

УДК 621.311.24

Божко В.П., Каширина О.В.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПО ОДНОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Анализ эксплуатационной надежности различных изделий авиационной промышленности показывает, что 25-40 % их отказов вызвано дефектами производства. Около 80 % всех дефектов, которые возникают в процессе изготовления и использования изделий, обусловлены недостаточным планированием в ходе разработки и конструирования, подготовки производства. Статистика отказов по технологическим причинам свидетельствует о том, что они могут быть вызваны самыми разнообразными погрешностями производственного процесса; применением несоответствующего материала, размерными неточностями обработки, неправильной регулировкой, необратимыми изменениями станка, инструмента и приспособлений, неправильной термообработкой. Кроме этого, современные технологические процессы изготовления деталей агрегатов, начиная от обработки заготовок и кончая финишными операциями, сопровождаются значительными силовыми и температурными воздействиями на деталь. Это вызывает целый ряд побочных явлений, которые приводят к изменению свойств изделий, создают в них остаточные напряжения, искажают структуру материала, вызывают появление дефектов.

В связи с этим при решении вопроса о повышении качества деталей и улучшения эксплуатационных свойств их поверхностей актуальными являются исследования качества самих технологических процессов (ТП) и, в частности, их надежности.

Надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения ТП и условий его функционирования может включать безотказность, исправность, работоспособность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость в отдельности или определенное сочетание этих свойств как для ТП в целом, так и для его операций. Одинаковые качественный и количественный составы еще не свидетельствуют об идентичности ТП. Различное взаимное расположение операций в ТП оказывает существенное влияние на его структуру. Только совокупность трех признаков: качества, количества компонентов и их взаимное расположение полностью характеризует ТП. Свойством процесса, которое наиболее полно характеризует эти признаки, и является надежность [1].

Цели расчета надежности ТП могут быть подразделены на две группы: в массовом и серийном производстве – это определение надежности действующих технологических процессов и операций, установление причин недостаточной надежности, разработка мероприятий по устранению причин отказов; при технологической подготовке производства – это выбор наилучшего варианта с позиции обеспечения надежности, оптимизация мест и объема контрольных операций, разработка оптимальных технологических маршрутов.

Следует отметить, что попытка оценить надежность ТП одним или двумя однородными показателями недостаточно обоснована. Единого показателя, который позволил бы оценить надежность ТП, нет. Нельзя сказать, что надежность ТП равна, например, 80 %. Такая оценка ни о чем не говорит. Для того чтобы оценить надежность ТП, нужно привести определенные показатели нескольких различных свойств, характеризующих надежность ТП при заданных условиях и режимах. В качестве основных пока-

зателей надежности ТП могут быть выбраны: вероятность безопасного функционирования $P(t)$; параметр потока отказов $\omega(t)$; вероятность отказа F ; средний срок функционирования t_{cp} [1,2].

Вероятность безотказного функционирования (вероятность выполнения задачи по всей совокупности нормируемых показателей качества) представляет собой наиболее удачную характеристику, так как по ней очень просто судить о безотказности ТС. Она охватывает все факторы, существенно влияющие на надежность (погрешности оборудования, температурный режим и т.д.). Параметр потока отказов (плотность вероятности возникновения отказа, определяемая для рассматриваемого момента времени), показывает характер изменения надежности ТП во времени. Вероятность отказа при получении каждого из параметров качества позволяет оценить надежность и потенциальные возможности отдельных операций. Средний срок функционирования характеризует общую длительность ТП. Определение четырех основных показателей дает возможность относительно полно характеризовать надежность ТС.

Повреждения ТС представляют собой в основном случайные величины. С вероятностной точки зрения они могут быть полностью описаны законом распределения, устанавливающим связь между возможными значениями случайных величин и соответствующими вероятностями. Однако при решении вопроса об оценке надежности ТП не обязательно описывать распределение выбранных случайных величин столь исчерпывающим образом. На наш взгляд, достаточно определить лишь числовые параметры, характеризующие существенные стороны этих величин. Такими числовыми параметрами (характеристиками) являются математическое ожидание $M(x)$, дисперсия $D(x)$, среднее квадратичное отклонение $\sigma(x)$ и коэффициент корреляции r_{ij} . Полную количественную характеристику надежности ТП могут дать показатели ее составляющих и числовые параметры исследуемых величин. Из вышеизложенного следует, что уровень технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей определяют расчеты надежности по показателям качества.

Расчет надежности выполнения задания по одному показателю качества продукции. Вероятность выполнения задания по параметру $y(t)$ обеспечивается, если на каждой из последовательной или параллельных операций выполняется условие:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{i1} \leq y_1(t) \leq \delta_{a1}; \\ \delta_{i2} \leq y_2(t) \leq \delta_{a2}; \\ \dots\dots\dots \\ \delta_{in} \leq y_n(t) \leq \delta_{an}; \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $\delta_{n1}; \delta_{n2}; \dots; \delta_{nn}; \delta_{a1}; \delta_{a2}; \dots; \delta_{an}$ – нижние и верхние границы допуска на нормируемый показатель.

Вероятность выполнения задания по параметру $y(t)$

$$P(\delta_i) \leq y(t) \leq \delta_a = P(t). \quad (2)$$

Пусть определены вероятности выполнения неравенств (1), т.е.

$$\left. \begin{aligned} P\{\delta_{i1} \leq y_1(t) \leq \delta_{a1}\} = P_1(t); \\ P\{\delta_{i2} \leq y_2(t) \leq \delta_{a2}\} = P_2(t); \\ \dots\dots\dots \\ P\{\delta_{in} \leq y_n(t) \leq \delta_{ai}\} = P_i(t); \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Если не выполнено хотя бы одно из неравенств (3), то не выполняется и неравенство (2).

Искомая вероятность

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_i(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t). \quad (4)$$

Вероятность отказа

$$F(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - F_i(t)]. \quad (5)$$

Если $F(t) \leq 0,2$, то, как показано в работе [2], расчет можно вести по более простой формуле:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n F_i(t), \quad (6)$$

здесь $F_i(t)$ – вероятность отказа на каждой операции.

Параметр потока отказов определяется следующим образом. В начальный момент времени ТП начинает функционирование и «работает» до отказа. После отказа происходит восстановление, и ТС вновь функционирует до отказа, и т.д. При этом время восстановления не учитывается. Моменты отказов формируют поток, называемый потоком отказов. В качестве характеристики потока отказов используется «ведущая функция» $\Omega(t)$ данного потока – математическое ожидание числа отказов за время t :

$$\Omega(t) = Mr(t),$$

где $r(t)$ – число отказов за время t .

Математическое ожидание числа отказов за интервал времени (t_1, t_2) определяется по формуле

$$Mr(t_1, t_2) = \Omega(t_1) - \Omega(t_2),$$

где $r(t)$ – число отказов за интервал (t_1, t_2) .

На основании этого легко определить параметр потока отказов – он представляет собой функцию:

$$\omega(t) = \lim_{\Delta} \frac{Mr(t, t+\Delta)}{\Delta} = \Omega'(t). \quad (7)$$

Для ординарных потоков без последствия параметр потока отказов связан с ведущей функцией соотношением

$$\Omega(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (8)$$

Статистическая оценка среднего срока функционирования определяется по формуле

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (9)$$

где x_i – сроки функционирования элементов ТС.

В качестве примера использования данной методики рассмотрим технологический процесс обработки вал-шестерни, входящего в состав насоса-регулятора НРЗ, одного из ответственных деталей авиационного агрегата (рис.1). При этом рассмотрим надежность ТП применительно к цилиндрическим поверхностям шестерни. За выходной параметр качества примем шероховатость опорной поверхности $\text{Ø}60$, $R_a=1,0 \div 1,25$ мкм.

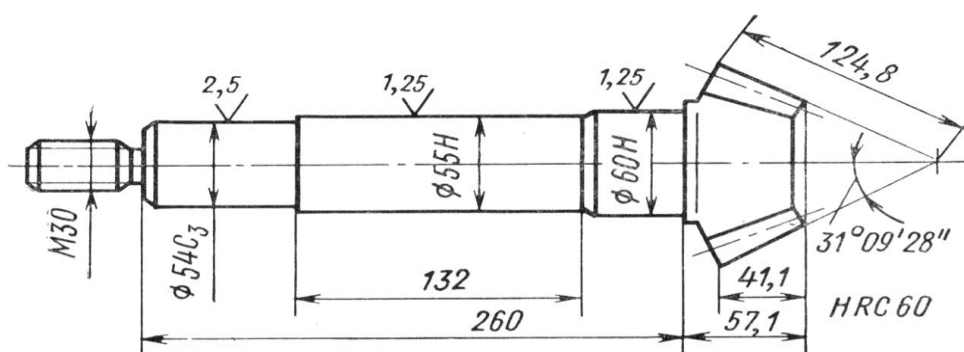


Рисунок 1 – Вал-шестерня

Данный ТП состоит из трех операций: токарной, термической и шлифовальной. Параметр R_a будет находиться в пределах $1,00 < y(t) = R_a \leq 1,25$, если выдержаны размеры на каждой операции.

По результатам статистической обработки данных по технологическим операциям (ТО) определены величины $P_i(t)$ и $F_i(t)$: $P_1(t) = 0,90$; $P_2(t) = 0,75$; $P_3(t) = 0,95$ и соответственно $F_1(t) = 0,10$; $F_2(t) = 0,25$; $F_3(t) = 0,05$. Тогда вероятность выполнения задания по исследуемому показателю качества определится по формуле (3). Вероятность отказа определяется по формуле (6). Параметр потока отказов $\omega(t)$ вычисляется по приближенному уравнению (8). Для определения величины $\omega(t)$ необходимо проанализировать обработку достаточно представительной выборки исследуемой детали. Результаты анализа одной из трех выборок по 150 каждая приведены в таблице 1.

Таблица 1

Выборка	$\Delta t = T_n - T_{n-1}$	n	N	$\omega(t)$
1	0 - 20	17	150	0,0057
2	20 - 40	36	144	0,0125
3	40 - 60	14	142	0,0049

По полученным значениям $\omega(t)$ построен график изменения параметра потока отказов по операциям (рис.2). Средний срок функционирования t_{cp} определяется экспериментально.

Расчеты показывают, что наибольшее число отказов и низкая работоспособность возникает при термической обработке. Это обуславливает невысокую надежность всего ТП по контролируемому показателю качества.

Разберем простейший случай, когда регрессия выходного параметра y по выходному параметру x прямолинейна, а условная дисперсия $D(y/x)$ относительно регрессии постоянна, тогда

$$\bar{y} = a + b\bar{x} \quad (10)$$

$$D(y) = D(y)x + b^2D(x) \quad (11)$$

где \bar{y} – средняя величина выходной погрешности; $b\bar{x}$ – величина, пропорциональная средней входной погрешности \bar{x} ; a – константа, постоянная относительно \bar{x} ; $b^2D(x)$ – величина, пропорциональная входной дисперсии $D(x)$.

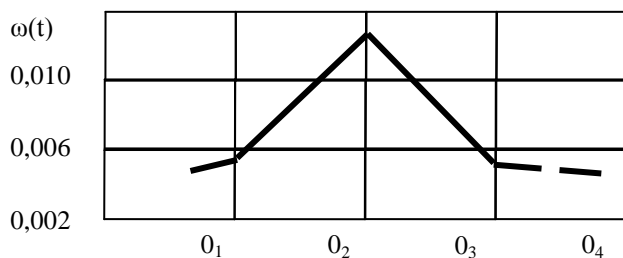


Рисунок 2 – Зависимость параметра потока от надежности на отдельных операциях

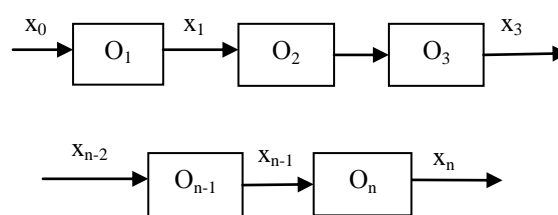


Рисунок 3 – Технологическая цепь (О – операция)

Используя выражения (10) и (11), можно выяснить, как изменяется величина \bar{y} и дисперсия $D(x)$, относящиеся к выходному показателю качества, при изменении входных характеристик. Величина b_i характеризует ту часть погрешности y , которая была перенесена из предыдущей операции; при этом коэффициент b является коэффициентом переноса погрешностей. Она может быть как положительной, так и отрицательной и соответственно увеличивает или уменьшает выходную погрешность на одну и ту же величину. Постоянную составляющую можно компенсировать, так как она проявляется в смещении центра группирования погрешностей, являющихся следствием смещения уровня настройки станка в процессе обработки.

Теперь рассмотрим ТП, состоящий из произвольного числа операций (рис.3). Входными параметрами являются величины x_0, x_1, \dots, x_{n-1} , выходной параметр x_n характеризует качество готовой детали. Если принять, что плотности вероятности распределения случайных величин $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n$ нормальны, то можно считать их совместную плотность также нормальной. Соответственно множественные и парные регрессии линейны. Предположим, что по ходу ТП на надежность последующего вида обработки влияют лишь погрешности, внесенные предыдущей операцией. Условное математическое ожидание выхода может быть описано следующим образом:

$$M(x_n / x_0) = a_{n-1}b_n + \dots + a_2 \prod_{i=3}^n b_i + a_1 \prod_{i=2}^n b_i + M(x_0) \prod_{i=1}^n b_i,$$

где $a_i = M(x_i) + b_i M(x_{i-1})$;

$$b_i = r_{x_i, x_{i-1}} \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_{x_{i-1}}} \quad (i = 1, 2, \dots, n). \tag{12}$$

Дисперсия выходного качества

$$D(x_n) = D(x_n / x_{n-1}) + b_n^2 D(x_{n-2}) + D(x_2 / x_1) \prod_{i=2}^n b_i + D(x_0) \prod_{i=1}^n b_i^2; \tag{13}$$

$$D(x_{i-1}) = D(x_i)(1 - r_{x_i/x_{i-1}}^2), \tag{14}$$

(здесь $r_{x_i/x_{i-1}}$ – коэффициент корреляции).

Теперь определим числовые параметры ТП обработки детали.

При исследовании выборок порядок изменения заранее пронумерованных деталей оставался одинаковым на всех операциях. Информация о ТП экспериментальных данных состояла из трех массивов в соответствии с последовательностью операций.

Вычисления $M(x)$, $D(x)$ производились по формулам (11)-(14). Полученные числовые характеристики ТП обработки исследуемой поверхности ($\varnothing 60$, $R_a = 1,0 \div 1,25$ мкм) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры ТП обработки опорной поверхности детали «шестерня с хвостовиком»

Наименование операции	Обозначение	Математическое ожидание $M(x)$	Среднее квадратическое отклонение $\sigma(x)$	Дисперсия $D(x)$	Коэффициент корреляции $r_{i,i-1}$	Коэффициенты регрессии	
						а	б
Токарная	x	2,35	0,0075	0,00056	–	–	–
Термическая	y	2,40	0,0087	0,184	0,184	0,014	0,76
Шлифовальная	z	1,25	0,0070	0,00049	0,687	0,032	0,64

В статье предложен эффективный способ определения надежности ТП путем определения ее основных показателей. Проведенный расчет надежности ТП при технологической подготовке производства позволил выбрать наилучший вариант с позиции обеспечения надежности, оптимизировать места и объем контрольных операций, разработать оптимальный технологический маршрут.

Литература

1. Каширина О.В. «Особенности определения надежности технологической системы» // «Авіаційно-космічна техніка і технологія». – Харьков, 2002. Вып.29.С.57-61.
2. Технологическая надежность станков / Под общей редакцией А.С. Проникова.– М., Машиностроение, 1971. – 234 с.

УДК 621.311.24

Божко В.П, Каширина О.В.

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ОДНИМ ПОКАЗНИКОМ ЯКОСТІ ПРОДУКЦІЇ

Надійність – одне з основних якостей технічних об’єктів, тому при створенні технологічних систем пред’являються високі вимоги до показників надійності. Попередній розрахунок надійності дозволяє визначити „небезпечні” місця технологічного процесу та розробити заходи з усунення причин відмов.