

С.И. Коршаковский

(Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики; e-mail: korshakovsky.mirea@gmail.com)

ПРИНЦИП ЛЕ-ШАТЕЛЬЕ В НОВОЙ ТЕОРИИ ТЕХНОГЕННЫХ КАТАСТРОФ

Предложены критерии оценки техногенного риска при возможных отказах элементов технического объекта, которые могут привести к авариям. Проведён анализ причин возможных отказов.

Ключевые слова: безопасность, техногенные катастрофы, степень техногенного риска, статистика.

S.I. Korshakovsky

THE PRINCIPLE BY LE-SHATELJE IN THE NEW THEORY OF TECHNOLOGICAL CATASTROPHES

An estimation criterion of technological risk of possible failures of elements of the technical object which can lead to accidents has been proposed. Analysis of possible failure reasons.

Key words: safety, technological catastrophes, degree of technological risk, statistics.

Введение

В проблеме обеспечения технической безопасности энергоёмких объектов техники, в частности – авиакосмической техники, успех в решении задачи зависит от безотказности её работы, надёжность которой как в типовых, так и в экстремальных условиях во многом зависит от степени её защиты от воздействия негативных внешних и внутренних факторов.

Любой технический объект состоит из набора элементов, функционирующих при определённых технических параметрах, каждый из которых имеет определённый коридор возможных отклонений от штатных режимов. Этот коридор отклонений, или поле допусков, имеет первостепенное значение для поиска новых критериев, позволяющих оценить степень техногенного риска отказов его отдельных узлов, а также надёжность функционирования объекта в целом. В то же время создание системы его аварийной защиты связано с определёнными трудностями как при разработке методов неразрушающего контроля, так и при их инструментальном обеспечении диагностическими средствами [1-5]. Прежде всего, это определяется необходимостью обеспечения оптимальных условий сопряжения внешних устройств (датчики, коммуникации, инфраструктура) с самим контролируемым объектом [6-8]. Однако широко известные методы контроля носят локальный характер и не позволяют обеспечить полную (глобальную) безопасность объекта. При этом надо иметь в виду, что источники аварийного состояния и последующих катастроф – это не только нарушения локальных технических параметров или сбоев, скажем, связи с окружающей средой, ошибок персонала, сколько состояние самой системы, безусловно, требует вероятностных представлений.

Таким образом, среди множества причин отказов в элементах изделия, которые могут привести к выходу из строя узла или целой группы его узлов [1, 2, 9], следует, в первую очередь, выделить те, которые связаны со стохастическими отклонениями его параметров относительно средних значений. Эти причины отказов при отсутствии экстремальных условий являются чисто внутренними: они заложены в самих элементах изделий ещё при их изготовлении, монтаже, сборке, а условия эксплуатации приводят лишь к усугублению этих причин. При определённых изменениях параметров элементов системы она переходит в нелинейное состояние, которое анализируется в *теории катастроф* [10, 11].

Поиск критериев техногенного риска и исследование механизмов проявления статистических закономерностей этих процессов являются особенно актуальными для проблем безопасности и предотвращения техногенных катастроф при эксплуатации энергоёмких и других объектов техники.

Зоны риска. Критические состояния

В любом узле технического объекта можно выделить группу (или группы) взаимосвязанных и взаимозависимых элементов, параметры которых обеспечивают его нормальное функционирование. В общем случае эти элементы могут и не быть в непосредственном контакте друг с другом. И те, и другие элементы абстрактного узла назовём для определённости *сопряжёнными*, например, внутреннее кольцо подшипника качения и вал, корпус турбины и лопатки её ротора и т.п. При работе турбины между её лопатками и корпусом должен быть определённый технологический зазор, обеспечивающий её безопасную работу. Однако её элементы, изготовленные с определённым классом точности, имеют естественный разброс как в размерах внутреннего диаметра корпуса, так и по длине (выносе) лопаток. Эти отклонения могут привести к тому, что зазор между подвижной и неподвижной частями турбины станет минимальным, когда одновременно совпадут два события: отклонение внутреннего диаметра корпуса окажется на нижней границе поля допусков, а длина лопаток (хотя бы одной) – на верхней. Заметим, что эти отклонения не превышают принятых допустимых значений. Однако вероятность выхода из строя турбины может существенно увеличиться при появлении каких-либо негативных факторов, приводящих к усугублению описанной ситуации (увеличение температуры, давления, нагрузки и т.п.). Это означает, что рассматриваемый объект будет находиться в *зоне риска*.

Рассмотрим проблему безопасности абстрактного объекта с позиций статистических закономерностей. Выделим в этом объекте (или отдельном узле) сопряжённые элементы с заданными параметрами, определяющими функционирование в штатном режиме (каждый такой элемент может иметь несколько параметров). Для решения задачи эти параметры необходимо структурировать. С этой целью разобьём их на группы $1, \dots, 2, \dots, j, \dots, m$ ($m \geq 1$), в каждой из которых пронумеруем параметры сопряжённых элементов $1, 2, \dots, i, \dots, n_j$ ($n_j \geq 2$). Для каждой группы обозначим $A_{1j}, A_{2j}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{n_jj}$ – события, при кото-

рых отклонения параметров сопряжённых элементов от средних значений наибольшие, а вероятности этих событий – соответственно $p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{n_jj}$.

Пусть в каких-то сопряжённых элементах j -й группы с вероятностью P_j может произойти событие A_j , следствием которого является неблагоприятное сочетание n_j параметров, приводящее при воздействии негативных факторов к возможному развитию отказа данного узла. Состояние его сопряжённых элементов, соответствующее этому событию, назовём *критическим состоянием* (рис. 1).

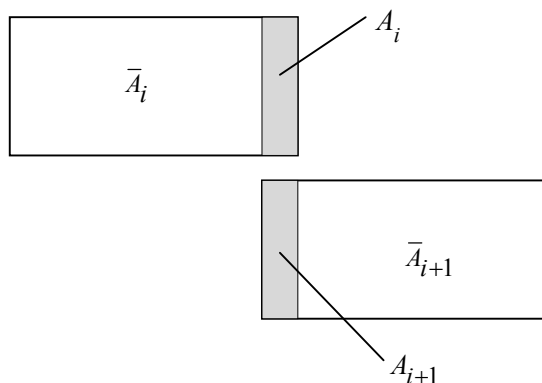


Рис. 1. К определению критического состояния двух сопряжённых элементов

Неблагоприятные сочетания параметров данной группы описывается *вероятностной моделью* с соответствующим исходом P_j . Простейшей моделью этих сочетаний является совпадение наибольших отклонений параметров всех сопряжённых элементов от средних значений, при котором вероятность критического состояния j -й группы A_j определяется произведением вероятностей для независимых событий [12]:

$$P_j = \prod_{i=1}^{n_j} p_{ij}. \quad (1)$$

Для зависимых событий необходимо использовать условные вероятности:

$$P_j = p(A_j) = p(A_{1j}) \times p(A_{2j} | A_{1j}) \times p(A_{3j} | A_{1j} \times A_{2j}) \times \dots \times p(A_{n_jj} | A_{1j} \times A_{2j} \times \dots \times A_{(n_j-1)j}). \quad (2)$$

Введя далее вероятность противоположного события для совокупности независимых m групп $\bar{P} = \prod_{j=1}^m (1 - P_j)$, можно определить вероятность исхода по крайней мере одного критического состояния для объекта или узла:

$$P = 1 - \bar{P} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j). \quad (3)$$

Это простое выражение отражает наиболее общий характер критических состояний для независимых групп параметров узла или всего объекта. Для простой вероятностной модели (см. выражения (1) и (2)) эта величина зависит как от вероятностей наибольших отклонений p_{ij} , так и от максимального количества параметров сопряжённых элементов n_j и от числа их групп m .

При рассмотрении общего случая определения вероятности A_{ij} необходимо использовать плотность вероятности $\psi_{ij}(x)$ непрерывной случайной величины. Будем считать, что значения x ограничены сверху и снизу параметрами элементов a_{ij} и b_{ij} (рис. 2) – то есть

$$a_{ij} - \xi_{ij} < x < b_{ij} + \xi_{ij}, \quad (4)$$

где ξ_{ij} – абсолютная средняя ошибка определения параметра x (положительная величина).

Например, для механического узла a_{ij} и b_{ij} – границы полей допусков, а ξ_{ij} – средняя инструментальная ошибка измерений.

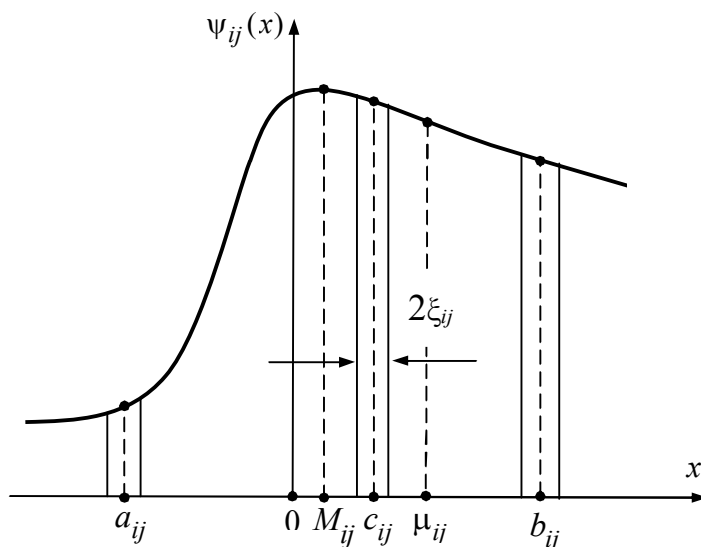


Рис. 2. Плотность вероятности $\psi_{ij}(x)$ для непрерывной случайной величины (M_{ij} – мода, μ_{ij} – математическое ожидание)

Элементы, параметры которых не удовлетворяют условию (4), *отбраковываются*. При этих допущениях вероятность того, что x окажется в пределах $c_{ij} \mp \xi_{ij}$, где c_{ij} – i -й параметр элемента j -й группы, определяющий с точностью до ξ_{ij} "попадание" x в границы поля допусков (в общем случае с точностью до величины ξ_{ij} $a_{ij} \leq c_{ij} \leq b_{ij}$), является *условной* при выполнении (4), а её значение при этом можно определить через отношение площадей на графике $\psi_{ij}(x)$:

$$p_{ij} = \frac{\int_{c_{ij}-\xi_{ij}}^{c_{ij}+\xi_{ij}} \psi_{ij}(x) dx}{\int_{a_{ij}-\xi_{ij}}^{b_{ij}+\xi_{ij}} \psi_{ij}(x) dx}. \quad (5)$$

Практический интерес при проведении оценок критических событий представляют равномерное распределение плотности вероятности и нормальный закон распределения, которые с учётом принятых обозначений можно записать, как

$$\psi_{ij}^p(x) = \begin{cases} \frac{1}{b_{ij} + 2\xi_{ij} - a_{ij}} & (a_{ij} - \xi_{ij} < x < b_{ij} + \xi_{ij}), \\ 0 & (x < a_{ij} - \xi_{ij}, \text{ или } x > b_{ij} + \xi_{ij}), \end{cases} \quad (6)$$

$$\psi_{ij}^n(x) = \frac{1}{\sigma_{ij}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}\right], \quad (7)$$

где σ_{ij} – среднеквадратичное отклонение, μ_{ij} – математическое ожидание, являющиеся элементами матриц $\Sigma = (\sigma_{ij})$, $\mathbf{M} = (\mu_{ij})$.

Предельные вероятности. Вероятности суммарных рисков

Используя этот подход, в работе [13] были получены критерии техногенного риска с использованием крайних точек допустимых интервалов параметров и зависящих от погрешностей ξ_{ij} – предельные вероятности, и вероятности суммарных рисков, учитывающие все неблагоприятные случаи также внутри поля допусков – независимо от ξ_{ij} . В то же время для изделий, на которые установлен стандарт допустимых погрешностей измерений параметров при приёмочном контроле, принятые стандартом границы предельных параметров учитывают эти погрешности (см., например, [14]). В этих случаях предельные границы соответствующих параметров являются *фиксированными*. Для предельных вероятностей

$$P = 1 - \prod_{j=1}^m \left[1 - \frac{\int_{a_{ij}-\xi_{ij}}^{c_{ij}+\xi_{ij}} \psi_{ij}(x) dx}{\int_{a_{ij}-\xi_{ij}}^{b_{ij}+\xi_{ij}} \psi_{ij}(x) dx} \right], \quad (8)$$

где $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, \xi_{ij}$ – элементы матриц $\mathbf{A} = (a_{ij})$, $\mathbf{B} = (b_{ij})$, $\mathbf{C} = (c_{ij})$, $\Xi = (\xi_{ij})$.

Для расчёта вероятности события $P_{q,m}$, при котором реализуется ровно q критических состояний из m , необходимо рассмотреть более сложную вероятностную модель, в которой это событие представляется суммой несовместных вариантов, количество которых равно числу сочетаний из m по q ($C_m^q = m!/[q!(m-q)!]$):

$$P_{q,m} = P_1 P_2 \dots P_q (1 - P_{q+1})(1 - P_{q+2}) \dots (1 - P_m) + P_1 P_2 \dots P_{q-1} (1 - P_q)(1 - P_{q+1}) \dots (1 - P_{m-1}) P_m + \dots + (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_{m-q}) P_{m-q+1} P_{m-q+2} \dots P_m. \quad (9)$$

Неблагоприятные совпадения отклонений параметров сопряжённых элементов от средних значений в окрестности параметра c_{ij} рассматриваемого отрезка $(a_{ij}; b_{ij})$ – вплоть до его середины (математическое ожидание μ_{ij}), можно учесть введением под знак интеграла некоторой *весовой функции* $\mathfrak{R}(x)$, умноженной на плотность вероятности $\psi_{ij}(x)$. Эта функция учитывает степень приближения к крайним точкам допустимых интервалов параметров (предельные

вероятности) и должна обладать определёнными свойствами [13], с учётом которых можно записать ($\lambda_{ij} \neq \mu_{ij}$):

$$\mathfrak{R}(x) = \left(\frac{x - \mu_{ij}}{\lambda_{ij} - \mu_{ij}} \right)^k. \quad (10)$$

С учётом выражений $\mathfrak{R}(x)$ и $\psi(x)$, получим:

$$p_{ij}^p = \left| \frac{1}{(\lambda_{ij} - \mu_{ij})^k (b_{ij} + 2\xi_{ij} - a_{ij})} \int_{\mu_{ij}}^{\lambda_{ij}} (x - \mu_{ij})^k dx \right|; \quad (11)$$

$$p_{ij}^H = \frac{\left| \frac{1}{(\lambda_{ij} - \mu_{ij})^k} \int_{\mu_{ij}}^{\lambda_{ij}} (x - \mu_{ij})^k \exp \left[-\frac{(x - \mu_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2} \right] dx \right|}{\int_{a_{ij} - \xi_{ij}}^{b_{ij} + \xi_{ij}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2} \right] dx}, \quad (12)$$

где λ_{ij} – элементы матрицы

$$\Lambda = (\lambda_{ij}) = \left(c_{ij} - \frac{\mu_{ij} - c_{ij}}{|\mu_{ij} - c_{ij}|} \xi_{ij} \right). \quad (13)$$

Эти выражения используются для определения вероятностей критических состояний объекта (узла), называемые *вероятностями суммарных рисков*:

$$\mathcal{S} = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - S_j), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{S}_{q,m} = & S_1 S_2 \dots S_q (1 - S_{q+1})(1 - S_{q+2}) \dots (1 - S_m) + S_1 S_2 \dots S_{q-1} (1 - S_q)(1 - S_{q+1}) \dots \\ & \dots (1 - S_{m-1}) S_m + \dots (1 - S_1)(1 - S_2) \dots (1 - S_{m-q}) S_{m-q+1} S_{m-q+2} \dots S_m \end{aligned} \quad (15)$$

где для простой вероятностной модели (1) $S_j = \prod_{i=1}^{n_j} p_{ij}$.

Расчёт вероятностей потенциального риска даже в простейшем случае независимых событий является довольно сложной задачей. Определим эти величины для какого-нибудь простого частного случая, в котором события имеют чисто механическую природу, например, для подшипника, являющегося узлом какого-нибудь абстрактного объекта.

Принцип Ле-Шателье

В качестве примера рассмотрим роликовый подшипник радиальный с коротким цилиндрическим роликом типа 2000 [15]. Примем следующую систему посадок для сопряжённых деталей подшипника: переходная посадка в отверстие корпуса и напряжённая – на вал. Выделим три группы параметров сопряжённых элементов ($m = 3$): диаметр отверстия в корпусе – внешний диаметр наружного кольца ($j = 1$); диаметр дорожки качения наружного кольца – диаметр ролика – диаметр дорожки качения внутреннего кольца ($j = 2$); внутренний диаметр внутреннего кольца – диаметр вала ($j = 3$). Необходимые данные для проведения расчётов с использованием допусков на размеры узла в соответствии с принятой выше структурой их представления приведены в табл. 1.

Таблица 1

Данные для расчёта критериев техногенного риска и их матричное представление, мкм ($\zeta = 5$)

| Сопряженные элементы и группы | | | Геометрические параметры элементов | | | | | Ожидаемое событие в критическом состоянии |
|-------------------------------|----------------|--------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|---|--------------------|--|
| элемент механического узла | № элемента i | № группы j | нижняя граница a_{ij} | верхняя граница b_{ij} | математическое ожидание μ_{ij} | наибольшее отклонение от среднего, c_{ij} | | |
| | | | | | | граница поля допусков | значение параметра | |
| корпус | 1 | 1 | 0 | 15 | 7,5 | b_{11} | 15 | проскальзывание наружного кольца |
| наружное кольцо | 2 | | -15 | 0 | -7,5 | a_{21} | -15 | |
| наружное кольцо | 1 | 2 | -4 | 4 | 0 | a_{12} | -4 | заклинивание ролика между наружным и внутренним кольцами |
| цилиндрический ролик | 2 | | -8 | 0 | -4 | b_{22} | 0 | |
| внутреннее кольцо | 3 | | -6,5 | 6,5 | 0 | b_{32} | 6,5 | |
| внутреннее кольцо | 1 | 3 | 0 | 11 | 5,5 | b_{13} | 11 | проскальзывание внутреннего кольца |
| вал | 2 | | 26 | 37 | 31,5 | a_{23} | 26 | |

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & -4 & 0 \\ -15 & -8 & 26 \\ 0 & -6,5 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 15 & 4 & 11 \\ 0 & 0 & 37 \\ 0 & 6,5 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 15 & -4 & 11 \\ -15 & 0 & 26 \\ 0 & 6,5 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} 7,5 & 0 & 5,5 \\ -7,5 & -4 & 31,5 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} 5,61 & 2,05 & 4,38 \\ 5,61 & 3,06 & 4,02 \\ 0 & 5,09 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{pmatrix} 5 & 5 & 4 \\ 5 & 2,8 & 4 \\ 0 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

Точность определения геометрических параметров ξ_{ij} , вообще, определяется принятым для данного узла качеством (классом точности) ζ . Погрешности, представленные матрицей Ξ , приняты равными допустимым ошибкам измерений при приёме изделия в соответствии с государственным стандартом [14].

Некоторые результаты проведенных расчётов отражены в табл. 2 и на рис. 3-5. Существенное влияние на вероятности потенциального риска оказывает дисперсия σ^2 , класс точности ζ , принятый при изготовлении узла, показатель k степенной функции $R(x)$, вид распределения плотности вероятностей. Среднеквадратичное отклонение σ зависит не только от качества ζ , но и от размеров детали. При увеличении рассеяния вероятность суммарных рисков при нормальном распределении увеличивается, стремясь к своему предельному значению – вероятности при равномерном распределении (рис. 3).

Таблица 2

Результаты расчета ($\zeta = 5, k = 3$)

| Вероятностная модель критического состояния механического узла | | Раномерное распределение | Нормальное распределение |
|--|--|--------------------------|--------------------------|
| Хотя бы одно критическое состояние | Предельная вероятность P | 0,525 | 0,484 |
| | Вероятность суммарного риска \mathcal{P} | 0,073 | 0,036 |
| Среди трёх групп ровно две в критическом состоянии | Предельная вероятность $P_{2,3}$ | 0,081 | 0,072 |
| | Вероятность суммарного риска $\mathcal{P}_{2,3}$ | 0,00156 | 0,000401 |
| Все три группы в критическом состоянии | Предельная вероятность $P_{3,3}$ | 0,00565 | 0,00332 |
| | Вероятность суммарного риска $\mathcal{P}_{3,3}$ | $1,049 \times 10^{-5}$ | $1,418 \times 10^{-5}$ |

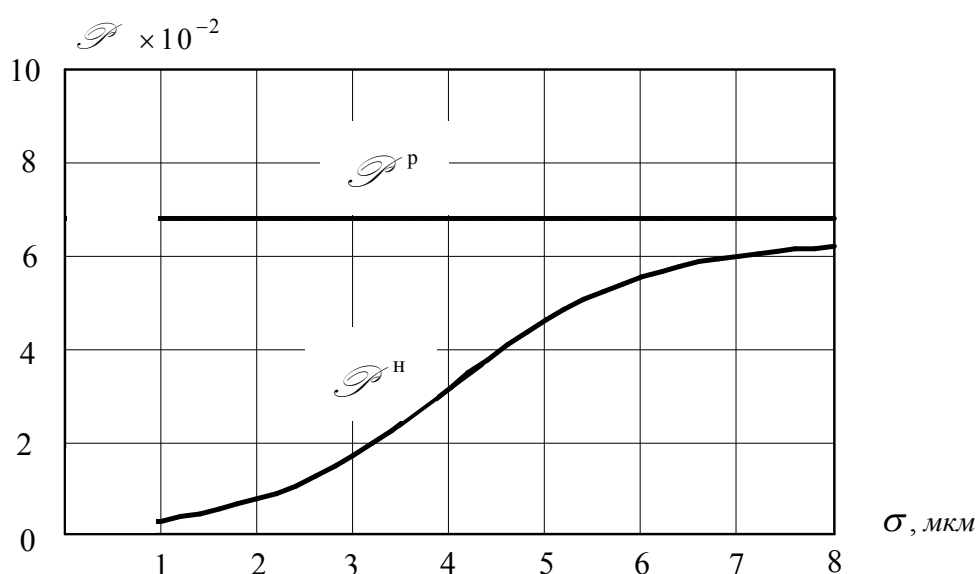


Рис. 3. Зависимость вероятностей суммарного риска от среднеквадратичного отклонения ($\zeta = 5, k = 3$)

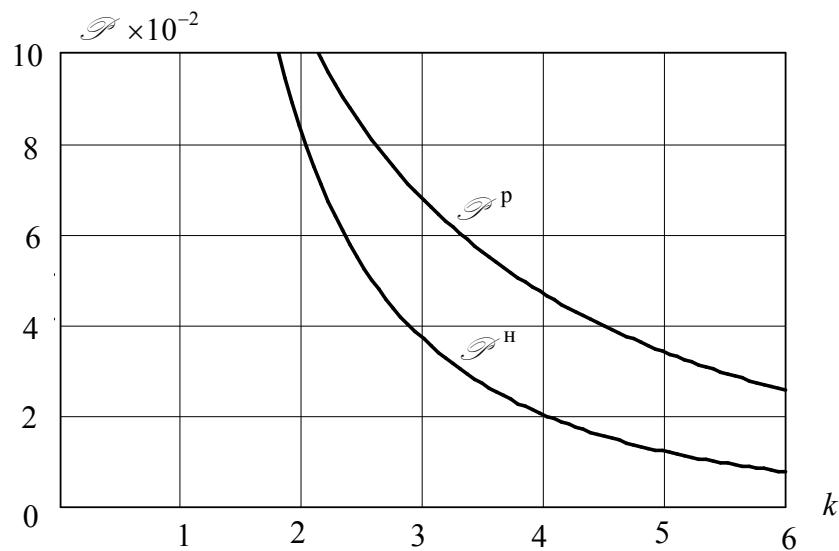


Рис. 4. Зависимость вероятностей суммарного риска от параметра k ($\zeta = 5$)

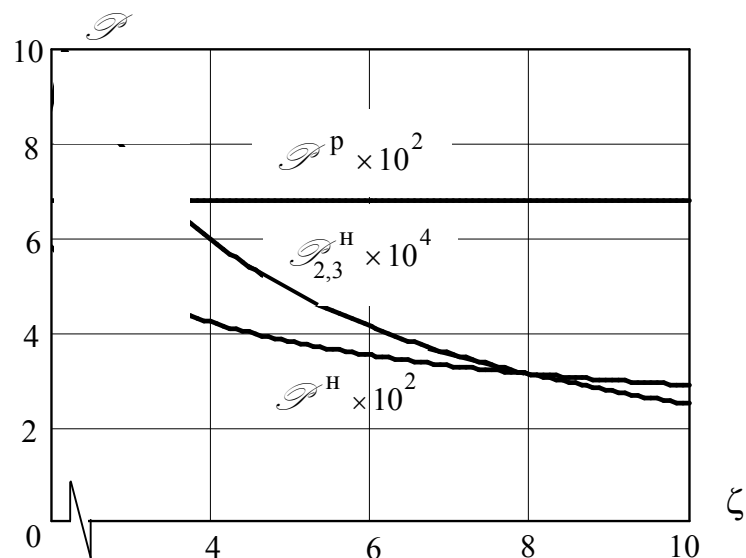


Рис. 5. Зависимость вероятностей суммарного риска от качества ($k = 3$)

На рис. 4 показано влияние на вероятности потенциального риска показателя k , которое наиболее существенно при $k < 2 \div 4$.

Исследование влияния инструментальной погрешности ξ_{ij} на вероятности P и S в пределах выбранного класса точности ($\xi_{ij} = \xi$) показали, что при уменьшении ξ до $\sim (0,5-1)$ мкм эти величины одного порядка.

Зависимость полученных вероятностей потенциального риска от класса точности изделия показана на рис. 5. Переход к более высокому классу точности (уменьшение качества ζ), сопровождающийся сужением поля допусков, вовсе не означает, что вероятность потенциального риска должна уменьшаться: вероятности критических состояний сопряжённых элементов узла, по крайней мере – для фиксированных границ полей допусков, *увеличиваются* (знаменатели в дробях соответствующих выражений уменьшаются). Применительно

к рассматриваемой задаче, можно сформулировать *принцип Ле-Шателье – Брауна* (1884): увеличение класса точности изделия, сопровождающееся сужением границ предельных параметров и обеспечивающее, собственно, надёжность его работы, приводит к такому состоянию системы, при котором стимулируются процессы, приводящие к уменьшению её надёжности.

Полученный результат вовсе не означает, что увеличение класса точности непременно приведёт к ухудшению надёжности объекта, которая определяется не только рассмотренными критериями. Вероятно, здесь имеет место чисто внутреннее противоречие, присущее каждому техническому объекту: в изделиях с высоким классом точности появление событий критических состояний сопряжённых элементов следует ожидать чаще, чем в изделиях с широкими полями допусков.

Рассмотренный пример наглядно показывает, что предложенный подход к проблемам технической безопасности можно использовать для оценок степени техногенного риска объектов различного назначения. В то же время, совершенно очевидно, что в реальных условиях концепция независимых событий недостаточно полно отражает реальную картину. Во многих современных экстремально нагруженных технических объектах наряду с механическими процессами одновременно протекают взаимозависимые термодинамические, электродинамические, химические и другие процессы. Их взаимосвязанное протекание делает недостоверными существующие частные методики оценки прочности и, особенно, долговечности таких объектов.

Примерами таких объектов (по числу отказов – наименее надёжных, являются межроторные подшипники газотурбинных двигателей, работающие между двумя быстровращающимися вибрирующими роторами, окруженные близким открытым пламенем, отделённые от него тонкостенными токопроводящими слабомагнитными оболочками и воздушно-газовыми плёнками. В этих условиях события разрушения подшипников, как правило, случайны, внезапны и быстротекущи. Физика этих процессов неясна, а методик совокупной оценки влияния различных по физической природе факторов не существует.

Заключение

- Показано, что при разбросе параметров, определяющих функционирование элементов технического объекта, в пределах, не превышающих поле допусков соответствующего класса точности, при нормальных условиях его работы, отсутствии ошибок при проектировании, обслуживающего персонала, объект в целом с определённой вероятностью может оказаться в группе риска независимо от его эксплуатационных качеств, его состояния и состояния окружающей среды. Причины указанного события носят внутренний характер и связаны только с конечной точностью изготовления, сборки и монтажа его элементов и узлов, естественным разбросом их параметров и характеристик. В процессе эксплуатации объекта эти параметры могут выйти из поля допусков, что ещё больше увеличит вероятность отказа. Для предотвращения этих событий целесообразно осуществлять периодический контроль параметров тех элементов и узлов, которые являются наименее надёжными.

- Переход к более высокому классу точности (уменьшение качества), сопровождающийся сужением поля допусков, по крайней мере, для их фиксированных границ при нормальном распределении плотности вероятности, может привести к увеличению вероятности риска объекта, причиной которого является увеличение вероятностей критических состояний сопряжённых элементов его узлов.

- Предложенный подход позволил выделить два критерия оценки степени техногенного риска при эксплуатации объекта:

- предельную вероятность, зависящую от погрешностей измерений и оценок параметров его элементов и узлов;

- вероятность суммарного риска, независящую от этих погрешностей, по крайней мере, для фиксированных границ полей допусков.

Расчёт этих величин позволяет оценить вероятность риска как для отдельных узлов, так и для всего объекта в целом. Прогнозирование их отказов позволит предусмотреть определённые меры защиты, в частности – создание средств аварийной защиты с использованием новых инновационных технологий, и тем самым обеспечить техническую безопасность всего объекта.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть более детальное описание взаимосвязи элементов и узлов объекта с использованием, в частности, концепции гипотез, многомерных распределений вероятностей, современных методов математической статистики и других подходов.

Литература

1. *Сиротин Н.Н., Коровкин Ю.М.* Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1973.
2. *Диагностика* авиационных двигателей / Лозовский В.Н., Бондал Г.В., Каксис А.О., Колтунов А.Е. М.: Машиностроение, 1988.
3. *Неразрушающий контроль* // Справочник под общ. ред. Клюева В.В., т. 1-8. М.: Машиностроение, 2006.
4. *Способ* неразрушающего контроля целостности лопаток турбины / Жежеря А.П., Коршаковский С.И., Костылев Г.В. и др. Авторское свидетельство СССР №1723890, 1991.
5. *Korshakovsky S.I., Krasnenkov M.A.* Test Technology of Moving Electric Conductive Component Defects // 10th International Trade Fair and Conference, May 8-10, 2001, Exhibition Centre Nuremberg, Germany // MAT-2001 Proceedings. P. 359-362.
6. *Хакен Г.* Синергетика. М.: Мир, 1980.
7. *Митгем К.* Что такое философия техники? М.: Аспектпресс, 1995. 148 с.
8. *Постнов Д.Э.* Бифуркации регулярных аттракторов. Саратов: Колледж, 1996. 102с.
9. *Базовский И.* Надёжность. Теория и практика. М.: Мир, 1965. 376 с.
10. *Постон Т., Стюарт И.* Теория катастроф и её приложения. М.: Мир, 1980. 608 с.
11. *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М.: Изд-во МГУ, 1983.
12. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2006.
13. *Коршаковский С.И., Красненков М.А., Чекалкин Н.С.* Теория техногенных катастроф: новый подход к проблемам безопасности. Специальная техника, № 6, 2010. С. 2-17.
14. *ГОСТ 8.051- 81.* М.: Издательство стандартов, 1987. 10 с.
15. *Подшипники* качения / Справочник-каталог. М.: Машиностроение, 1997. 896 с.
16. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя, т. 1, 2. М.: Машиностроение, 2001.