

УДК 629.047

ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ УСТАЛОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

М.А. КРАСНЕНКОВ, С.И. КОРШАКОВСКИЙ, Н.С. ЧЕКАЛКИН

В работе проведен анализ механизма причин возможных отказов элементов изделия. На основе статистических закономерностей предложены критерии оценки степени техногенного риска при определении возможных отказов элементов и узлов технического объекта, которые могут привести к катастрофическим последствиям при его эксплуатации.

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

Указом Президента РФ от 12.05.09 № 537 утверждена «Стратегия национальной безопасности РФ до 2020 г.», определяющая системные приоритеты, цели и меры в области политики, национальной безопасности и уровня устойчивого развития государства. Одним из важнейших приоритетов ее реализации является комплексная проблема неразрушающего контроля с целью создания средств аварийной защиты различных энергоемких объектов.

Подход к решению проблемы безопасности объекта связан с представлением любой технической системы как самоорганизующейся и содержащей множество взаимодействующих между собой подсистем [16; 6]. Поэтому именно с синергетическим подходом связано понятие «нелинейного» развития, а именно:

- при определенных параметрах системы и в определенных диапазонах изменения окружающей среды она существенно не меняет своих характеристик;
- при определенных изменениях параметров элементов, включенных в систему, или характеристик среды происходит нелинейный процесс, который приводит к переходу системы в новое качество и, в частности, к ее разрушению.

Критические точки, вблизи которых система ведет себя неустойчиво и переходит в нелинейное состояние, называются точками *бифуркации*, а система в этом состоянии анализируется в *теории катастроф* [13; 1].

Рассмотрим проблему безопасности технической системы с позиций вероятностных представлений событий и статистических закономерностей. Выделим в этом объекте (или отдельном узле) сопряженные элементы с заданными параметрами, определяющими функционирование в штатном режиме (каждый такой элемент может иметь несколько параметров). Параметры элементов следует разбить на группы $1, 2, \dots, j, \dots, m$ ($m \geq 1$), в каждой из которых пронумеруем параметры сопряженных 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 которых отклонения параметров сопряженных элементов от средних значений наибольшие, а вероятности этих событий – соответственно $p_{1j}, p_{2j}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{n_jj}$.

Если в каких-то сопряженных элементах происходит событие A_j , следствием которого может явиться отказ данного узла системы, то данный узел попадает в *зону риска*. Неблагоприятные сочетания параметров описывается *вероятностной моделью* [2-4; 17].

Для обеспечения современного уровня безопасности технического объекта необходимо прежде всего выявить те элементы и узлы, которые наиболее часто подвержены отказам. С этой целью можно использовать имеющуюся у разработчиков базу статистических данных их отказов. Однако, во-первых, эти данные по разным причинам не всегда носят объективный характер, в частности, из-за недостаточного количества зафиксированных отказов за

контрольный период эксплуатации, при увеличении срока которого, когда этих данных уже будет достаточно, эксплуатируемое оборудование может просто морально устареть. Во-вторых, информация в базе данных не отражает ошибки, заложенные в чистом виде при проектировании, изготовлении и монтаже оборудования, а учитывает лишь суммарные причины отказов по их эпизодам, в том числе те, которые имеют косвенное отношение к истинной причине произошедшего сбоя в работе какого-то узла, или не имеют его вообще, например, ошибки персонала при неприемлемых погодных условиях полета воздушного судна. И, наконец, самое главное – по новой технике, кроме приемочных и регламентных испытаний, других статистических данных просто нет. Попытка же решить проблему с помощью эвристического подхода, хотя и весьма продуктивна, но ненадежна по сути, коль скоро речь идет о технической безопасности.

В связи с этим возникает задача разработки новых критериев техногенного риска, основанных на вероятностных представлениях и механизмах процессов в взаимосвязанных и взаимозависимых элементах изделия, характер которых обусловлен определенными параметрами этих элементов, заложенных еще *до эксплуатации* объекта. Разработанная авторами новая теория техногенных катастроф [9] позволяет оценить мониторинг вероятностей техногенного риска элементов и узлов изделия *без использования статистических данных* и выявить таким образом те, которые имеют наибольшую вероятность отказов.

Для решения задачи введем следующие обозначения. Пусть по аналогии с предыдущим A_{ij} – событие, состоящее в том, что по i -му параметру j -й группы сопряженных элементов система попадает в зону потенциального риска разрушения, а p_{ij} – вероятность этого события. Обозначим также случайную величину x_{ij} и ее плотность вероятности Ψ_{ij} (соответственно с i -м параметром j -й группы). Если параметр элемента объекта принимает значение с наибольшим отклонением от среднего, система по этому параметру точно попадает в зону потенциального риска разрушения. Предположим, что параметр принимает значения от $a_{ij} - \xi_{ij}$ до значения $b_{ij} + \xi_{ij}$, где ξ_{ij} – ошибка измерения. Вероятность p_{ij} при предельном значении параметра

$$p_{ij} = \int_{c_{ij} - \xi_{ij}}^{a_{ij} - \xi_{ij}} \Psi_{ij}(x) dx / \int_{a_{ij} - \xi_{ij}}^{b_{ij} + \xi_{ij}} \Psi_{ij}(x) dx, \text{ где } c_{ij} \text{ принимает предельные значения } a_{ij} \text{ или } b_{ij}.$$

Используя эту формулу, в [9] разработаны критерии техногенного риска для равномерного и нормального распределений параметров. Дело в том, что к описанным в этой работе критическим состояниям следует отнести и те случаи, когда имеют место неблагоприятные совпадения отклонений параметров сопряженных элементов от средних значений также и в окрестности крайних точек рассматриваемого отрезка ($a_{ij}; b_{ij}$) – вплоть до его середины (математическое ожидание μ_{ij}). Для получения выражения вероятности суммарных рисков под знак интеграла вероятности вводится некоторая *весовая функция* $\mathfrak{R}(x)$, умноженная на плотность вероятности $\psi(x)$, учитывающая степень приближения к крайним точкам допустимых интервалов параметров (предельные вероятности). Таким образом, при расчете вероятности p_{ij} в числителе нижний предел интегрирования следует заменить на μ_{ij} , а верхним пределом считать выражение $c_{ij} \mp \xi_{ij}$ соответственно для левой и правой границ поля допусков.

Предлагается рассмотреть более сложную модель попадания системы в критическую зону, а именно – рассмотреть неопределенные значения параметра. Для этого введем функцию критичности параметра $R_{ij}(x)$, отвечающую за попадание системы в зону потенциального риска разрушения по этому параметру и равную *вероятности* этого попадания при принятии ij -м параметром значения x . При значениях x , равных предельным, эта функция равна 1, при значении x , равному математическому ожиданию μ_{ij} , она равна 0. Функция критичности

должна определяться статистически для каждого из ij -х параметров, и в нашей модели будет иметь вид степенной функции (c_{ij} равно a_{ij} или b_{ij}): $R_{ij}(x) = (x - \mu_{ij})^q / (c_{ij} - \mu_{ij})^q$.

Пусть $p_{ij}(y)$ – вероятность попадания параметра в интервал $(y - \xi_{ij}; y + \xi_{ij})$ при условии, что он попал в интервал $(a_{ij} - \xi_{ij}; b_{ij} + \xi_{ij})$.

Очевидно, $p_{ij} = \frac{\int_{y_{ij}-\xi_{ij}}^{y_{ij}+\xi_{ij}} \Psi_{ij}(x) dx}{\int_{a_{ij}-\xi_{ij}}^{b_{ij}+\xi_{ij}} \Psi_{ij}(x) dx}$. Вероятность события A_{ij} находится по формуле

полной вероятности $p_{ij} = \int_{a_{ij}}^{b_{ij}} R_{ij}(y) p_{ij}(y) dy$.

Таким образом, вероятность попадания в зону потенциального риска разрушения будет

$$p_{ij} = \int_{a_{ij}-\xi_{ij}}^{b_{ij}+\xi_{ij}} \int_{y-\xi_{ij}}^{y+\xi_{ij}} R_{ij}(y) \Psi_{ij}(x) dx dy / \int_{a_{ij}-\xi_{ij}}^{b_{ij}+\xi_{ij}} \Psi_{ij}(x) dx.$$

Рассмотренная модель позволяет учесть вероятность разрушения не только при предельно допустимых, но и при произвольных значениях параметров. Используя далее критерии техногенного риска, полученные в [9], можно рассчитать их для конкретного узла или изделия с учетом нового подхода.

Выявленные таким образом проблемные элементы и узлы изделия далее требуется обеспечить средствами неразрушающего контроля их физических параметров, для чего необходимо разработать новые технологии диагностики, отвечающие современным требованиям технической безопасности.

Для предотвращения попадания объекта в зону риска необходимо создание системы аварийной защиты, что, прежде всего, требует необходимость оптимальных условий сопряжения внешних устройств (датчики, коммуникации, инфраструктура) с контролируемым объектом [10; 11].

Среди известных способов неразрушающего контроля и диагностики следует особо выделить широко используемый в технике вихретоковый метод. Основным его недостатком является необходимость использования частотного генератора, что ограничивает возможности контроля элементов объекта техники в реальном времени, в том числе из-за существенных потерь и искажений информационных сигналов. Созданный на его основе новый метод неразрушающего контроля отличается простотой, достоверностью, эффективностью и позволяет исключить недостатки традиционных средств контроля [5; 19]. Метод состоит в следующем. Вблизи контролируемого электропроводного узла (например, ротора турбины) устанавливается специальное устройство – датчик с намагниченным сердечником, создающий *постоянное* магнитное поле. Плотность возникающих в зоне контроля замкнутых вихревых токов \mathbf{J} зависит от удельной электрической проводимости среды γ , скорости движения \mathbf{v} и индукции магнитного поля \mathbf{B} . Вихревые токи создают собственное магнитное поле с индукцией \mathbf{B}^* , подчиняющееся уравнению Максвелла $\text{rot} \mathbf{B}^* = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t$, где $\partial \mathbf{D} / \partial t$ – слагаемое, которым при сравнительно малых частотах вращения объекта (до 400...500 об/с) можно пренебречь. Переменное потокоцепление Ψ в измерительной катушке датчика согласно закону электромагнитной индукции Фарадея $e_i = -d\Psi / dt$ создает в ней напряжение $u = e_i$, а сам датчик может быть установлен *снаружи* – на корпусе изделия.

Таким образом, в зоне контроля индуцируются вихревые токи, магнитное поле которых в катушке датчика преобразуется в электрические сигналы. Сначала эти сигналы записываются для детали без дефектов, для использования их в качестве тарировки. Если в процессе ее испытания или эксплуатации изделия в ней возникает дефект, например, трещина, то сигналы с

датчика будут отличаться от сигналов в отсутствии дефекта. Сравнение этих сигналов по форме и амплитуде дает возможность судить о механической целостности контролируемой детали и в случае появления дефекта предотвратить его отказ.

Предложенная технология неразрушающего контроля была использована при испытаниях и эксплуатации турбинных установок в ряде организаций.

Ниже показаны осциллограммы (рис. 2), иллюстрирующие обнаруженные дефекты ротора турбины турбонасосного агрегата маршевого двигателя, полученные при его испытаниях в штатных режимах работы.

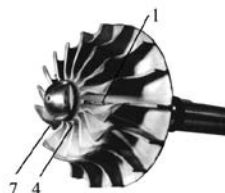


Рис. 1. Ротор турбины турбонасосного агрегата маршевого двигателя

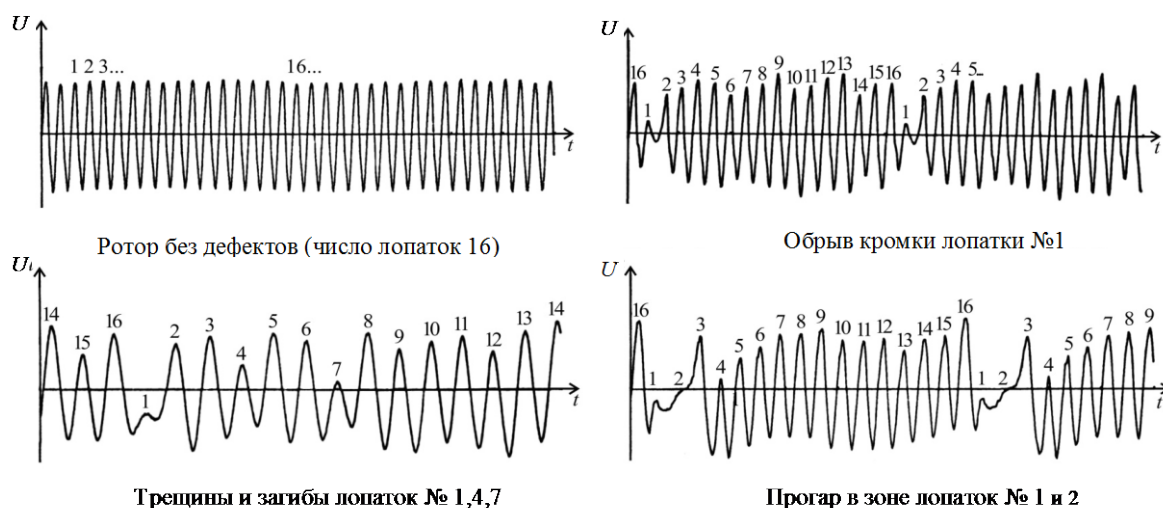


Рис. 2. Осциллограммы

Проведенный детальный анализ материалов лопаток и других элементов конструкций показал, что при появлении механических дефектов происходит резкое изменение электрических и магнитных характеристик материала изделий. Следует при этом отметить, что при воздействии силовых нагрузок резко изменяются электромагнитные свойства материалов элементов изделия [14; 18]. Эти изменения сопровождаются появлением механических напряжений в объеме деформируемых тел, упругих волн при ударных нагрузках, усталостных явлениях, деградацией внутренней структуры материала и, наконец, его разрушением [7; 8]. Проведенные дополнительные экспериментальные исследования показали, что в напряженно-деформированных электропроводных телах изменение механического напряжения инициирует разделение электрических зарядов в теле, что приводит к кратковременному протеканию электрического тока и, следовательно, появлению магнитного поля. Описанные эффекты приводят к дополнительным затратам электромагнитной энергии и дальнейшему развитию усталостных процессов в напряженных элементах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арнольд В.И. Теория катастроф. - М.: Изд-во МГУ, 1983.
2. Баранов В.А., Эверт У. Статистический теоретико-групповой подход к трактовке понятия «дефект» // Дефектоскопия. - 2011. - № 10.

3. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. - М.: Высшая школа, 2006.
4. **Гранаткин А.И., Дегтярев Д.В., Лисанов М.В., Печеркин А.С.** Основные показатели риска аварий в терминах теории вероятности // Безопасность труда в промышленности. - 2002. - № 7.
5. **А.С. 1723890 СССР.** Способ неразрушающего контроля целостности лопаток ротора турбины / А.П. Жежеря, С.И. Коршаковский, М.А. Красненков и др. - 1983.
6. **Иванова В.С.** Синергетика: Прочность разрушения металлических материалов. - М.: Наука, 1992.
7. **Климов К.М., Новиков И.И.** Особенности пластической деформации металлов в электромагнитном поле // Доклады АН СССР, 1980. - Т. 253. - № 3.
8. **Колесников Ю.В., Морозов Е.М.** Механика контактного разрушения. - М.: Наука, 1989.
9. **Коршаковский С.И., Красненков М.А., Чекалкин Н.С.** Теория техногенных катастроф: новый подход к проблемам безопасности. Специальная техника. - 2010. - № 6. - С. 2 - 17.
10. Неразрушающий контроль / под ред. **Сухорукова В.В.** - Кн. 3. Электромагнитный контроль. - М.: Высшая школа, 1992.
11. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. **Клюева В.В.** - М.: Машиностроение, 2006. - Т. 1-8.
12. **Нестеренко Б.Г.** Требования по усталости и живучести конструкций гражданских самолетов // Научный Вестник МГТУ ГА. - 2011. - № 163.
13. **Постон Т., Стюарт И.** Теория катастроф и ее приложения. - М.: Мир, 1980.
14. **Савенков Г.Г., Бархотин Б.К.** Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик разрушения материала на растяжение // ПМТФ. - 2011. - Т. 52. - № 3.
15. **Сиротин Н.Н., Коровкин Ю.Н.** Техническая диагностика авиационных газотурбинных двигателей. - М.: Машиностроение, 1973.
16. **Хакен Г.** Синергетика. - М.: Мир, 1980.
17. **Шторм Р.** Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / пер. с нем. / под ред. Райтмана Н.С. - М.: Мир, 1970.
18. **Щербинин В.Е., Пашагин А.И.** Об объемной поляризации трещины // Дефектоскопия. - 1974. - № 7.
19. **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.

SAFETY AND RELIABILITY ISSUES WHEN STUDYING POWER STRUCTURE FATIGUE IN AVIATION AND SPACE ENGINEERING

Krasnenkov M.A., Korshakovskiy C.I., Chekalkin N.S.

The analysis of failures for the unit components has been presented in the paper. Specifying the possible failure of technical object components and units under operation that can cause catastrophic consequences and basing on statistics the authors have offered the estimation criteria for anthropogenic risk measure.

Keywords: safety, anthropogenic catastrophe, anthropogenic risk measure, statistics.

Сведения об авторах

Красненков Михаил Александрович, 1942 г.р., окончил МФТИ (1965), профессор, доктор технических наук, профессор МИРЭА, автор более 150 научных работ, область научных интересов - неразрушающий контроль, физика плазмы.

Коршаковский Станислав Иосифович, 1939 г.р., окончил МЭИ (1966), доцент, кандидат технических наук, доцент МИРЭА, автор более 100 научных работ, область научных интересов - неразрушающий контроль, физика плазмы, электрореактивные двигатели космических летательных аппаратов, радиоприемные устройства.

Чекалкин Николай Степанович, 1953 г.р., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (1975), доцент, кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой ВМ-2 МИРЭА, автор более 100 научных работ, область научных интересов - математический анализ и его приложения.