loading, schematization, coherence, damageability, durability.

Введение

Расчет долговечности конструкции несущей системы вновь создаваемого образца сельскохозяйственной машины представляет собой достаточно длительный производственный процесс, подразумевающий завершенное проектирование, подготовленную расчетную конечно-элементную модель и сформированный эксплуатационный спектр нагрузления. В компании «Ростсельмаш» принят усовершенствованный метод расчета долговечности конструкции по номинальным напряжениям вблизи сварного шва, реализованный в программном обеспечении (ПО) LMS Virtual.Lab Durability. Используется, в том числе, принцип суперпозиции: суммарное действие на тело системы сил равносильно сумме изолированных действий сил и не зависит от порядка их приложения. Поочередно вычисляют напряженно-деформированное состояние конструкции от единичных нагрузок, приложенных в местах и по направлению действия эксплуатационных нагрузок. Затем в каждом конечном элементе получают изменения напряжений по времени от действия системы сил и моментов суммированием произведений напряжений от каждой из единичных нагрузок на значения нагрузки в текущий отсчет времени.

Такая последовательность действий является максимально точной, но максимально продолжительной по времени, поэтому ее использование целесообразно при проведении поверочных расчетов усталостной долговечности. Доводка конструкции до требуемого уровня надежности по долговечности, в общем случае, требует нескольких итераций, и наиболее экономичный сценарий реализуется при совпадении по времени этапа такой доводки с этапом строительства опытного образца. Оперативно выявленные критические места можно откорректировать с меньшими временными и материальными затратами.

Однако для выполнения серии проектировочных расчетов долговечности в сжатые сроки необходимо располагать компактной, пусть даже несколько менее точной, «историей нагружения». Редуцирование «историй нагружения» является распространенной практикой и называется схематизацией нагрузок. Происхождение исходных нагрузок значения не имеет: это могут быть записи с машины-аналога, масштабированные на размерность создаваемого образца, или результаты чис-

ленного моделирования динамики движения. ГОСТ 25.507-85 [1] содержит процедуры обработки экспериментальных данных, приводящие к блок-программному нагружению, эквивалентному по повреждаемости исходной записи. Построение функции распределения экстремумов, ее замена многоступенчатым спектром с регулярными нагружениями постоянных уровней способствует уменьшению объема исходных данных для расчета, однако применимость данного подхода ограничена случаями действия на конструкцию одиночной нагрузки либо системы линейно зависимых сил с постоянными фазовыми соотношениями. Схематизация системы случайных сил по ГОСТ 25.507-85 не позволяет учесть их совместное действие, что может привести к отсутствию эквивалентности напряжений в элементах конструкции при эквивалентности отдельно рассматриваемых нагрузок, схематизированных и исходных.

Цель исследования

Состоит в анализе возможных способов схематизации системы случайных независимых нагрузок.

Материалы и методы

Сокращение количества независимых нагрузок

В силу случайного характера усилий и моментов, передаваемых на конструкцию от колес при движении по неровностям, а также случайно изменяющейся потребляемой мощности агрегатов записи нагрузок на прототип или опытный образец, полученные в ходе полевых испытаний, требуют предварительной обработки. Должны быть определены частотные диапазоны сигналов нагрузок для дальнейшего использования, при необходимости – проведена соответствующая частотная фильтрация, понижена частота дискретизации. Подготовленные таким образом сигналы нагрузок можно использовать для расчета долговечности конструкции на временном интервале сделанных записей. Их совместное действие на конструкцию соответствует прототипу, фазовые соотношения сохранены. Распространение результатов расчета долговечности с ограниченного временного интервала на весь срок службы путем экстраполяции соответствующих функций распределения выполнимо в специализированном ПО, например LMS TecWare.

Одновременно с подготовкой сигналов в частотной области можно выполнить поиск линейно зависимых нагрузок. С точки зрения теоретической механики, движущаяся колесная сельскохозяйственная машина представляет собой механическую голономную систему с нестационарными освобождающими связями [2]. Нестационарность обусловлена деформациями шин, резинометаллических упруго-демпферных опор, на которых установлены кабина оператора, силовая установка, подвижные части функциональных систем, таких как очистка, соломотряс. Активными силами и моментами, действующими на данную систему, являются сила тяжести, крутящие моменты приводов ведущих колес, агрегатов отбора мощности от двигателя. Реакциями связей при анализе машины будут вертикальные, продольные и боковые усилия от колес, моменты сопротивления качению, боковому уводу [3], при анализе подвижных частей функциональных систем – усилия и моменты в сайлент-блоках их навески. Таким образом, несущая система машины оказывается под воздействием случайно изменяющихся активных и реактивных сил и моментов, среди которых могут существовать зависимые. Зависимыми могут быть приложенные в одной точке конструкции синхронно изменяющиеся компоненты вектора силы или момента постоянной ориентации, либо активные и реактивные усилия и моменты в различных точках конструкции, уравнения движения которой, в рассматриваемом частотном диапазоне, представляют собой уравнения динамики твердого тела.

Различают функциональную, корреляционную и статистическую зависимости случайных величин [4]. Функциональная зависимость существует тогда, когда каждому возможному значению одной случайной величины соответствует единственное возможное значение другой случайной величины. Пример линейной функциональной зависимости, приемлемой для замены нагрузок при используемом методе расчета долговечности:

$$x(t) = k \cdot y(t), \quad (1)$$

где $x(t)$, $y(t)$ – временные реализации нагрузок; k – константа.

В контексте рассматриваемого вопроса обнаружение функционально зависимых компонент нагрузления способствует сокращению объема исходных данных для расчета долговечности.

Корреляционная зависимость означает, что изменение одной случайной величины влечет за собой изменение среднего значения другой. Замена компонент с выявленными корреляционными зависимостями возможна только при квазистатическом нагружении, поскольку в этом случае исключаются как значимые, так и незначимые для накопления повреждаемости периодические компоненты.

Статистическая зависимость выражается в том, что изменение одной случайной величины вызывает изменение закона распределения другой. Установление статистической связи, при принятом методе расчета долговечности, неспособно изменить объем исходных данных.

Для поиска возможных замен компонент нагружения несущей системы сельхозмашин наиболее уместным является использование функции когерентности:

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_x(f) \cdot G_y(f)},$$

где $G_{xy}(f)$ – взаимная спектральная плотность сигналов x и y ; $G_x(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала x ; $G_y(f)$ – спектральная плотность мощности сигнала y .

Функция когерентности [5] представляет собой действительную величину, принимающую значения от 0 до 1 и характеризующую степень зависимости сигналов $x(t)$ и $y(t)$ на каждой из частот спектра. Преимущество ее использования заключается в возможности принятия решения о замене на основании информации об отдельных частотах или полосах частот сигнала, а не обо всем сигнале, как это происходит при анализе с применением коэффициента корреляции.

Зависимость, описываемая соотношением (1), приведет к графику, у которого значение функции когерентности будет равно 1,0 при всех значениях частоты. Такие случаи бывают, когда для определения нагрузок используется численное моделирование динамики движения тел (MBD – MultiBody Dynamics) и результаты расчета силовых факторов в моделях подвижных соединений выражены компонентами в ортогональной системе координат.

Для записанных нагрузок значение функции когерентности чаще всего:

$$0 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1,$$

даже для сигналов с линейной функциональной связью на определенных частотах из-за

наложения случайных помех, в том числе электрического характера, из-за ошибок квантования. При практическом применении данного вида схематизации к нагрузкам на несущую систему зерноуборочного комбайна (ЗУК) было сделано допущение возможности замены на линейные комбинации при условии:

$$0,7 \leq \gamma_{xy}^2(f) \leq 1,$$

в полосе частот от 0 до 7 Гц. Для ЗУК количество замененных компонент нагрузок составило 22 из общего количества 118. Ориентировочно, в общем случае, можно ожидать сокращение количества нагрузок на 20 %.

Замена временных реализаций нагрузок эквивалентными фрагментами

Рекомендации Р 50-54-80-88 [6] трактуют схематизацию как упрощенное представление нагруженности. Очевидно, что в качестве критериев адекватности замены исходной реализации нагружения на схематизированную должны быть приняты во внимание:

- структура нагружения (импульсное, ступенчатое, непрерывное);
- вид нагружения (детерминированное, случайное, смешанное);
- равенство повреждаемостей, вносимых в конструкцию исходным и схематизированным нагружением.

Структура и вид нагружения могут быть определены первичной (экранный просмотр) и вторичной (статистический, спектральный анализ) обработкой сигналов нагрузок.

Повреждаемость каждого критического места конструкции является результатом действия переменных напряжений, которые, как было отмечено ранее, представляют собой сумму произведений мгновенных значений нагрузок на напряжения, вызываемые их единичными значениями:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^N \sigma_i^1 \cdot F_i(t),$$

где N – количество нагрузок, действующих на конструкцию; $F_i(t)$ – зависимость величины i -й нагрузки от времени; σ_i^1 – напряжение, возникающее в данном критическом месте при действии на конструкцию единичной нагрузки F_i .

Наиболее простой способ сохранить при схематизации неизменное сочетание нагрузок, оставив временную реализацию напряжений без искажений, – разделить исходную реализацию нагрузок на короткие фрагменты, например, как зависимости вертикальных усилий на колеса, выраженные в кilonьютонах, от номера отсчета, представленные на рис. 1.

Далее предстоит проверить возможность получения корреляционной таблицы исходной реализации путем линейных комбинаций корреляционных таблиц фрагментов (рис. 2).

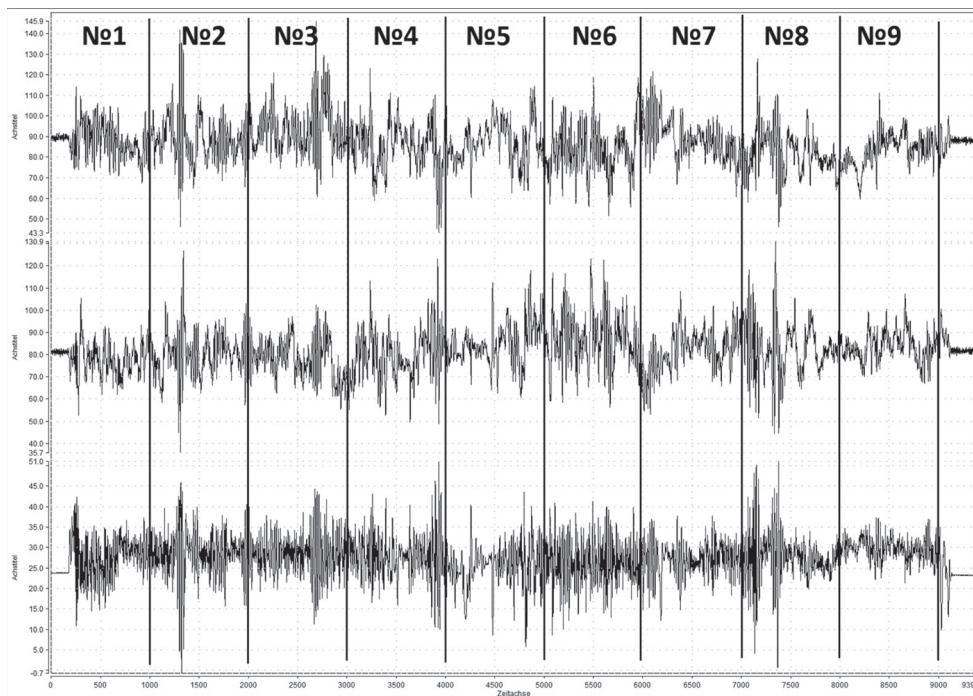
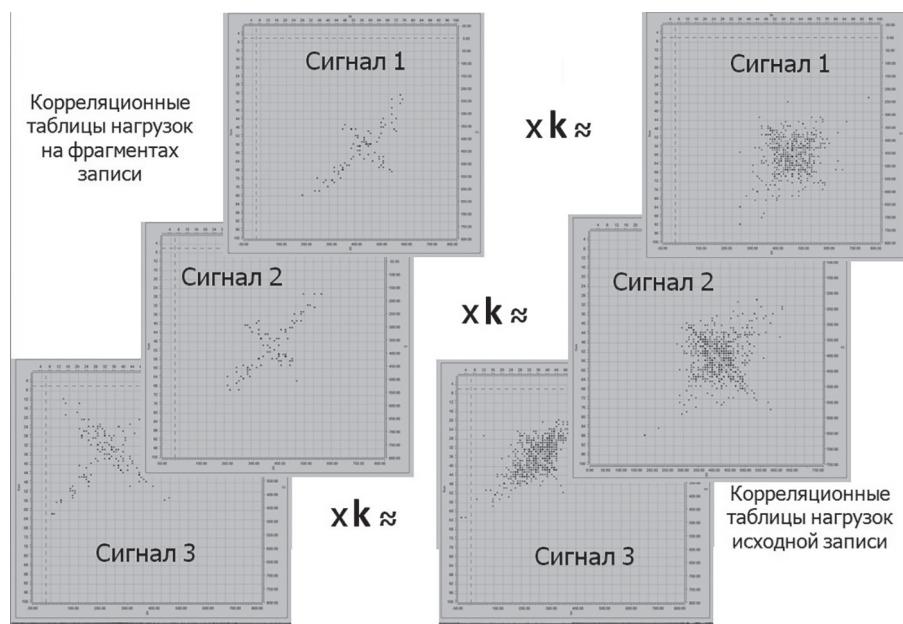


Рис. 1. Разделение исходной реализации на фрагменты

Рис. 2. Пример получения корреляционных таблиц умножением на целое число k

Критерием допустимости замены является сходимость относительной повреждаемости по каждому сигналу нагрузки, обязательным условием – подсчет повреждаемости всех сигналов в пределах одного фрагмента. Такая процедура также реализована в ПО LMS TecWare. Модуль CombiTrack изначально был разработан для автомобильной промышленности в целях подбора записей нагрузок на раму, полученных на различных участках испытательного полигона с собственными профилями неровностей, эквивалентных по воздействию переменной нагруженности на раму этого же автомобиля в условиях эксплуатации на дорогах общего пользования. Результатом работы модуля являются номера участков и количество проездов по ним. Цель – проведение натурных испытаний изделий на полигоне в условиях, максимально приближенных к реальным. Алгоритм данной оптимизации и его

программная реализация допускают задание целевой корреляционной таблицы и заменяющих корреляционных таблиц для любых нагрузок, без указания источника их получения.

На рис. 3 показан пример подбора заменяющих фрагментов из девяти предложенных пользователем для комплекта из трех вертикальных усилий на колеса ЗУК RSM 161 (режим «Ближний транспорт»). Отброшены фрагменты № 1 и 7 (весовые коэффициенты Weight фрагментов Track1 и Track7 равны нулю), фрагмент № 6 предложено учесть дважды (весовой коэффициент Weight фрагмента Track6 равен двум). Сопоставление исходной (Target) и получившейся (CombiTrack) относительной повреждаемости по каждому из каналов нагружения (Channel 5, 6, 7) указывает на погрешность не более 7 %.

Дальнейшее сокращение количества фрагментов, участвующих в замене, до трех приве-

[Coefficients]			
Track	Weight	Track	Weight
Track1	0	Track2	1
Track3	1	Track4	1
Track5	1	Track6	2
Track7	0	Track8	1
Track9	1		
Channel	Target	CombiTrack	
5	0.0875	0.0905	
6	0.0723	0.0775	
7	6.5133E-5	6.9862E-5	

Рис. 3. Замена исходной записи девятью фрагментами

[Coefficients]			
Track	Weight	Track	Weight
Track3	7	Track6	4
Channel	Target	CombiTrack	
5	0.0875	0.0941	
6	0.0723	0.0852	
7	6.5133E-5	7.7013E-5	

Рис. 4. Замена исходной записи двумя фрагментами

ло к погрешности не более 12 %, до двух (№ 3 и 6) – не более 18 %. Весовые коэффициенты при замене на два фрагмента составляют: 7 для участка № 3 и 4 для участка № 6 (рис. 4). Сокращение объема исходных данных:

$$9/2 = 4,5 \text{ раза.}$$

Для расчета относительной повреждаемости используется кривая усталости, определенная в координатах «напряжения – количество циклов». Чтобы иметь возможность определить эквивалентную по повреждаемости нагрузку, нужно задаться коэффициентом пересчета нагрузки в напряжения. Он может быть любым: постоянным для одной нагрузки, необязательно одинаковым для всех нагрузок, поскольку после подбора амплитуд напряжений, обеспечивающих равную повреждаемость исходного и схематизированного сигналов, происходит обратный переход к нагрузкам и влияние коэффициента на результаты подбора прекращается. Область определения кривой усталости, к примеру, околосшовной зоны нахлесточного сварного шва (малоуглеродистая сталь), начинается с 50 МПа эквивалентного напряжения цикла с коэффициентом асимметрии 0,1 и доходит до 1000 МПа. Соответственно, до построения корреляционных таблиц записи нагрузок нужно масштабировать таким образом, чтобы полуразмах абсолютных экстремумов оказался в диапазоне от 50 до 1000 единиц.

Показатель степени данной кривой усталости 4,26. С его помощью можно установить погрешность расчета напряжений, соответствующую погрешности долговечности 18 %:

$$\sqrt[4,26]{1,18} = 1,04,$$

то есть 4 %, что сопоставимо с погрешностями конечно-элементного метода, применяемого для расчета напряжений.

Оптимизация корреляционных таблиц модулем CombiTrack производится без учета

остатков. Поэтому, кроме подобранных фрагментов, в расчете долговечности конечно-элементной модели в ПО LMS Virtual.Lab Durability должны участвовать остатки, сформированные после обработки нагрузок методом «падающего дождя». Если перед построением корреляционных таблиц использовался коэффициент перехода в область определения кривой усталости, остатки должны бытьозвращены к масштабу нагрузок.

Схематизация периодических (а также их частного случая – регулярных) нагрузок путем замены исходных реализаций на фрагменты не требует дополнительных проверок по относительной повреждаемости с использованием кривой усталости. Достаточно выдержать соответствие продолжительности действия, что может быть достигнуто делением длительности исходной записи на длительность фрагмента и указанием в ПО LMS Virtual.Lab Durability данного количества повторений. Предпочтительным является определение фрагментов в тех же интервалах времени, что и фрагментов случайных нагрузок.

Результаты и обсуждение

Проверка эффективности предложенной методики схематизации выполнена на примере расчета долговечности несущей системы ЗУК RSM 161. Объем исходных данных – 2420 секунд записи нагрузок на режимах: «Ближний транспорт», «Дальний транспорт», «Уборка зерна», «Уборка кукурузы». Количество каналов нагрузок 118. После схематизации объем исходных данных уменьшился до 462 секунд (сокращение более чем в 5 раз). Продолжительность расчета долговечности сократилась более чем в 2 раза. Погрешность расчета долговечности, по отношению к исходным нагрузкам, составила 12 %, расчет от схематизированных нагрузок дал более консервативную оценку. Локализация критических мест не изменилась.

Выводы

Среди нагрузок на несущую систему сельскохозяйственных машин существуют зависимые (порядка 20 % от общего количества), их замена линейными комбинациями способна сократить время расчета долговечности.

Вид и структура эксплуатационного нагружения несущей системы со стороны колес при движении машины таковы, что схематизация путем замены исходной реализации на ее мультилинированные фрагменты приводит к сокращению объема выборки в несколько раз.

Погрешность расчета относительной повреждаемости нагрузок со стороны колес, возникающая при схематизации заменой на фрагменты, прямо зависит от глубины редукции: приемлемой для проектировочного расчета является погрешность порядка 20 %.

При расчете долговечности конструкции несущей системы в зависимости от схематизированных нагрузок локализация критических мест сохраняется, погрешность расчета долговечности не превышает погрешности относительной повреждаемости нагрузок.

Продолжительность расчета долговечности конструкции в зависимости от схематизированных нагрузок сокращается более чем в два раза по сравнению с продолжительностью расчета от исходных нагрузок.

Литература

- ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1985. 19 с.
- Голубева О.В. Теоретическая механика. М.: Высшая школа, 1968. 487 с.
- Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
- Статистический анализ данных: методические указания к расчетной работе / Сост. Е.А. Денискина, П.Э. Коломиец; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2004. 64 с.
- Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Машиностроение, 1971. 408 с.
- Р50-54-80-88. Надежность в технике. Комплексные испытания изделий машиностроения на надежность. Общие положения. Рекомендации. М.: 1988.

References

- GOST 25.507-85. Calculations and tests for strength in mechanical engineering. Test methods for fatigue under operating conditions of loading. General requirements. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1985. 19 p.
- Golubeva O.V. Teoreticheskaya mekhanika [Theoretical mechanics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1968. 487 p.
- Smirnov G.A. Teoriya dvizheniya kolyosnyh mashin [Theory of the movement of wheeled vehicles]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p.
- Deniskina E.A., Kolomiec P.E. Statisticheskij analiz dannyh: Metodicheskie ukazaniya k raschetnoj rabote [Statistical data analysis: Methodical instructions for the calculation work]. Samar. gos. aerokosm. un-t. Samara, 2004. 64 p.
- Bendat Dzh., Pirsol A. Izmerenie i analiz sluchajnyh processsov [Measurement and analysis of random processes]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971. 408 p.
- R50-54-80-88 Nadyozhnost' v tekhnike. Kompleksnye ispytaniya izdelij mashinostroeniya na nadyozhnost'. Obshchie polozheniya. Rekomendacii [Reliability in technology. Complex testing of engineering products for reliability. General provisions. Recommendations]. Moscow: 1988.