УДК 621.37/629.78

DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-12

УЧЕТ СЛУЧАЙНОСТИ НАГРУЗКИ И ПРОЧНОСТИ В РАСЧЕТАХ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ОБОРОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ

Н. А. Северцев, А. А. Зацаринный

Введение

Для расчета на прочность при переменных нагрузках в случае сложного напряженного состояния можно использовать соответствующие теории прочности. В подавляющем большинстве случаев расчеты на прочность деталей, работающих при переменных напряжениях, выполняют как проверочные. При этом расчет производят в форме проверки расчетного (действительного) коэффициента запаса прочности для каждого из предположительно опасных сечений детали и сравнении его с допускаемым значением для данной конструкции.

Результаты статических испытаний и испытаний на удар дают возможность только до некоторой степени судить о способности материала переносить длительно действующую переменную нагрузку. Для определения этой важной характеристики материала, нужной для расчета на прочность машин и сооружений, работающих при переменных напряжениях, производят особое испытание материала, называемое испытанием на выносливость или на усталость.

Пусть на характеристику X_i сложной динамической системы (СДС) задан допуск в следующих границах $a_i \le \bar{x}_i \le b_i$, где $\bar{x}_i$ – случайная величина. Обозначим $p_i = P(a_i \le \bar{x}_i \le b_i)$. Тогда вероятность нахождения характеристики X_i, находящейся в допуске $[a_i, b_i]$, определится как $p_i = 1 - q_i$, где $q_i = P(X_i \notin [a_i, b_i])$ – вероятность того, что требования в технической документации не выполняются. Событие $X_i \notin [a_i, b_i]$ будем в дальнейшем называть неисправностью СДС по i-й характеристике. В определенных случаях это событие может привести к выходу из строя исследуемой СДС, и это будет ее отказ. Во многих случаях оказывается, что при выходе данной характеристики X_i, например, реактивного двигателя, за допуск, т.е. $X_i \notin [a_i, b_i]$, задача СДС может быть не выполнена или будет затруднено ее выполнение. Вероятность безотказной работы СДС по характеристике X_i определяется как $p_i = 1 - q_i\ \eta_i$, где η_i определяется соотношением

$$\eta_i = p(A/A_i). \qquad (1)$$

Данное соотношение (1) представляет собой условную вероятность A, которое состоит в не выполнении СДС предназначенных функций на заданном интервале времени $[0, T]$ при условии, что имела место неисправность i-го элемента СДС. Вероятность события A вычисляется при условии, что $X_i \notin [a_i, b_i]$, т.е. при выходе X_i за установленный допуск $[a_i, b_i]$. Число η_i изменяется в пределах $0 \le \eta_i \le 1$ и называется коэффициентом неисправности $X_i \notin [a_i, b_i]$.

Рассмотрим частные случаи.

1. Характеристика X_i СДС такая, что при выходе X_i за установленный допуск ($X_i \notin [a_i, b_i]$) СДС не выполняет предназначенные задачи. Тогда вероятность $\eta_i = p(A/A_i) = 1$, а значит, $p_i = 1 - q_i\ \eta_i = 1 - q_i$, т.е. $p_i = P(a_i \le X_i \le b_i)$.

2. Характеристика X_i СДС такая, что при выходе X_i за установленный допуск (т.е. при $X_i \notin [a_i, b_i]$) СДС выполняет возложенные на нее функции. В такой ситуации вероятность $\eta_i = p(A/A_i) = 0$, а значит, $p_i = q_i \eta_i = 1$. Рассмотренные случаи являются крайними. Обобщенное же направление, при котором $p_i = q_i \eta_i$, является средним в том смысле, что $1 - q_i \le p_i = 1 - q_i \eta_i \le 1$. Будем полагать, что значение вероятности q_i найдено, характеризующее невыполнение требования по допуску на величину X_i, равное $q_i = 0{,}4$. Тогда если не учитывать коэффициенты η_i значимости неисправности СДС $X_i \in [a, b]$, то вероятность выполнения требований с учетом допуска $p_i = 1 - q_i = 1 - 0{,}4 = 0{,}6$. Пусть теперь по результатам моделирования процесса функционирования СДС найдено значение коэффициента η_i, которое оказалось равным $\eta_i = 0{,}2$. Тогда $p_i = 1 - q_i \eta_i = 1 - 0{,}4 \cdot 0{,}2 = 1 - 0{,}08 = 0{,}92$. По данному примеру следует вывод.

При расчете вероятности успешной работы СДС необходимо учитывать значения весовых коэффициентов η_i (коэффициоентов значимости неисправностей) [1]. В случае их неучета будет занижено фактическое значение вероятности p_i, что приведет к ошибкам в расчетах, которые только при нахождении одной из вероятностей $p_i = P(X_i \notin [a_i, b_i])$ могут составлять величину равную $\varepsilon = 100\ \% \ (q_i - q_i \eta_i) / q_i$ или $\varepsilon = 100\ \% \ (1 - \eta_i)$. В частности, в условиях рассмотренного примера, ошибка от неучета указанного коэффициента составила бы величину $\varepsilon = 100\ \% \ (1 - \eta_i) = (1 - 0{,}2)\ 100\ \% = 20\ \%$. Предположим, что для каждой из характеристик изучаемой СДС определено значение вероятности p_i выполнения требований $X_i \in [a, b]$, определенной в техническом задании по допуску с учетом коэффициентов η_i значимости неисправности $X_i \not\subset [a, b]$. Тогда вероятностный показатель безаварийной работы СДС может быть найден по формуле

$$P_{\text{ба}} = p_0\,(1 - q_1 \eta_1)\,(1 - q_2 \eta_2)\,...\,(1 - q_N \eta_N) \tag{2}$$

или $R = p_0 \prod_{i=1}^{N} p_i$, где $p_i = 1 - q_i \eta_i$. При этом p_0 – вероятность выполнения задачи системой в целом, на заданном интервале времени $[0, T]$, определяется при условии, что все характеристики СДС находятся в установленных допусках. Значение p_0, т.е. вероятность выполнения предназначенной задачи в целом на заданном интервале времени $[0, T]$ определяется при условии, что все характеристики системы находятся в установленных допусках. Значение p_0 определяется по результатам моделирования процесса функционирования СДС на интервале времени $[0, T]$.

Рассмотрим некоторые из возможных путей учета в моделях расчета работоспособности системы (надежности, безопасности и эффективности) при стохастическом характере физических переменных: нагрузки $\hat{u}$, сопротивляемости $\hat{x}$, являющихся характеристиками предельного состояния объекта, иначе системы, которую мы исследуем. К этой сложной технической динамической системе относятся транспортный водный корабль, летательные аппараты различных типов и другое, а также комплектующие их элементы, агрегаты, устройства и пр. [2].

Под предельным состоянием исследуемой системы понимается такое ее состояние, при котором она не может воспринимать действующую на нее нагрузку, т.е. происходит отказ. В общем случае на исследуемую систему действует множество различных по физической природе нагрузок, которых мы представляем m-мерным случайным вектором $\overline{U}_{<m>} = <\overline{u}_1, \overline{u}_2, ..., \overline{u}_j, ..., \overline{u}_m>$.

Любая нагрузка, действующая на объект, воспринимается благодаря свойству объекта, «сопротивляемостью» (т.е. прочностью) этим нагрузкам. Эти свойства придаются системе и ее комплектующим в процессе ее создания и отработки, а число таких свойств соответствует числу нагрузок, действующих на систему при эксплуатации ее в соответствующих физических средах. Поэтому сопротивляемость (прочность) системы также может быть выражена m-мерным случайным вектором $\overline{X}_{<m>} = <\overline{x}_1, \overline{x}_2, ..., \overline{x}_j, ..., \overline{x}_m>$, т.е. вектором сопротивляемости [2].

Для упрощения исследования обозначим главные компоненты вектора нагрузки и вектора сопротивляемости в виде $\overline{X}_{<m>}$ и $\overline{U}_{<m>}$. Здесь «главные» компоненты $\overline{x}$ и $\overline{u}$ векторов $\overline{X}_{<m>}$ и $\overline{U}_{<m>}$, соответственно, $\overline{x}$ и $\overline{u}$, на остальные составляющие векторов $\overline{X}_{<m>}$ и $\overline{U}_{<m>}$ наложены ограничения $x_j <> y_i$ [$j = 2(1)m$], которые заведомо выполняются. При такой постановке задачи рассматривается возможность достижения предельного состояния только по одному типу нагрузки, действующей на объект, т.е. возможность наступления отказа определенной физической природы. Такой подход называют методом главной компоненты [1], подразумевая под этим выделение определяющих предельное состояние объекта характеристик и считая, что требования по другим «m–1», составляющим качества объекта, удовлетворены, т.е. они находятся в заданных пределах, не вызывающих опасности отказа. Условие (критерий) безопасной работы исследуемого (механического) объекта или условие «недостижения» объектом предельного состояния в этом случае интерпретируется как условие «непревышения» действующей нагрузкой предельной величины свойства объекта сопротивляемости этой нагрузке, т.е. условие непревышения сопротивляемости. Условие «непревышения» записывается в следующем виде: $\overline{z} = (\overline{x} - \overline{u}) > 0$ (3). Это условие является критерием работоспособности и надежности исследуемой СДС (объекта). Тогда весь интервал возможных значений величины z можно разделить на две области: $z \geq 0$ – область безотказных состояний системы (объекта), $z < 0$ – область отказов. Для транспортных судов область отказов следует ранжировать и выявить такие отказы, которые могут привести к опасностям и аварийным ситуациям [3].

Показателями безопасной надежной работы системы (объекта), соответствующими критерию (3), будут:

– вероятность безотказной работы исследуемой системы (объекта):

$$P(\overline{u} \leq x) = P(z \geq 0) = \int_0^\infty \phi_{\overline{z}}(z)dz\,; \tag{4}$$

– вероятность отказа:

$$P(\overline{u} > \overline{x}) = P(\overline{z} < 0) = \int_{-\infty}^0 \phi_{\overline{z}}(z)dz\,. \tag{5}$$

Когда надежность и безопасность высоки, то интегрирование «хвоста» функции плотности распределения $\phi_{\overline{z}}(z)$ по формуле (5) в вычислении затруднительно. В этом случае можно использовать (4) управляющей вычисления интеграла [4].

Расчитанное значение вероятности «непревышения» сравнивается с нормативным значением показателя надежности $P(\overline{z} \geq 0) \geq (P_н)$ (6), где н – нормативное (заданное) значение показателя надежности системы (объекта).

Рассмотренный методологический подход основан на переходе от описания случайного события $\overline{A}(\overline{x} - \overline{u})$, выраженного в форме двуместного дважды неопреденного предиката, к одноместному предикату $\overline{A}(\overline{z} < 0)$ или $\overline{A}(\overline{z} \geq 0)$.

Такой подход характерен для моделей расчета надежности, не учитывающих зависимости показателя надежности от времени [1].

Модель расчета надежности по критерию отказа, аргументом которого является величина отношения сопротивляемости к нагрузке

$$\overline{k} = \overline{x} / \overline{u}\,, \tag{7}$$

где $\overline{k}$ – коэффициент запаса, который является случайной величиной (СВ), в отличие от коэффициента прочности $R = \overline{x} / \overline{u}$, представляющей собой отношение средних величин [5].

Если плотность распределения $\overline{k}$ известна – это достаточно сложная задача с нелинейным преобразованием распределений случайных величин, стоящих в числителе и знаменателе отношения (7), то вероятность наступления предельного состояния можно определить как [6]

$$P(\overline{k} < 1) = \int_0^1 \phi_{\overline{k}} dk\,. \tag{8}$$

Сопротивляемость исследуемой системы (объекта) должна отражать его способность сопротивляться действующим нагрузкам как единого целого. Это означает, что независимо от геометрического места проявления отказа в исследуемой системе (объекте) предельное значение нагрузки является характеристикой его сопротивляемости как целого, а не сопротивляемости той его части, в которой произошло разрушение. В этом случае, когда на некоторую группу элементов, агрегатов, устройств сложной технической динамической системы действует одна и та же нагрузка, а характеристики сопротивляемости этих элементов, агрегатов, устройств этой нагрузки различны и равны соответственно $\overline{x}_1, \overline{x}_2, ..., \overline{x}_j, ..., \overline{x}_m$, то совместная плотность распределения сопротивляемости системы (объекта) может быть представлена распределением смеси

$$\phi_{\overline{x}_1, \overline{x}_2, ..., \overline{x}_m}(x) = \eta_1 \phi_{\overline{x}_1}(x) + \eta_2 \phi_{\overline{x}2}(x) + ... + \eta_m \phi_{\overline{x}m}(x), \tag{9}$$

где $\sum_{i=1}^{m} \eta_i = 1$, η_i – весовый коэффициент, определяющий долю элементов, агрегатов, устройств с данной плотностью распределения сопротивляемости i-го элемента в системе; $\phi_{\overline{x}_i}$ – плотность распределения сопротивляемости i-го элемента (агрегата, устройства).

Модель расчета надежности по величине разности (СВ) нагрузки $\overline{u}$ и сопротивляемости $\overline{x}$.

Более информационной моделью по сравнению с вышерассмотренной является модель расчета показателей надежности, построенная на основе описания отказа в форме двуместного неопределенного предиката [7]

$$\overline{A}_{\overline{x}}(\overline{x} - \overline{u}),$$

где $\overline{A}_{\overline{x}}$ – случайное событие, зависящее от (СВ) $\overline{x}$. Предикат, т.е. выскаживание $x > u$ относительно возможности безаварийной и безотказной работы системы (объекта), в данном случае становится дважды неопределенным [1]. (Случайное событие $\overline{A}_{\overline{x}}(\overline{u} > \overline{x})$ – условие отказа, а случайное событие $\overline{\overline{A}}_{\overline{x}}(\overline{u} > \overline{x})$ – условие безотказной работы).

Задача. Определить вероятность события $\overline{\overline{A}}_{\overline{x}}$. Для решения этой задачи надо найти закон совместного распределения случайного вектора $<\overline{u}, \overline{x}>$. Предположим, что плотность совместного распределения $\phi_{<\overline{u},\overline{x}>}(\overline{u},\overline{x})$ СВ $\overline{x}$ и $\overline{u}$ известна. Тогда вычисления вероятности события $\overline{\overline{A}}_{\overline{x}}$ можно осуществить по формуле [1]

$$\mathrm{P}(\overline{\overline{A}}_{\overline{x}}) = \mathrm{P}(\overline{u} \le \overline{x}) = \mathrm{P}(<\overline{u}, \overline{x}> \in (\mathrm{H})) = \iint_{(H)} \phi_{<\overline{u},\overline{x}>}(u,x)\,du\,dx, \tag{10}$$

где $(H) = \{ <u, x>: u < x\}$ – область, в которой выполняется условие $u \le x$.

Преобразуем (10) к одной из следующих форм:

$$P(\overline{u} \le \overline{x}) = \iint_{(H)} \phi_{<\overline{u},\overline{x}>}(u,x)\,du\,dx = \iint_{(u \le x)} \phi_{<\overline{u},\overline{x}>}(u,x)\,du\,dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{\overline{x}}(x) \left[\int_{-\infty}^{x} \phi_{\overline{u}/\overline{x}}(u;x)\,du \right] dx = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\overline{u}/\overline{x}}(x;x)\,dF_{\overline{x}}(x), \tag{11}$$

где $\phi_{\overline{u}/\overline{x}}(u;x)$ и $F_{\overline{u}/\overline{x}}(u;x)$ соответственно условная плотность и условная функция распределения случайной переменной $\overline{u}$ относительно $\overline{x}$.

Другой формой выражения (10) является

$$P(\overline{x} > \overline{u}) = \iint_{(H)} \phi_{<\overline{u},\overline{x}>}(u,x)\,du\,dx = \iint_{(x > u)} \phi_{<\overline{u},\overline{x}>}(u,x)\,du\,dx =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \phi_{\overline{u}}(u) \left[\int_{u}^{\infty} \phi_{\overline{x}/\overline{u}}(x;u)\,dx \right] du = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\overline{x}/\overline{u}}(u;u)\,dR_{\overline{u}}(u), \tag{12}$$

где $\phi_{\overline{x}/\overline{u}}(x;u)$ $R_{\overline{x}/\overline{u}}(x;u)$ соответственно условная плотность и условная дополнительная функция распределения случайной переменной $\overline{x}$ относительно $\overline{u}$. Оба выражения (11) и (12) служат для определения искомой вероятности $P(\hat{u} \le \hat{x})$ и дают один и тот же результат. Однако при рассмотрении различных моделей типа «нагрузка – сопротивляемость» в основном будет использоваться выражение (10). Это связано со спецификой изменения нагрузок и сопротивляемости исследуемых объектов. Величину, изображенную в (12), можно трактовать как вероятность того, что отказ не произойдет (событие $\bar{\bar{A}}_{\bar{x}}$), если СВ нагрузка $\bar{u}$ в процессе работы системы (объекта) она примет некоторое значение, равное или меньше некоторого (неопределенного) значения сопротивляемости $\bar{x}$. Выражение (11) трактуется так: вероятность того, что отказ не произойдет (событие $\bar{\bar{A}}_{\bar{x}}$), если СВ сопротивляемости $\bar{x}$ примет некоторое значение x, больше некоторой СВ $\bar{u}$. Наиболее важным для практических приложений является случай, когда нагрузка и сопротивляемость не зависят друг от друга. При этом случайные величины $\bar{x}$ и $\bar{u}$ независимы, и формулы (11) и (12) принимают вид

$$P(\bar{u} \le \bar{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\bar{u}}(x) dF_{\bar{x}}(x); \tag{13}$$

$$P(\bar{x} > \bar{u}) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\bar{x}}(u) dR_{\bar{u}}(u). \tag{14}$$

Если между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами существует взаимное однозначное соответствие, то плотность распределения сопротивляемости может быть выражена через эти параметры. В этих случаях для получения закона распределения сопротивляемости широко используется метод линеаризации или метод малых возмущений. Сущность метода линеаризации заключается в аппроксимации нелинейной, в общем случае, зависимости между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами, линейной статистически эквивалентной исходной зависимости. В основу метода положено допущение о малости случайных отклонений возмущающих параметров z_j от их математических ожиданий $m_{\bar{z}_j}$ и допущение о нормальных законах распределения этих отклонений. Поэтому метод линеаризации особенно эффективен, если между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами существует однозначная функциональная зависимость $x = f(z_j)$, где $j = 1(1)m$. Разлагая функцию связи между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами в ряд Тейлора в окрестности точки (m_{z1}, m_{z2}, ..., m_{zm}) относительно центрированных возмущений и сохраняя только линейные члены разложения, получим

$$X \cong \left(m_{z_1}, m_{z_2}, ..., m_{z_m}\right) + \sum_{j=1}^{m} \left({\partial f}/{\partial z_j} \right)_m z_j . \tag{15}$$

По теоремам о математическом ожидании и дисперсии находим

$$m_X \cong f\left(m_{z_1}, m_{z_2}, ..., m_{z_m}\right), \tag{16}$$

$$\sigma_X = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)_m^2 + \sigma_{z_j}^2 + 2\sum_{j<i} \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)_m \left(\frac{\partial f}{\partial z_i} \right)_m r_{z_j z_i} \sigma_{z_j} \sigma_{z_i}} , \tag{17}$$

где $r_{z_j z_i}$ – коэффициент корреляции величин z_j и z_i.

Производные $\partial f / \partial z_j$ – это коэффициенты влияния возмущений z_j на величину сопротивляемости X. Если корреляции между величинами z_j и z_i отсутствуют, то формула (17) примет вид

$$\sigma_X = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{\partial f}{\partial z_j} \right)_m^2 \sigma_{z_j}^2} . \tag{18}$$

Таким образом, получаем модель расчета надежности функционирования сложной технической системы, выраженной в форме случайности события в форме двуместного дважды неопределенного предиката.

Библиографический список

1. Игнатов, Г. Н. Характерные отказы двигателей большого ресурса / Г. Н. Игнатов, В. В. Татаринов // Труды ВНТК по совершенствованию методов технической эксплуатации авиационной техники. – Киев : КНИГА, 1984. – 240 с.
2. Северцев, Н. А. Системный анализ и моделирование безопасности / Н. А. Северцев, В. К. Дедков. – М. : Высш. шк., 2006. – 380 с.
3. Северцев, Н. А. Статистическая теория подобия в безопасности и надежности динамических систем / Н. А. Северцев. – М. : Радиотехника, 2016. – 399 с.
4. Катулев, А. Н. Метод оценки классической устойчивости не по Ляпунову функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 45–47.
5. Катулев, А. Н. Алгоритм и результаты оценки структурной безопасности функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев, И. В. Прокопьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 97–99.
6. Полтавский, А. В. Информационная система: управление замещением критерия / А. В. Полтавский, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4 (16). – С. 20–25.
7. Катулев, А. Н. Метод оценки показателей структурной безопасности функционирования нелинейных автономных динамических систем / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 3–8.

Северцев Николай Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской Академии Наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: safsyst@mail.ru

Severtsev Nikolay Alekseevich
doctor of technical sciences, professor,
head of division of safety and nonlinear analysis,
Federal research center
«Computer science and control» of RAS
(Dorodnitsyn computer center
of the Russian Academy of Sciences)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Зацаринный Александр Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
заместитель директора по научной работе,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской Академии Наук (ФИЦ ИУ РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40)
E-mail: azatsarinny@ipiran.ru

Zatsarinnyy Aleksandr Alekseevich
doctor of technical sciences, professor,
deputy director on scientific work,
Federal research center
«Computer science and control»
of Russian Academy Of Sciences (FRC CsC RAS)
(119333, 40 Vavilova street, Moscow, Russia)

Аннотация. Для обеспечения безопасной работы механических систем в условиях случайности нагрузки актуальна задача оценки надежности конструкций сложных технических систем. Для ее решения необходимо разработать модель расчета надежности случайного события, которую можно представить в форме двуместного дважды неопределенного предиката. Показано, что в случае наличия взаимно однозначного соответствия между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами, плотность распределения сопротивляемости может быть выражена через эти параметры. Для получения закона распределения сопротивляемости используется метод линеаризации или метод малых возмущений, сущность которого заключается в аппроксимации нелинейной зависимости между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами, с помощью линейной

Abstract. To ensure the safe operation of mechanical systems under conditions of randomness of load, the task of evaluating the reliability of structures of complex technical systems is urgent. To solve it, it is necessary to develop a model for calculating the reliability of a random event, which can be represented in the form of a two-place double-indefinite predicate. It is shown that in the case of a one-to-one correspondence between the resistance and the measured parameters, the distribution density of resistivity can be expressed through these parameters. To obtain the law of resistivity distribution, the linearization method or the method of small perturbations is used, the essence of which is to approximate the nonlinear relationship between the resistance and the measured parameters, using a linear statistically equivalent initial dependence. It is shown that under conditions of smallness of random deviations of disturbing parameстатистически эквивалентной исходной зависимости. Показано, что в условиях малости случайных отклонений возмущающих параметров от их математических ожиданий справедливо допущение о нормальных законах распределения этих отклонений. Метод линеаризации особенно эффективен, если между сопротивляемостью и измеряемыми параметрами существует однозначная функциональная зависимость. Синтезирована модель расчета надежности функционирования сложной технической системы, выраженной в форме случайности события в форме двуместного дважды неопределенного предиката. Таким образом, разработана методология определения надежности при случайных нагрузках и случайной сопротивляемости сложных технических систем и их элементов.

Ключевые слова: надежность, случайность, нагрузка, сопротивляемость, система, событие, вероятность.

ters from their mathematical expectations, the assumption of the normal distribution laws of these deviations is valid. Therefore, the linearization method is especially effective if there is a unique functional dependence between the resistance and the measured parameters. A model is developed for calculating the reliability of a complex technical system, expressed in the form of a random event in the form of a two-place double-indefinite predicate. Thus, a methodology has been developed for determining the reliability for random loads and the random resistance of complex technical systems and their elements.

Key words: reliability, randomness, load, resistance, system, event, probability.

УДК 621.37/629.78

Северцев, Н. А.

Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы / Н. А. Северцев, А. А. Зацаринный // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 90–96. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-12.