

УДК 620.169.1

В.М. СУРИН, д-р техн. наук, проф.

профессор¹

E-mail: kaftm@bsuir.by

С.М. ДЗЕРЖИНСКИЙ, канд. техн. наук, доц.

доцент²

E-mail: fzindo@bsac.by

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь²Белорусская государственная академия связи, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 30.11.2018.

ОБ ОЦЕНКЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ

Осуществлено экспериментальное исследование влияния среднеквадратического значения и параметра широкополосности случайной нагрузки на долговечность элементов изделий. По результатам испытаний предложена зависимость связи долговечности от параметра широкополосности. Оценена точность соответствия рассчитанных по предложенной зависимости данных с результатами эксперимента.

Ключевые слова: случайные нагрузки, циклическая долговечность, испытания, параметр широкополосности

Введение. Значительная часть изделий в процессе эксплуатации и транспортирования подвергается механическим воздействиям, которые часто являются причиной их отказа. Случайные воздействия можно охарактеризовать как воздействия, в которых перемещающиеся точки совершают нерегулярные циклы движения, никогда не повторяющиеся в точности. Чтобы полностью описать эти воздействия, необходимо бесконечное количество данных об их происхождении.

Методы получения количественных расчетных характеристик нагруженности деталей при случайном нагружении основываются на замене реального случайного процесса нагружения процессом, который по уровню вносимого усталостного повреждения должен быть эквивалентен реальному. Случайные процессы нагружения заменяются или некоторыми схематизированными процессами, которым соответствуют определенные функции распределения амплитуд напряжений [1, 2] или нестационарный реальный процесс разбивается на отдельные «стационарные» блоки с определенными параметрами нагружения [3]. От схематизированного процесса из последовательности амплитуд воздействия переходят, приняв определенную теорию накопления повреждений, к определению долговечности. При увеличении частотного диапазона (широкополосности) процесса нагружения точность схематизации падает, разброс оценок долговечности растет. Для узкополосных процессов все методы схематизации дают близкие результаты.

Современные методы механических испытаний направлены на наиболее полное моделирование реальных процессов, действующих при эксплуатации [4]. Испытания на широкополосную случайную вибрацию, как более соответствующие реальным воздействиям, все более широко внедряются при доводке и контроле изделий, вытесняя испытания на действия гармонической вибрации.

При оценке действия как периодических, так и случайных нагрузок важной характеристикой является среднеквадратическое (эффективное) значение воздействия:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt},$$

где $x(t)$ — уровень воздействия в данный момент; T — время, используемое для определения среднеквадратического значения.

Так как при определении значения σ предусмотрено возведение уровня воздействия в квадрат, считают что эта величина имеет прямое отношение к энергии. Дополнительно используют метод частотного анализа. На основании теоремы Фурье любой периодический процесс можно рассматривать как множество чисто гармонических, т. е. разложить в ряд Фурье. Поэтому частотный спектр периодического воздействия состоит из ряда дискретных линий величин среднеквадратических значений воздействий на гармонических частотных составляющих процесса нагружения. Частотный спектр случайного воздействия явля-

ется непрерывным. Поэтому для описания случайного нагружения используют среднеквадратичную спектральную плотность

$$S(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\sigma^2}{\Delta f},$$

показывающую распределение энергии случайных воздействий в частотном диапазоне Δf . Ее обычно называют функцией спектральной плотности мощности. Поэтому при анализе и задании случайного воздействия на испытательных стендах наиболее эффективным является его представление в виде функции спектральной плотности мощности $S(f)$. Частотный спектр случайного воздействия при использовании в анализирующей или задающей аппаратуре фильтров с постоянной шириной частотной полосы будет пропорционален функции распределения энергии по частотам воздействия.

Реальные случайные нагрузки действуют в широком частотном диапазоне, поэтому основным видом стендовых испытаний на случайные механические воздействия являются испытания на широкополосную случайную вибрацию (ШСВ). Воздействие ШСВ на испытываемое изделие имеет ряд особенностей, основной из которых является одновременное возбуждение всех форм собственных колебаний, попавших в частотный диапазон спектра воздействия.

Измерение, задание и контроль спектральной плотности мощности и среднеквадратического значения виброускорения при нагружении заложены практически во всех типах задающей и анализирующей аппаратуры случайных вибраций.

Реакция на случайные воздействия является также случайным процессом. Связь параметров реакции с параметрами воздействия осуществляется через амплитудно-частотную характеристику изделия. В дорезонансной для испытываемых элементов области частот, когда значение собственной частоты испытываемого элемента выше верхней частотной границы ШСВ, реакция повторяет структуру подводимого воздействия. При захвате спектром ШСВ только первой собственной частоты реакция является узкополосным случайным процессом. По мере расширения частотного диапазона ШСВ и захвата второй и третьей собственных частот элемента в реакции появляются соответствующие частотные составляющие. В результате реакция на случайное воздействие представляет собой сумму узкополосных случайных процессов, а частоты нагружения, близкие к собственным частотам, создают опасные режимы нагружения [5].

При проведении испытаний необходимо достаточно точно оценивать повреждаемость с учетом влияния различных параметров режимов испытаний. Оценка долговечности при заданном режиме случайного нагружения как на этапе про-

ектирования, так и при эксплуатации актуальна для обеспечения надежности изделий.

При испытаниях на электродинамических стендах воздействием ШСВ реализуется случайный процесс с нулевым средним, контролируемые параметры являются спектральная плотность мощности и среднеквадратическое (эффективное) значение виброускорений. Воздействие в заданной полосе частот нагружения задается величиной спектральной плотности мощности виброускорения, как правило, постоянного (белый шум) или ступенчато изменяющегося значения, постоянного в каждой частотной полосе фильтра.

Результаты испытаний. Испытания проводили на электродинамическом вибростенде УВЭ 5/10 000 с системами управления виброиспытаниями СУВУ-4 и АСУВ-010. Вибростенд имеет следующие характеристики: диапазон частот возбуждения — 5...10 000 Гц; грузоподъемность — 5 кг; амплитуда перемещений — до 7,5 мм; максимальное ускорение — 450 м/с².

Для определения по показанию подключенного к стенду частотомера собственных частот испытываемых образцов применяли систему СУВУ-4, которая позволяет проводить испытания при действии гармонической вибрации с автоматическим поддержанием заданного уровня виброускорения методом качающейся частоты, сущность которого заключается в плавном изменении частоты возбуждения в частотном диапазоне ШСВ от нижней частоты до верхней и обратно. Реакция при прохождении собственных частот элементов резко возрастает из-за возникновения резонанса.

Для задания случайных вибраций использовали систему АСУВ-010. Она позволяет задавать и автоматически поддерживать уровень спектральной плотности ускорения от 0,01 до 10g²/Гц в диапазоне частот возбуждения 1–5000 Гц в каждой из 400 частотных полос управления, т. е. позволяет формировать гладкий или ступенчатый частотный спектр. В пределах полосы пропускания каждого фильтра обеспечивается постоянный уровень спектральной плотности мощности и осуществляется контроль среднеквадратического значения виброускорения. Воспроизведение спектральной плотности мощности включает в себя процесс деления среднеквадратического значения виброускорения, измеренного в узкой полосе фильтра с шириной полосы пропускания Δf на ширину полосы.

Многоцикловая усталость представляет основной тип повреждения динамически нагруженных элементов конструкций, и при действии случайных вибраций отказы обусловлены многоциклового усталостью.

При построении расчетных моделей для оценки долговечности используют характеристики уровня и структуры случайных нагрузок — среднего квадратического значения вибровоздействия,

ширины спектра и параметра широкополосности β , под которым понимают отношение числа максимумов процесса воздействия к числу пересечений среднего уровня [6].

Связь долговечности со средним квадратическим значением случайной нагрузки при неизменном частотном диапазоне нагружения рекомендуют представлять в виде степенной зависимости [7–9], подобной степенному уравнению кривой усталости:

$$T\sigma^m = \text{const}, \quad (1)$$

где T — время до отказа при неизменном значении σ ; m — параметр, определяемый экспериментально по результатам испытаний при разных уровнях нагружения. Это подтверждается многими экспериментальными данными.

В качестве объектов испытаний были выбраны широко используемые в аппаратуре элементы типа резисторов МЛТ, конденсаторов, которые представляли собой сосредоточенную массу с проволочными выводами из меди или кобальта. Основными моделями крепления испытуемых элементов были: двухопорный закрепленный по краям стержень с сосредоточенной по середине межопорного расстояния массой и консольно закрепленный стержень с сосредоточенной массой на свободном незакрепленном краю. Элементы одного типа испытывали в каждом режиме одновременно партиями по 20–60 штук. Для уменьшения разброса результатов испытаний элементы определенного типа выбирались из одной партии. Крепежные для элементов приспособления, устанавливаемые на столе вибрационного стенда, обеспечивали идентичность заделки выводов элементов испытываемых партий; отклонение уровня ускорения воздействия в различных точках от задаваемого в контрольной точке не более 7 %; отсутствие резонанса приспособления в исследуемом диапазоне частот. Система управления поддерживала заданный уровень среднеквадратического значения ускорения для выбранной (гладкой) формы спектра.

Каждую партию испытывали при неизменном режиме воздействия до разрушения выводов всех элементов. Отказы у испытываемых токопроводящих элементов автоматически фиксировали регистратором отказов, позволяющим одновременно контролировать до 100 элементов.

Регрессионный анализ результатов испытаний 80 партий объемом от 20 до 50 элементов каждая показал, что лучше всех соответствует эксперименту из 15 видов функций степенная зависимость (1) связи долговечности T и среднеквадратического значения ускорения. Это подтверждает дисперсионный анализ, вид графиков зависимости $T = f(\sigma)$.

Ширина спектра, наряду с уровнем воздействия, является важнейшим параметром и входит

в технические условия на стендовые вибрационные испытания. Однако влияние ширины, структуры спектра на долговечность и виброн нагруженность практически не изучено. Неоднозначное влияние структуры спектра рассмотрено в работах [10, 11]. Экспериментальных данных по влиянию ширины полосы нагружения практически нет.

Для получения процессов нагружения с различными значениями параметра широкополосности β создавались спектры воздействия, возбуждающие испытуемые образцы на двух первых собственных частотах. В этом случае реакция изделия представляет собой случайный процесс, состоящий из двух узкополосных случайных процессов с центральными частотами f_{01} и f_{02} и средними квадратическими значениями воздействия σ_1 и σ_2 . Такое возбуждение позволяет создавать случайные процессы нагружения с различными значениями параметра β . Его величину в этом случае определяли согласно [6] из выражения

$$\beta = \frac{\sqrt{(1 + \gamma^2)(1 + \gamma^2\theta^2)}}{(1 + \gamma^2\theta^2)}, \quad (2)$$

где $\gamma = \sigma_1 / \sigma_2$; $\theta = f_{01} / f_{02}$.

В качестве испытуемых объектов служили жестко закрепленные одним концом в приспособлении на столе вибростенда плоские консольные образцы из меди М2, в которых возбуждались резонансные изгибные колебания на двух первых собственных частотах. Размеры образцов таковы: длина свободного участка — 110 мм, ширина — 10 мм и толщина — 2 мм. Для создания опасного сечения размером 4×2 мм в образцах сделаны выборки радиусом 20 мм, расстояние от свободного конца до опасного сечения составляет 100 мм. Средние значения первой и второй собственных частот колебаний образцов были равны соответственно 56 и 410 Гц. Реакцию воздействия на образцах определяли в механических напряжениях. Измерения напряжений в образцах осуществляли с помощью наклеенных в опасном сечении тензодатчиков типа 2Ф КЛА33-100В по показаниям универсального цифрового вольтметра В7-27 и осциллографа Н102. Случайные воздействия создавали в двух полосах, захватывающих собственные частоты колебаний образцов 40...80 и 350...450 Гц при значениях спектральных плотностей мощности в этих полосах, равных соответственно S_1 и S_2 в $g^2/\text{Гц}$.

Предварительно были протарированы с помощью тензомоста ТА-5975 показания тензодатчиков на измерительных приборах при статическом нагружении испытываемых образцов. Напряжение в опасном сечении рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{Mu}{W} = \frac{F \cdot l}{(bh^2 / \delta)},$$

где F — груз на образце, Н; l — расстояние от точки приложения груза до опасного сечения в мм;

b, h — ширина и толщина опасного сечения, мм. Для каждой полосы частот случайного нагружения строили экспериментальные зависимости изменения напряжения на образце в МПа от воздействия S в $g^2/Гц$:

$$\sigma_i = K_i \sqrt{S_i}, \quad (3)$$

где K_i — коэффициент пропорциональности.

Для оценки предельного уровня нагружения, при котором возможно изменение механизма повреждения, т. е. переход от много- к малоцикло- вой усталости, предварительно определяли характеристики усталости при регулярном нагружении. Образцы испытывали на резонансной частоте с разными фиксированными уровнями гармонического воздействия. Сравнивая результаты испытаний при разных уровнях нагружения, определили: параметр угла наклона степенного уравнения кривой усталости $m = 5,28$, предел ограниченной выносливости при $N_8 = 5 \cdot 10^5$ циклов равен 145 МПа.

Среднее квадратическое (эффективное) значение напряжения, получаемого при возбуждении колебаний образцов в двух полосах частот, определяли как

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2. \quad (4)$$

Для всех исследуемых режимов нагружения приняли $\sigma = 110$ МПа, что гарантировало многоцикловое усталостное повреждение при проведении испытаний.

Планирование испытательных режимов осуществляли следующим образом: задавали режим, т. е. величину β при $\sigma = 110$ МПа. Далее из выражения (2) определяли величину γ , т. е. отношение составляющих уровня нагружения, затем из уравнения (4) рассчитывали средние квадратичные значения σ_1 и σ_2 . Спектральные плотности мощности находили, используя тарировочные зависимости (3), ранее полученные экспериментально.

Образцы испытывали партиями по 10 штук. Долговечность T принимали в качестве среднего времени до разрушения всех элементов партии.

Режимы испытаний при постоянном значении среднеквадратичного значения напряжения ($\sigma = 110$ МПа), разных величинах параметра β и соответствующие им долговечности приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты испытаний плоских медных образцов при случайных воздействиях ($\beta \neq \text{const}$; $\sigma = \text{const}$)
Table 1 — Results of tests of flat copper samples at random influences ($\beta \neq \text{const}$; $\sigma = \text{const}$)

$S_1, g^2/Гц$	$S_2, g^2/Гц$	β	$T, \text{мин}$
1,15	0	1,0	245
0,90	4,7	2,0	180
0,94	3,8	2,28	167
1,02	2,4	2,71	160
1,04	1,8	3,0	145
1,06	1,4	3,18	136
1,08	1,1	3,44	133

Вид уравнения связи долговечности T с параметром β устанавливали с помощью регрессивного анализа результатов испытаний. Коэффициенты уравнения

$$y = b_0 + b_1 x \quad (5)$$

находили для зависимостей, где в качестве переменных y и x использовали следующие сочетания преобразований:

$$y = T, x = \beta; \quad (6)$$

$$y = \ln T, x = \beta; \quad (7)$$

$$y = \ln T, x = \ln \beta; \quad (8)$$

$$y = T, x = \ln \beta. \quad (9)$$

Применение этих преобразований позволило получить коэффициенты линейного, показательного и степенного уравнений, а также оценить точность представления экспериментальных данных этими уравнениями. Точность оценивали по величине суммы квадратов отклонений между экспериментальной и расчетной значениями долговечности. Чем меньше эта величина, тем точнее рассчитанная по выбранной зависимости долговечность соответствует результату эксперимента.

Результаты расчета приведены в таблице 2. Как видно, наиболее точно описывают эксперимент зависимости (8) и (9). Более удобной для использования в практических расчетах является степенная зависимость (8). В этом случае уравнение связи долговечности с параметрами спектра случайного воздействия с учетом степенной зави-

Таблица 2 — Определение коэффициентов регрессии уравнений связи $T = f(\beta)$ при $\sigma = \text{const}$
Table 2 — Determination of regression coefficients of coupling equations $T = f(\beta)$ with $\sigma = \text{const}$

Зависимости	b_0	b_1	Уравнение связи	$\Sigma(T_s - T_p)^2$
(a)	280,1	-45,13	$T = b_0 + b_1 \beta$	431
(b)	5,72	-0,25	$T = \exp(b_0) \cdot (b_1 \beta)$	156
(c)	5,52	-0,49	$T = \exp(b_0) \beta^{b_1}$	111
(d)	244,44	-90,76	$T = b_0 + b_1 \ln \beta$	66

Таблица 3 — Сравнение расчетной T_p по формуле (10) и экспериментальной T_s долговечностей при испытании медных образцов

Table 3 — Comparison of calculated T_p by formula (10) and experimental T_s of durability at copper samples testing

Режим		T_s , мин	T_p , мин	Δ , %
σ , МПа	β			
135	1,0	130	130	0
110	1,0	245	246	0,4
120	2,28	131	125	4,5
120	3,44	98	102	3,0

симости долговечности от величины нагрузки (1) можно представить в виде

$$T\sigma^m\beta^n = \text{const}, \quad (10)$$

где n — показатель, определяемый экспериментально.

Для проверки предложенного уравнения (10) проведены испытания на режимах, отличных от приведенных в таблице 1. По результатам испытаний определяли параметры уравнения (10). Значения долговечностей, рассчитанных по формуле (10) и полученных экспериментально, представлены в таблице 3.

Параметр m уравнения (10) определили, сравнив результаты испытаний при одинаковой структуре спектра, т. е. результаты 1-й и 2-й партий из таблицы 3:

$$m = \frac{\ln T_{s2} - \ln T_{s1}}{\ln \sigma_1 - \ln \sigma_2},$$

где T_{s1} , T_{s2} — долговечность образцов при уровнях воздействия σ_1 и σ_2 , соответственно. Он равен 3,12, а при действии гармонических вибраций, как отмечено выше, он равен 5,28.

Сравнив результаты испытаний третьей и четвертой партий образцов из таблицы 3, определили параметр n , который равен 0,49.

SURIN Vitaliy M., D. Sc. in Eng., Prof.

Professor¹

E-mail: kaftm@bsuir.by

DZERZHINSKIY Stanislav M., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Associate Professor²

E-mail: fzindo@bsac.by

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Academy of Telecommunications, Minsk, Republic of Belarus

Сопоставление расчетных и полученных экспериментально долговечностей, оценка погрешности Δ определения величины T свидетельствует о возможности использования зависимости (10) для расчета долговечности при случайных воздействиях с учетом не только уровня воздействия, но и параметра широкополосности процесса нагружения.

Список литературы

1. Когаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев. — М.: Машиностроение, 1977. — 230 с.
2. Виршинг Исследование усталости, вызываемой действием широкополосных случайных напряжений при помощи метода стекающей дождевой воды / Виршинг, Шехата // Теоретические основы инженерных расчетов. — 1977. — № 3. — С. 13–20.
3. Почтенный, Е.К. Оценка ресурса конструкций на сопротивление усталости при типовых режимах эксплуатации в условиях случайного частотного нагружения / Е.К. Почтенный. С.М. Минюкович. А.В. Шмелев // Вестн. машиностроения. — 2006. — № 8. — С. 13–19.
4. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н.А. Махутов. — Новосибирск: Наука, 2008. — 528 с.
5. Ленк, А. Механические испытания приборов и аппаратов / А. Ленк. Ю. Рениц. — М.: Мир, 1976. — 270 с.
6. Кузьменко, В.А. Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения / В.А. Кузьменко. И.В. Васинюк. Б.З. Крук. — Киев: Наук. думка, 1986. — 264 с.
7. Гусев, А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках / А.С. Гусев. — М.: Машиностроение, 1989. — 244 с.
8. Сурин, В.М. Сравнение режимов стеновых испытаний изделий на вибропрочность / В.М. Сурин. С.М. Держинский // Вестн. машиностроения. — 2008. — № 10. — С. 22–25.
9. Держинский, С.М. Долговечность электронных элементов, испытываемых на вибропрочность / С.М. Держинский. В.М. Сурин // Проблемы инфокоммуникаций. — 2015. — № 1. — С. 62–65.
10. Арутюнов, С.К. О влиянии формы спектра вибрационного воздействия на вибронгруженность объектов / С.К. Арутюнов. Н.И. Овчинников // Проблемы прочности. — 1991. — № 2. — С. 120–124.
11. Шефер, Л.А. Влияние характера структуры случайных процессов на долговечность / Л.А. Шефер. В.Г. Ежов // Проблемы прочности. — 1978. — № 7. — С. 38–42.

Received 30 November 2018.

ON CYCLIC LIFE EVALUATION OF PRODUCTS AT RANDOM LOAD

An experimental study of the influence of the rms value and the broadband parameter of the random load on the durability of the elements of the products is carried out. According to the test results, the dependence of the

durability on the broadband parameter is proposed. The accuracy of the correspondence of the data calculated by the proposed dependence with the experimental results is evaluated.

Keywords: random loads, cyclic life, tests, broadband parameter

References

1. Kogaev V.P. *Raschety na prochnost pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Strength calculations at voltages variable in time]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 230 p.
2. Virshing, Shekhata. *Issledovanie ustalosti, vyzyvayemoy deystviem shirokopolosnykh sluchaynykh napryazheniy pri pomoshchi metoda stekayushchey dozhdevoy vody* [Investigation of fatigue caused by the action of broadband random stresses using the method of flowing rainwater]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov* [Theoretical Foundations of Engineering Calculations], 1977, no. 3. pp. 13–20.
3. Pochtennyy E.K., Minyukovich S.M., Shmialiou A.V. *Otsenka resursa konstruktсий na soprotivlenie ustalosti pri tipovykh rezhimakh ekspluatatsii v usloviyakh sluchaynogo chastotnogo nagruzheniya* [Assessment of the life of structures for fatigue resistance with typical operating modes under conditions of random frequency loading]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2006, no. 8, pp. 13–19.
4. Makhutov N.A. *Prochnost i bezopasnost: fundamentalnyye i prikladnyye issledovaniya* [Strength and safety: fundamental and applied research]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008. 528 p.
5. Lenk A., Rehnitz J. *Schwingungsprüftechnik*. Berlin, VEB Verlag Technik, 1974. 204 p.
6. Kuzmenko V.A., Vasinyuk I.V., Kruk B.Z. *Mnogotsiklovaya ustalost pri peremennykh amplitudakh nagruzheniya* [High-cycle fatigue at variable loading amplitudes]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1986. 264 p.
7. Gusev A.S. *Soprotivlenie ustalosti i zhivuchest konstruktсий pri sluchaynykh nagruzkakh* [Fatigue resistance and survivability of structures under random loads]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 244 p.
8. Surin V.M., Dzerzhinskiy S.M. *Sravnienie rezhimov stendovykh ispytaniy izdeliy na vibroprochnost* [Comparative analysis of vibrational-strength tests]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2008, no. 10, pp. 22–25.
9. Dzerzhinskiy S.M., Surin V.M. *Dolgovechnost elektronnykh elementov, ispytyvaemykh na vibroprochnost* [Durability of electronic components tested for vibration strength]. *Problemy infokommunikatsiy* [Problems of infocommunications], 2015, no. 1, pp. 62–65.
10. Arutyunov S.K., Ovchinnikov N.I. *O vliyaniy formy spektra vibratsionnogo vozdeystviya na vibronagruzhennost obektov* [On the influence of the shape of the spectrum of vibration impact on the vibration load of objects]. *Problemy prochnosti* [Problems of strength], 1991, no. 2, pp. 120–124.
11. Shefer L.A., Ezhov V.G. *Vliyanie kharaktera struktury sluchaynykh protsessov na dolgovechnost* [Influence of the nature of the structure of random processes on the durability]. *Problemy prochnosti* [Problems of strength], 1978, no. 7, pp. 38–42.