

Надежность автоматизированных станочных систем

© В.В. Додонов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы анализа, оценки и расчета надежности автоматизированных станочных систем (АСС), а также основные параметры, влияющие на надежность АСС. Представлен расчет функциональной надежности гибкого производственного модуля с использованием схемно-функционального метода. Проанализирована возможность получения информации о надежности АСС при ограниченном числе объектов испытания. Рассмотрены вопросы формирования запаса надежности АСС и его использования для оценки надежности АСС. Приведены примеры влияния запаса надежности по отдельным параметрам на ресурс АСС.

Ключевые слова: *автоматизированные станочные системы, надежность, оценка надежности, расчет надежности, функциональная надежность, параметрическая надежность.*

Для современного технологического оборудования механосборочного производства характерны такие направления развития, как увеличение степени автоматизации, обеспечение гибкости и мобильности, повышение требований к точности и производительности обработки, объединение основного и вспомогательного оборудования в автоматизированные системы с единым управлением. Усложнение технологических машин и АСС приводит к необходимости повышения требований к их надежности. Как известно, надежность технологической машины закладывается при проектировании и расчете, обеспечивается при изготовлении и реализуется при эксплуатации.

В целях определения фактической надежности АСС проводят испытания на надежность, для которых характерно следующее:

- ограниченность, неполнота данных о надежности АСС и ее подсистем по результатам натурных, стендовых и эксплуатационных испытаний;
- большая трудоемкость и высокая себестоимость;
- широкий диапазон условий эксплуатации и разнообразие функций, выполняемых АСС.

К показателям надежности АСС можно отнести вероятность безотказной работы, параметр потока отказов, среднее время поиска и устранения неисправностей, среднее время работы между отказами, запас надежности, суммарные внецикловые потери, коэффициент технического использования, коэффициент готовности и др.

Во время эксплуатации АСС, как правило, возникают отказы основного и вспомогательного оборудования. При этом вероятность безотказной работы $P(t)$ находится в интервале $0 < P(t) < 1$ и является основным показателем безотказности. В случае работы АСС с большой вероятностью появления отказов, т. е. при малом $P(t)$, в качестве основного показателя безотказности принимают параметр потока отказов $\omega(t)$ [1, 2].

Одним из основных показателей надежности АСС является коэффициент $\eta_{\text{тех}}$, который учитывает простои при обслуживании и ремонте основного и вспомогательного оборудования АСС [3]. Номенклатура показателей надежности отдельных подсистем АСС, как правило, приведена в их нормативно-технической документации.

Суммарное время простоев АСС определяется ее ремонтпригодностью, методами и приемами устранения отказов, наличием систем диагностики, контроля текущего состояния, частотой возникновения отказов, квалификацией обслуживающего персонала, качеством программного обеспечения и другими факторами.

Отказы АСС порождаются всеми ее подсистемами: технологическим оборудованием, системой обеспечения функционирования (как правило, в нее входят такие автоматизированные системы, как транспортно-складская, инструментального обеспечения, управления технологическим оборудованием, управления технологическим процессом, контроля, удаления отходов и др.).

Суммарные внецикловые потери (простои на единицу времени безотказной работы) B_{Σ} , например гибкого производственного модуля (ГПМ), включают потери по инструменту ΣC_i , оборудованию t_e , техническому обслуживанию $B_{\text{т.о}}$ (можно принять в пределах 4...6 % от времени безотказной работы ГПМ [3]) и потери, вызванные отказами системы управления $B_{\text{с.у}}$:

$$B_{\Sigma} = \frac{\sum C_i}{\bar{T}} + \frac{t_e}{\bar{T}} + B_{\text{т.о}} + B_{\text{с.у}} = B_{\text{ин}} + B_{\text{об}} + B_{\text{т.о}} + B_{\text{с.у}}, \quad (1)$$

где \bar{T} — цикл обработки; $B_{\text{ин}}$, $B_{\text{об}}$ — потери, приходящиеся на 1 мин бесперебойной работы, по инструменту и оборудованию соответственно.

При этом коэффициент технического использования проектируемого ГПМ

$$\eta_{\text{тех}} = \frac{1}{1 + B_{\Sigma}}. \quad (2)$$

В работе [3] предложен расчет надежности изделия с использованием экспоненциального закона распределения:

$$P(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t},$$

где λ_{Σ} — суммарное значение параметра потока отказов,

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \lambda_i;$$

λ_i — параметр потока отказов i -го элемента.

Рассматриваемое изделие содержит i элементов, а значения λ_i подбирают из нормативно-справочных материалов с учетом режимов эксплуатации или испытаний. При выборе расчетного значения λ_i , как правило, учитывают уточняющие поправки с помощью специальных расчетных коэффициентов для конкретного элемента по времени его работы, степени нагруженности, условиям эксплуатации, интенсивности включения и другим факторам.

Для каждой подсистемы АСС определяют или рассчитывают параметр потока отказов ω_i и суммарный параметр потока отказов

$$\omega_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \omega_i. \quad \text{Эти параметры наряду с коэффициентом технического}$$

использования определяют вклад в формирование надежности АСС всех элементов подсистемы.

Особую роль в формировании надежности АСС играет надежность технологического оборудования — станков с ЧПУ, ГПМ, гибких производственных систем (ГПС), которые должны обладать высокой функциональной надежностью и при этом гарантировать параметрическую (технологическую) надежность, т. е. надежность точностных параметров работы технологического оборудования для длительного обеспечения заданных размеров деталей [4, 5]. На начальных этапах проектирования и предварительных расчетов АСС можно воспользоваться расчетами схемной надежности, когда рассматривают последовательные, параллельные и другие комбинации «включения» подсистем АСС при известных значениях вероятности их безотказной работы.

Практика проведения оценки и расчетов схемной надежности показывает, что для разбиения сложной системы на отдельные элементы или подсистемы требуется предварительный анализ правильности и правомочности такого разбиения.

В расчетах надежности сложных систем используют также метод логических схем, схемно-функциональный и другие методы [6].

Для анализа и расчета функциональной надежности сложных многофункциональных изделий, к каким можно отнести, например, ГПМ, применяют схемно-функциональный метод [7]. Согласно этому методу, выполняют последовательный анализ надежности работы АСС с оценкой вероятности безотказного выполнения заданных функций в условиях появления различных возможных отказов отдельных агрегатов или функциональных подсистем.

Расчет надежности сложного многофункционального изделия производят при составлении таблицы всех возможных несовместимых состояний отдельных агрегатов и элементов и вероятностей выполнения заданных функций на отдельных режимах работы. Ячейки таблицы заполняют значениями «1» и «0» в зависимости от того, влияет данный вид отказа на выполнение заданной функции или нет. Далее составляют алгебраические уравнения для определения вероятности выполнения i -й функции за время t_i .

Анализ надежности сложной многофункциональной системы, например ГПМ, начинается составлением таблицы возможных состояний системы при выполнении заданных функций (таблица). На основании этой таблицы требуется дать количественную оценку вероятности безотказной работы системы, имеющей следующие исходные данные: n — количество функциональных групп (1, 2, ..., n); m — количество элементарных агрегатов в функциональной группе (1, 2, ..., j , ..., m); s — порядковый номер функции, выполняемой системой (1, 2, ..., i , ..., s); k — количество возможных отказов агрегата функциональной группы (1, 2, ..., v , ..., k).

Таблица возможных состояний системы

Группы	Агрегаты, элементы	Вид отказа	Функции, выполняемые системой						
			1	2	...	i	...	s	
1	1 ⋮ v ⋮ k	1	0	1	...	0	...	1	
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
		v	1	1	...	0	...	0	
		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
	2 ⋮ j ⋮ m	⋮	k	0	0	...	1	...	0
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
			2	0	1	...	0	...	1
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
			j	0	0	...	1	...	0
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
m	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
		1	0	...	0	...	1		
2 ⋮ n	⋮	⋮	1	1	...	0	...	0	
			⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
			0	1	...	1	...	0	

В ячейках таблицы проставляют «1», если отказ не влияет на выполнение системой функции, «0» — если при данном отказе система не может выполнять заданную функцию.

Далее в соответствии с последовательностью схемно-функционального метода расчета надежности сложных многофункциональных

систем определяют вероятность выполнения отдельных функций (для столбца i) за время t .

На основании таблицы возможных состояний, применяя теоремы сложения вероятностей несовместимых событий и умножения вероятностей независимых событий, можно вывести уравнение для определения вероятности $P_i(t_i)$ выполнения системой i -й функции за время t_i :

$$P_i(t_i) = \prod_{j=1}^m P_j \left[1 + \sum_{j=1}^m \frac{\sum_{v=1}^k q_{jv}}{P_j} \right], \quad (3)$$

где P_j — вероятность безотказной работы j -й подсистемы (агрегата); q_{jv} — вероятность отказа агрегата j по виду отказа v за время t_i при выполнении функции i . Суммирование производится только по тем строкам для k и m , где для функции i проставлена единица.

В качестве примера составим уравнение для определения вероятности выполнения функциональной группой 1 первой функции в течение времени t . Допустим, что уравнение (3) составлено с учетом отказов агрегатов 3, 5 и 6, которые не влияют на выполнение искомой функции. Для третьего агрегата учитывают отказы первого и второго видов, вероятности которых обозначим q_{31} и q_{32} соответственно, для пятого агрегата учитывают отказ второго вида q_{52} и для шестого — отказы первого и второго видов, вероятности которых обозначим q_{61} и q_{62} соответственно. Тогда, согласно (3),

$$P_i(t_i) = \prod_{j=1}^m P_j \left[1 + \frac{q_{31} + q_{32}}{P_3} + \frac{q_{52}}{P_5} + \frac{q_{61} + q_{62}}{P_6} \right].$$

Составим уравнение для определения вероятности выполнения функциональной группой 1 (устройством загрузки-выгрузки ГПМ) первой функции – загрузки заготовки на ГПМ в течение времени t . Если для данного случая принять усредненно, что $P_j = 0,95$, а $q_{jv} = 0,02$, и считать, что время работы ГПМ = 480 мин, а соответ-

ствующее ему время $t_i = 30$ мин, то $\prod_{j=1}^m P_j = 0,734$, а $P_i(t_i) = 0,812$.

Некоторые рекомендации по проведению испытаний АСС при ограниченном числе объектов:

- испытание должно сочетаться с прогнозированием, оценкой и расчетом надежности;

- целесообразно использовать информацию об эксплуатации и ремонте, результаты эксплуатации систем-аналогов, статистические данные о надежности отдельных подсистем и элементов АСС;

- моделирование (в том числе и машинное) поведения сложной системы следует выполнять в условиях эксплуатации;

- для сложных систем допустимо исследование в процессе испытаний не всей области возможных состояний, а только граничных, которые определяют степень удаления параметров системы от предельных состояний;

- в ряде случаев при испытаниях на надежность допускается получение лишь некоторых показателей надежности или сравнительных оценок.

Отказы автоматизированного оборудования механосборочного производства, в частности отказы станков с ЧПУ, ГПМ, робототехнических комплексов, можно разделить на отказы функционирования и параметрические отказы. В первом случае АСС не может выполнять свои функции из-за отказа какой-либо подсистемы. Во втором – нарушается точность обработки на одной из технологических машин, одном из станков, ГПМ и т. д., входящих в состав АСС.

Зачастую основное и вспомогательное оборудование АСС эксплуатируют после пусконаладочных работ до первого отказа или в течение периода времени T_0 , в продолжение которого сохраняется заданное значение $P(t)$. После этого проводят техническое обслуживание подсистем АСС для восстановления их работоспособности. Предельное с точки зрения работоспособности АСС или ее подсистем состояние наступает в момент, когда среднее время между отказами T_{cp} станет меньше допустимого значения $T_{cp \min}$, технически и экономически обоснованного. Параметр потока отказов $\omega = 1/T_{cp}$ при этом становится больше допустимых значений. Запас надежности оборудования АСС составит

$$K_n = \frac{T_{cp}(t)}{T_{cp \min}} = \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega(t)}, \quad (4)$$

где $\omega_{\text{доп}}$ — допустимое значение параметра потока отказов.

Как правило, АСС рассматривают как сложную систему, которая может быть разделена на подсистемы и элементы, выполняющие определенные функции и работающие в совокупности. Наиболее важным вопросом является выявление тех элементов и подсистем, отказы которых приводят к функциональным и/или параметрическим отказам АСС.

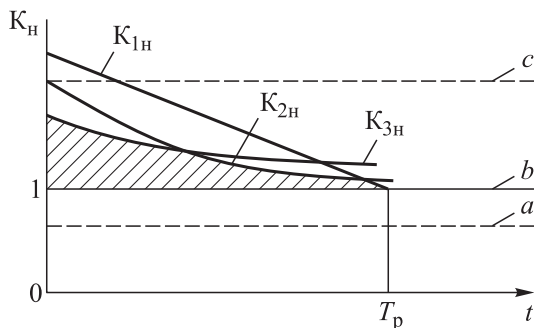
При расчете надежности сложных систем возможны случаи, когда скомпонованная из «надежных» подсистем АСС «ненадежна». Это может происходить из-за влияния подсистем АСС друг на друга,

неполноты исходной информации о взаимодействиях подсистем и элементов АСС, влияния внешних условий эксплуатации АСС (вибрация, запыленность, сильные электромагнитные поля, повышенная температура, бракованные заготовки, неудовлетворительная работа обслуживающего персонала, недостаточный уровень программного обеспечения, систем диагностики и т. д.).

В научно-технической литературе существует понятие «запас надежности» $K_n = \frac{X_{\max}}{X_{\text{эк}}}$, где X_{\max} — максимально возможное (исходя из требований точности обработки) значение одного из выходных параметров станка, $X_{\text{эк}}$ — экстремальное значение этого показателя за данный период эксплуатации $t = T_o$. Для надежной работы технологической машины, станка, ГПМ K_n должен быть больше единицы.

Для высоконадежных технологических систем (станков с ЧПУ, ГПМ, гибких производственных систем и пр.) основной характеристикой надежности является запас надежности K_n по каждому из выходных параметров технологической машины или системы машин.

При этом ресурс технологической машины или системы машин T_p будет определяться не только значением этого запаса, но и скоростью изменения запаса надежности $K_n(t)$ во времени. Поскольку для каждого параметра законы изменения $K_n(t)$ могут быть разными (рисунок), запас надежности всей системы может лимитироваться в процессе эксплуатации то одним, то другим выходным параметром технологической машины. На примере различных требований к точности



Запас надежности системы с несколькими выходными параметрами для одной или нескольких технологических машин: K_{1n} , K_{2n} , K_{3n} — коэффициенты надежности различных технологических машин; $////$ — область безотказной работы технологической системы машин

обработки конкретной детали видно, что при изменении отношения погрешности обработки Δ_0 к выходному параметру станка $\Delta_{ст}$ будут меняться и запасы надежности.

При $\frac{\Delta_0}{\Delta_{ст}} > 1$ запас надежности больше 1 и вероятность выполнения размера в пределах допуска $P(t) = 1$ (линии *a* и *b* на рисунке).

При $\frac{\Delta_0}{\Delta_{ст}} < 1$ запас надежности меньше 1 (линия *c* на рисунке), вероятность выполнения заданного допусками размера $P(t) < 1$.

Запас по точности обработки и запас надежности K_n , определенные за межналадочный период, являются исходными данными для определения ресурса станка T_p и вероятности безотказной работы $P(t)$ по точности обработки. При этом для оценки технологической надежности (надежности по ряду параметров станка) недостаточно рассматривать только вероятность безотказной работы, так как по ней нельзя судить о запасе надежности станка с ЧПУ по точности обработки $\Delta_{ст}$.

В случае обработки деталей, имеющих различные допуски, запас надежности будет разным как для конкретной детали, так и для отдельных станков, входящих в состав АСС [8].

Как показали исследования вертикально-фрезерного станка 6520Ф3 с ЧПУ, основную долю в общем балансе погрешностей обработки составляют погрешности из-за тепловых деформаций $\Delta_{ст}$, которые изменяются во времени и зависят от частоты вращения шпинделя, режимов резания, окружающей температуры, условий теплообмена, используемых смазочно-охлаждающих жидкостей. При погрешностях, вызванных тепловыми деформациями более 57 мкм вероятность безотказной работы станка снижается до 0,9 по сравнению с $P(t) = 1$ в начале межналадочного периода. Запас надежности K_n снижается от 2,04 до 1 даже без учета погрешности программирования.

В заключение можно отметить, что отказы АСС обусловлены отказами их подсистем, режимами и условиями эксплуатации, недостаточной квалификацией обслуживающего персонала [9].

Более простыми методами оценки надежности АСС являются методы структурных схем, логических схем, расчета коэффициента технического использования АСС. Однако, по мнению автора, наиболее точным методом оценки расчета надежности АСС является схемно-функциональный.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л. *Обеспечение надежности сложных технологических систем*. 2-е изд. Санкт-Петербург, Лань, 2013, 352 с.

- [2] Малафеев С.И., Копейкин А.И. *Надежность технологических систем*. Санкт-Петербург, Лань, 2012, 320 с.
- [3] Волчкевич Л.И. *Автоматизация производственных процессов*. 2-е изд. Москва, Машиностроение, 2007, 379 с.
- [4] Чалаби И.Г. Определение показателей надежности современных машиностроительных изделий. *Вестник машиностроения*, 2014, № 8, с. 64–68.
- [5] Гудков А.Г. Комплексная технологическая оптимизация медицинской техники. *Машиностроитель*, 2014, № 12, с. 50–61.
- [6] Иванов А.С. Методы повышения надежности машин. *Вестник машиностроения*, 2009, № 2, с. 7–12.
- [7] Косточкин В.В. *Надежность авиационных двигателей и силовых установок*. Москва, Машиностроение, 1976, 256 с.
- [8] Соломенцев Ю.М., ред. *Проектирование автоматизированных участков и цехов*. 3-е изд. Москва, Высшая школа, 2003, 262 с.
- [9] Додонов В.В. Вероятностные модели расчета производительности автоматизированных станочных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 11, с. 8–10.

Статья поступила в редакцию 21.01.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Додонов В.В. Надежность автоматизированных станочных систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 2.
URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/tempp/1370.html>

Додонов Владимир Владимирович окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — автоматизация производственных процессов в машиностроении. e-mail: chetvernin@inbox.ru

Reliability of automated machine tools

© V.V. Dodonov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper deals with the analysis, evaluation and calculation of the reliability of the automated machine tools (AMT). It also considers the main parameters affecting the reliability of the AMT. The author offers to carry out calculation of the functional reliability of the flexible manufacturing cell by a system-functional method. The article shows a possibility of obtaining information about the reliability of the AMT when there are a limited number of test subjects. Problems of forming said reliability margin of the AMT and its use to assess the reliability of the AMT are under consideration. The impact of a safety margin for the individual parameters on the AMT resource is illustrated by examples.

Keywords: *automated machine tools, reliability, reliability assessment, calculation of the reliability, functional reliability, parametric reliability.*

REFERENCES

- [1] Dorokhov A.N., Kernozhitsky V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L. Obespechenie nadezhnosti slozhnykh tekhnologicheskikh system [Providing reliability of complex technological systems]. 2nd ed. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013, 352 p.
- [2] Malafeev S.I., Kopeikin A.I. Nadezhnost tekhnologicheskikh system [Reliability of technological systems]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2012, 320 p.
- [3] Volchkevich L.I. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov [Computer-aided manufacturing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007, 379 p.
- [4] Chalabi I.G. *Vestnik mashinostroeniya — Herald of Engineering Industry*, 2014, no. 8, pp. 64–68.
- [5] Goudkov A.G. *Mashinostroitel — Mechanician*, 2014, no.12, pp. 50–61.
- [6] Ivanov A.S. *Vestnik mashinostroeniya — Herald of Engineering Industry*, 2009, no. 2, pp. 7–12.
- [7] Kostochkin V.V. Nadezhnost aviatsionnykh dvigateley i silovykh ustanovok [Reliability of aircraft engines and power plants]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 256 p.
- [8] Solomentsev Yu.M., et al. Proektirovanie avtomatizirovannykh uchastkov i tsekhov [Design of automated sites and shops]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2003, 262 p.
- [9] Dodonov V.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering journal: science and innovations*, 2014, issue 11. Available at: <http://engjournal.ru/articles/1334/1334.pdf>

Dodonov V.V. (b. 1942) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1965. Ph.D., associate professor of the Department of Metal Cutting Machines at Bauman Moscow State Technical University. Scientific research: machine tool automated system design. e-mail: chetvertin@inbox.ru