

## References

1. Abol' P. Theoretical background to the process of trees and stumps uprooting // Trudy TsNIIME. 1969. № 97. P. 81-89.
2. Vysotsky A. A. Ballast composition and amount in the resinous wood mechanized harvesting / A.A. Vysotsky, O. Pokryshkin, R.P. Gontsov. // Problemy osmolozagotovok. M.: Lesn. prom-st', 1972. P. 71-73
3. Vysotsky A. A. On the issue of resinous stumpwood mechanical cleaning from ballast / A.A. Vysotsky, O. V. Pokryshkin, R.P. Gontsov. // Problemy osmolozagotovok. M.: Lesn. prom-st', 1972. P. 76-83.
4. Grigor'yev A. N. Features of hydroimpulsive float wood debarking: diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01 / A. N. Grigor'yev. Yoshkar-Ola, 1987. 152 p.
5. Demin K. A. Mechanization of resinous stumpwood harvesting. M.: Lesn. prom-st', 1974. 30 p.
6. Dmitriev, Yu. Ya. Hydraulic debarking of wood / Yu. Ya. Dmitriev, G.F. Kislitsina. M.: Lesn. prom-st', 1981. 136 p.
7. Novoselov, Yu. M. Mechanization of resinous stumpwood harvesting. M.: Lesn. prom-st', 1984. 232 p.

УДК 630.370

## Экспериментальные исследования случайных процессов взаимодействия ходовой системы гусеничных лесопогрузчиков с опорной поверхностью

В.Ф. Полетаikin<sup>1</sup>

Сибирский государственный технологический университет, пр. Мира, 82, Красноярск, Россия. E-mail: poletaikin\_vf@mail.ru  
Статья поступила 20.01 2012, принята 22.05.2012

*Рассмотрены результаты экспериментальных исследований параметров случайных процессов взаимодействия ходовой системы гусеничных лесопогрузчиков с опорной поверхностью при движении с грузом. Повышение производительности лесопогрузчиков связано с повышением скорости движения, быстродействия исполнительных механизмов, грузоподъемности, что сопровождается повышением уровня динамических нагрузок на машину. При этом внешние нагрузки носят случайный характер. Для выполнения расчетов элементов конструкции на стадии проектирования на основе теории стационарных случайных процессов получены основные вероятностно-статистические характеристики процессов внешних воздействий: распределение вероятностей нагрузок, нормированные корреляционные функции и спектральные плотности процессов взаимодействия ходовой системы с опорной поверхностью. Установлено, что указанные процессы являются стационарными, с узкополосным спектром, основная часть энергии колебаний сосредоточена в полосе частот 0,6...1,2 Гц.*

**Ключевые слова:** лесопогрузчики гусеничные, случайные процессы, динамические нагрузки, экспериментальные исследования.

## Experimental research for random interaction processes between caterpillar loggers running system and bearing surface

V.F. Poletaykin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Technological University, 82 Mira av., Krasnoyarsk, Russia. E-mail: poletaikin\_vf@mail.ru  
The article received 20.01.2012, accepted 22.05.2012

*The results of the experimental researches for the parameters of random interaction processes between the caterpillar loggers running system and bearing surface under the full trip conditions have been considered. The logger effectiveness increase is due to the rise in traverse speed, actuating mechanisms operation speed, and weight capacity. All these are followed by the dynamic loads increase on the machine, external loads being of random character. To calculate structural elements, the major probabilistic-and- statistical characteristics of the external action processes based on the stationary random processes theory – loads probability distribution, normed correlative function and spectral densities of interaction processes between the running system and bearing surface - have been obtained at the design stage. It has been stated that the mentioned processes are permanent within the narrow-band spectrum, major part of vibrational energy being concentrated in 0,6...1,2 Hz frequency band.*

**Key words:** caterpillar loggers, random processes, dynamic loads, experimental researches.

**Постановка задачи.** При использовании методов статистической динамики в расчетах и исследованиях лесных, сельскохозяйственных и других машин в качестве источников внешних воздействий принимается микропрофиль поверхности пути, который рассматри-

вается как случайная функция и представляется в виде комплексного непрерывного энергетического спектра, т. е. спектральной плотностью воздействия. Однако использование характеристик профиля поверхности пути в качестве реализаций случайной функции внеш-

них воздействий корректно лишь в том случае, если динамические свойства его стационарны, когда жесткость и демпфирующие сопротивления постоянны. В противном случае характеристики микропрофиля и характеристики внешних воздействий не будут коррелированными и, вследствие этого, принятие микропрофиля в качестве реализации случайного процесса внешних воздействий будет необоснованным. Функцию, определяющую профиль дороги, можно отнести к стационарному случайному процессу с некоторыми приближениями в том случае, если оцениваемый участок по типу покрытия и степени износа однороден, и можно пренебречь его изменениями во времени [1].

Лесопогрузчики в процессе выполнения технологических операций перемещаются по неподготовленным погрузочным площадкам. Динамические характеристики их поверхностей не обладают свойством стационарности. Отдельные участки погрузочных площадок значительно отличаются друг от друга несущей способностью, различными по свойствам включениями в грунт, твердостью поверхности, поэтому существенно разнятся по своим динамическим характеристикам. Исходя из этого, применение допущения о профиле пути как реализации случайной функции внешнего воздействия при исследовании динамических нагрузок на элементы конструкции лесопогрузчиков, не представляется возможным. В этом случае в качестве источников внешних воздействий на динамические системы технологического оборудования и базового трактора следует принимать случайные процессы силового взаимодействия ходовой системы машины с опорной поверхностью, характеристики которых определяют по результатам экспериментальных исследований работы машины в производственных условиях.

**Случайные процессы взаимодействия ходовой системы гусеничных лесопогрузчиков с опорной поверхностью.** Повышение производительности лесопогрузчиков связано с повышением скорости грузового хода, быстрогодействия механизмов, грузоподъемности, что сопровождается повышением уровня динамической нагруженности элементов конструкции. Для обеспечения требуемых показателей надежности на стадии проектирования необходимы характеристики процессов силового взаимодействия ходовой системы лесопогрузчика с опорной поверхностью при движении с грузом, которые дают возможность на основе положений теории стационарных случайных процессов выполнять расчеты элементов конструкции при случайных внешних возмущениях. Известно [2], что такие расчеты выполняются на основе уравнения:

$$S_y(\omega) = |W(\omega)|^2 \cdot S_x(\omega), \quad (1)$$

где  $|W(\omega)|$  – модуль амплитудно-фазовой частотной характеристики динамической системы (амплитудно-частотная характеристика);  $S_y(\omega)$  – энергетический спектр параметра выходного процесса;  $S_x(\omega)$  – энергетический спектр параметра входного процесса – внешних воздействий.

Уравнение (1) позволяет по известным характеристикам внешних воздействий (входных процессов) и

свойствам динамических систем получать соответствующие характеристики случайных процессов на выходе системы – динамических нагрузок на элементы конструкции машины. С целью определения характеристик случайных процессов внешних воздействий на ходовую систему проведены экспериментальные исследования на натурном образце лесопогрузчика грузоподъемностью 35 кН на базе гусеничного лесопромышленного трактора ТТ-4М при следующих вариантах исполнения подвески корпуса и вида транспортируемого груза:

- I – жестко-балансирная подвеска – упругий груз;
- II – жестко-балансирная подвеска – жесткий груз;
- III – рессорно-балансирная подвеска – жесткий груз;
- IV – рессорно-балансирная подвеска – упругий груз.

В качестве упругого груза использовались хлысты и деревья с кроной, в качестве жесткого – сортименты.

При проведении экспериментальных исследований регистрировались реализации случайных процессов взаимодействия ходовой системы машины с опорной поверхностью –  $x(t)$ , а также скорость и время движения лесопогрузчика. Для измерения и регистрации процессов использовалась информационно-измерительная система, состоящая из стандартных датчиков и приборов. Регистрация процесса взаимодействия ходовой системы с опорной поверхностью производилась прибором, состоящим из гидроцилиндра с присоединенным к нему тензометрическим датчиком давления. При проведении экспериментов приборы устанавливались между направляющими рессор и рычагами передних балансирных кареток. Значения нагрузок на ходовую систему при расшифровке осциллограмм определялись по формуле:

$$P_3 = 2 \cdot M_{\Pi} \cdot F_{\Pi} (y_{\text{д}} + y_{\text{зст}}), \quad (2)$$

где  $M_{\Pi}$  – масштаб осциллограммы;  $F_{\Pi}$  – площадь поршня гидроцилиндра;  $y_{\text{д}}$  – динамическая составляющая ординаты осциллограммы;  $y_{\text{зст}}$  – ордината осциллограммы при статическом нагружении лесопогрузчика

Скорость движения и пройденный путь определялись по показаниям датчика оборотов, который устанавливался на оси ведущей звездочки трактора. Средняя скорость движения лесопогрузчика определялась по формуле:

$$V = \frac{n_1 \cdot \pi \cdot d_{\text{зв}}}{n_2 \cdot n \cdot t}, \quad (3)$$

где  $n_1$  – количество импульсов на участке осциллограммы;  $n_2$  – количество импульсов за один оборот звездочки;  $n$  – количество отметок времени на участке осциллограммы;  $t$  – время одной отметки на осциллограмме.

На первом этапе обработки информации определялись основные вероятностно-статистические характеристики случайных процессов (средние значения нагрузок –  $P_x$ , стандартные отклонения –  $\sigma_x$ , коэффициенты вариации –  $V$ , точность опытов –  $P$ , функции рас-

пределения вероятностей, коэффициенты асимметрии – а, эксцесса – ε) – таблица 1.

Кривые распределения статистической вероятности выравнивались теоретическим законом. Оценка выравнивания производилась по критериям согласия (Колмогорова, Пирсона, Романовского). Для получения информации о внутренней структуре процессов был применен корреляционный и спектральный анализ процессов, который включал в себя следующие этапы:

- выбор реализаций случайных процессов  $x(t)$  для проведения анализа;
- обоснование интервала дискретизации процессов по времени и частоте;
- проверка гипотезы о стационарности и эргодичности случайных процессов.

Количество реализаций при исследовании сочетаний каждого варианта исполнения ходовой системы и вида груза составляло не менее 25. Длительность реализации по времени составляла 7...10 с., что соответствовало 6...9 м передвижения лесопогрузчика в режиме грузового хода. Выбор реализации для обработки, форма представления материала производилась в соответствии с методами, принятыми в практике [3, 4]. Математическая обработка информации выполнялась на ЭВМ по стандартным программам. Кривые плотности распределения вероятностей процессов внешних воздействий  $x(t)$ , выровненные по нормальному закону, приведены на рис. 1.

Плотность распределения вероятностей нагрузок на ходовую систему соответствует нормальному закону, что подтверждается критериями согласия.

Анализ данных показывает, что наибольшие силы взаимодействия между ходовой системой и опорным массивом возникают при сочетании жесткой подвески корпуса и длинномерного упругого груза. Указанный режим следует считать наиболее тяжелым. Среднее значение нагрузки на один борт  $P_x = 105,84$  кН, диапазон нагрузок 60..180 кН. Движение с сортиментами характеризуется меньшими нагрузками на элементы конструкции. Средние значения нагрузок на корпус и ходовую систему при этом  $\bar{P}_x^{II} = 86,07$  кН;  $\bar{P}_x^{III} = 78,93$  кН;  $\sigma_x^{II} = 22,89$  кН;  $\sigma_x^{III} = 26,78$  кН.

Выбор реализаций случайных процессов для проведения корреляционного и спектрального анализа производился в соответствии с [3, 4, 5, 6] в виде ряда коротких записей участков в 5...10 циклов, выбранных произвольным образом из одной реализации. Шаг квантования случайного процесса определялся по выражению:

$$\Delta t = 1/2 \cdot f_c, \tag{4}$$

где  $f_c$  – частота высшей гармоники случайного процесса (граничная частота). Принятая для обработки реализация по времени составляла  $T=230$  с. При этом было получено периодов высшей гармоники  $N = 1127$ . Следовательно,

$$f_c = \frac{N}{T_p} = 1127/230 = 4,9 \text{ Гц},$$

$$\Delta t = 1/2 \cdot 4,9 = 0,102 \text{ с.}$$

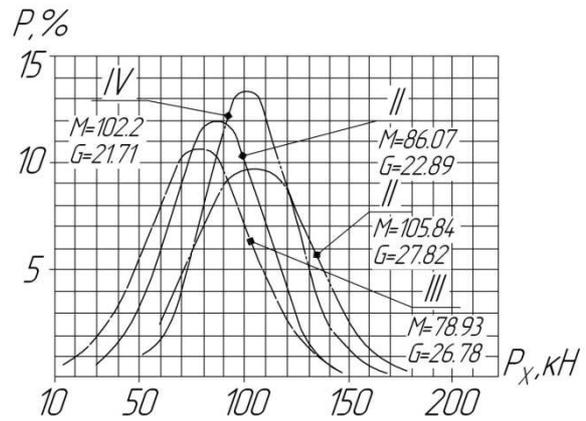


Рис. 1. Распределение вероятности нагрузок на один борт ходовой системы лесопогрузчика класса 35 кН:

I – жестко-балансирная подвеска – упругий груз; II – жестко-балансирная подвеска – жесткий груз; III – рессорно-балансирная подвеска – упругий груз; IV – рессорно-балансирная подвеска – жесткий груз

Однако для повышения надежности результатов при вычислении корреляционной функции и спектральной плотности процессов рекомендуется [7] принимать шаг квантования несколько меньшим расчетного, поэтому принимаем  $\Delta t = 0,1$  с.

квантования:  $\Delta \tau = \Delta T = 0,1$  с. Шаг дискретизации процессов по частоте при вычислении спектральной плотности определялся по выражению [6]:

$$\Delta f = \frac{K \cdot f_c}{m}, \tag{5}$$

где  $f_c = 1/2 \cdot \Delta t = 1/2 \cdot 0,1 = 5$  Гц;  $K = 1, 2, 3, \dots, m$ ;  $m = 50$  – число шагов при расчете корреляционной функции. Длительность по времени достоверного участка корреляционной функции определялась из условия [3]:  $\tau_{\max} \leq T_p / (10 \dots 30)$ , но не более 5 с. Шаг вычисления корреляционной функции принимался равным шагу.

Таблица 1

Статистические характеристики случайных процессов взаимодействия ходовой системы гусеничных лесопогрузчиков с опорной поверхностью

Индексы системы	Вероятностно-статистические характеристики процессов $x(t)$					
	$P_x$ , кН	$\sigma_x$ , кН	V, %	P	a	ε
I	105,84	27,82	26,28	0,0185	0,452	-0,6
II	88,07	22,89	26,59	0,0187	0,215	-0,23
III	78,93	26,78	33,92	0,024	-0,12	0,005
IV	102,2	21,71	21,24	0,15	0,262	-0,325

Для расчета начального значения частоты принималась  $K = 1$ , поэтому  $\Delta f = 5/50 = 0,1$  Гц. Таким образом, интервал частот при расчете спектральной плотности  $0,1 \leq f \leq 5$  Гц.

Максимальное разрешение по частоте:

$$\Delta f = 1/T_p = 1/n \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где  $T_p$  – продолжительность по времени общей реализации случайного процесса, принятой к обработке, с.;  $n$  – необходимое число дискретных значений процесса (объема выборки).

При известном значении разрешения по частоте ( $\Delta f = 0,1$  Гц) необходимая длина реализации может быть определена по формуле:  $T_p \geq 1/\Delta f \geq 1/0,1 \geq 10$  с.

Число дискретных значений процесса  $n \geq 1/\Delta t \cdot \Delta f \geq 100$ .

В результате математической обработки данных экспериментальных исследований были получены нормированные корреляционные и спектральные функции процессов  $x(t)$ . В качестве основных характеристик нормированных корреляционных функций приняты [6]: время корреляционной связи  $\tau_0$ , с.; средний полупериод колебаний  $T_p$ , с.; средняя угловая частота  $\omega_{cp}$ ,  $c^{-1}$  (таблица 2). Величины  $T_p$  и  $\omega_{cp}$  вычислялись по формулам:

$$T_p = 1/n \cdot \sum_{i=1}^n (\tau_{i+1} - \tau_i); \quad (7)$$

$$\omega_{cp} = \pi/T_p, \quad (8)$$

где  $\tau_{i+1}, \tau_i$  – последовательность значений абсцисс точек пересечения кривой  $\rho(\tau)$  с осью  $\tau$ .

Нормированные корреляционные функции процессов  $x(t)$  (рис. 2), полученные в результате обработки экспериментальных данных, аппроксимированы выражением вида [6, 8]:

$$\rho(\tau) = e^{-\alpha|\tau|} \cdot \cos \beta\tau, \quad (9)$$

где  $\alpha$  – параметр затухания корреляционной функции;  $\beta$  – параметр, характеризующий среднюю частоту

скрытой периодичности в реализациях случайных процессов.

$$\beta = K\pi/2T_K; \quad (10)$$

$$\alpha = \beta/\pi * \ln(1/\rho(\tau_1)), \quad (11)$$

где  $T_K$  – абсцисса точки, в которой корреляционная функция  $K$ -й раз пересекает ось  $\tau$ ;  $\rho(\tau_1)$  – значение первого отрицательного максимума функции.

Индексы I, II, III, IV в обозначениях корреляционных функций на рис. 2 соответствуют индексам эквивалентных динамических систем.

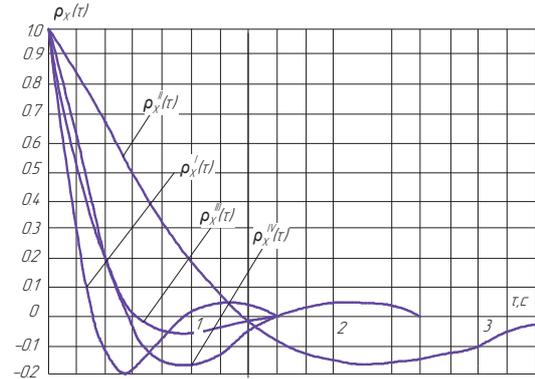


Рис. 2. Нормированные корреляционные функции процессов взаимодействия ходовой системы с опорной поверхностью –  $x(t)$ .

Спектральная плотность характеризует распределение энергии колебаний по непрерывным частотам разложения, верхняя граница которых определяется частотой среза ( $f_{cp}$ ), определяемой из условия [3]:

$$S(f_{cp}) = 0,05S(0). \quad (12)$$

Таким образом, частота среза определяет границу, при которой значение спектральной плотности становится малым. Поэтому  $f_{cp}$  определяет также и ширину спектра ( $\Delta f = f_{cp}$ ). При условии  $\Delta f \ll f_0$  спектр относится к разряду узкополосных, в противном случае – к широкополосным. Параметры нормированной спектральной плотности процессов  $x(t)$  приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики нормированных корреляционных функций процессов  $x(t)$

Индексы системы	Характеристики функций $\rho_x(\tau)$				
	$\tau_0$ , с	$T_p$ , с	$\omega_{cp}$ , $c^{-1}$	$\alpha$ , $c^{-1}$	$\beta$ , $c^{-1}$
I	0,8	0,266	11,77	2,636	4,83
II	1,2	0,285	11,90	0,71	1,15
III	0,7	0,666	4,71	2,50	2,50
IV	0,6	1,166	2,69	1,70	2,80

Таблица 3

Параметры нормированной спектральной плотности процессов  $x(t)$

Индексы системы	Характеристики функций $S_x(f)$				
	$f_{cp}$ , Гц	$\Delta f$ , Гц	$f_0$ , Гц	$S(f_0)$	$S(0)$
I	4,6	4,6	0,2	0,11	0,06
II	5,0	5,0	0,2	0,086	0,07
III	3,2	3,2	0,3	0,13	0,02
IV	4,6	4,6	0,4	0,10	0,06

На рис. 3 показаны графики функций нормированной спектральной плотности процессов  $x(t)$ . За основные характеристики функции приняты: частота среза –  $f_{ср}$ ; ширина спектра –  $\Delta f$ ; частота  $f_0$ , при которой спектральная плотность процесса достигает максимального значения; максимальное значение функции –  $S(f_0)$ ; значение функции при  $f = 0$  –  $S(0)$ .

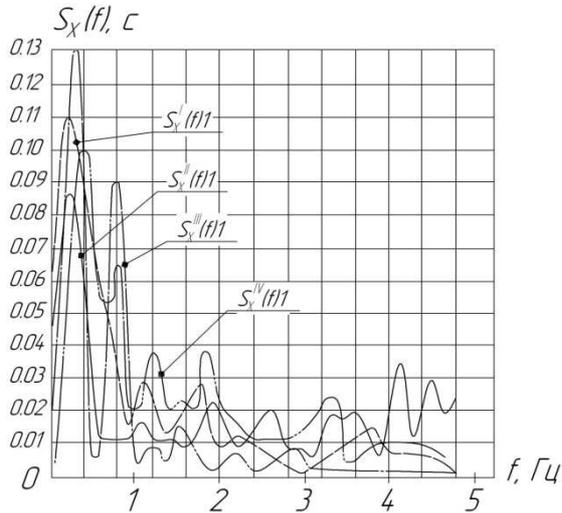


Рис. 3. Нормированные спектральные плотности процессов –  $x(t)$ .

Индексы I, II, III, IV в обозначениях функций спектральной плотности на рис. 3 соответствуют индексам эквивалентных динамических систем.

Графики функции  $\rho_x(\tau)$  показывают, что с ростом сдвига  $\tau$  корреляционная связь между сечениями процесса быстро ослабевает, что свидетельствует о случайном характере воздействий и эргодичности процессов. Время корреляционной связи процессов  $x(t)$   $\tau_0 = 0,6...1,2$  с. Наибольшее значение характерно для функции  $\rho_x^{II}(\tau)$  ( $\tau_0 = 1,2$  с). Это говорит об увеличении влияния выходных процессов на нагруженность системы при применении жесткой подвески корпуса.

Из рис. 3 и данных таблицы 3 следует, что процессы  $x(t)$  относятся к процессам с узкополосным спектром. Основная часть энергии колебаний сосредоточена в полосе частот  $0,2...0,9$  Гц. Рассматриваемые процессы были проанализированы на наличие свойств стационарности и эргодичности. Различают процессы стационарные в широком и узком смысле. В первом случае достаточным условием стационарности является инвариантность относительно сдвига по времени математического ожидания, корреляционной функции и конечное значение дисперсии процесса. Свойство эргодичности позволяет получить характеристики процесса по единственной реализации, т. е. усреднением по времени вместо усреднения по ансамблю, и таким образом, одна реализация достаточной продолжительности заменяет множество реализаций. Предварительные выводы о стационарности и эргодичности процессов по-

лучены на основе экспресс-анализа. Однотипность процессов, отсутствие развития их во времени (непрерывное нарастание или спад) подтверждают наличие указанных свойств [9]. Вывод о стационарности и эргодичности процессов подтверждается также затухающим характером корреляционных функций.

#### Выводы.

1. Процессы взаимодействия ходовой системы с опорной поверхностью являются случайными, стационарными и эргодичными, обладают узкополосным спектром. Основная часть энергии колебаний сосредоточена в полосе частот  $0,2...0,9$  Гц. Время корреляционной связи составляет  $0,6...1,2$  с.

2. Плотность распределения параметров процессов взаимодействия ходовой системы с опорной поверхностью соответствует нормальному закону.

3. Характеристики процессов взаимодействия ходовой системы с опорной поверхностью дают возможность на основе положений теории стационарных случайных процессов выполнять расчеты элементов конструкции при случайных внешних возмущениях.

#### Литература

1. Дмитриев А.А., Чобиток В.А., Тельминов А.В. Теория и расчет нелинейных систем поддрессирования гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1976. 208 с.
2. Первозванский А.А. Курс теории автоматического регулирования. М.: Наука, 1986. 615 с.
3. Брауде В.И. Вероятностные методы расчета грузоподъемных машин. Л.: Машиностроение, 1978. 232 с.
4. Бендатт Д., Пирсол К. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983. 312 с.
5. ГОСТ 21878 – 76 Случайные процессы и динамические системы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1976. 33 с.
6. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Л.: Колос, 1970. 376 с.
7. Бендатт Д., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1971. 408 с.
8. Силаев А.А. Спектральная теория поддрессирования транспортных машин. М.: Машиностроение, 1963. 168 с.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.

#### References

1. Dmitriev A.A. Theory and calculation of nonlinear systems for track-type vehicles cushioning / A.A. Dmitriev, V.A. Chobitok, A.V.Tel'minov. M.: Mashinostroeniye, 1976. 208p.
2. Pervozvansky A.A. The course of the automatic control theory. / A.A. Pervozvansky. M.: Nauka, 1986. 615 p.
3. Braude V.I. Probabilistic methods for hoisting machines calculation. / V.I. Braude. L.: Mashinostroeniye, 1978. 232 p.
4. Bendatt D. Application of the correlation and spectral analysis. / D. Bendatt, K. Pirsol. M.: Mir, 1983. 312 p.
5. The State standard 21878 – 76. Random processes and dynamic systems. Terms and definitions. – M.: Izdatel'stvo standartov, 1976. 33 s.
6. Lur'ye A.B. Statistical dynamics of agricultural units / A.B. Lur'ye. L.: Kolos, 1970. – 376 p.
7. Bendatt D. Random processes metering and analysis / D. Bendatt, A. Pirsol. M.: Mir, 1971. 408 p.
8. Spectral theory of transport machines cushioning./ A.A. Silaev. M.: Mashinostroeniye, 1963. 168 p.
9. Venttsel' E.S. Probability theory. / E.S. Venttsel'. M: Nauka, 1969. 576 p.