

УДК 621.192

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕМОНТОПРИГОДНОСТИ ТРЕХКУЛАЧКОВОГО ПАТРОНА МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ

М. И. МИХАЙЛОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: ремонтпригодность, узел станка, моделирование.

Введение

Важнейшие тенденции развития станкостроения – повышение точности, производительности и уровня автоматизации станков. Повышение точности изделий, обрабатываемых на станках, позволяет существенно повышать технические характеристики новых машин. Повышение точности станков достигается обеспечением точности важнейших узлов станков при проектировании, повышением точности их изготовления и ее сохранения в эксплуатации.

Повышение производительности станков достигается повышением режимов резания, применением новой прогрессивной технологии с уменьшением нерабочего для инструмента времени.

Затраты на ремонт и потери от простоев станков, как и других машин, весьма значительны. Среднее время простоя универсального станка в ремонте, отнесенное к одной смене, составляет 10 мин. Сложность и высокая стоимость станков с ЧПУ требуют соответствующего уровня их надежности и использования. Приемлемый уровень удельной длительности восстановления для станков с ЧПУ составляет 0,05–0,1, т. е. 5–10 ч простоя станка в неплановом ремонте на 100 ч работы по программе.

Точность и производительность станков в значительной степени зависят от их надежности. Все станки имеют большое количество трущихся поверхностей, которые трудно защитить от загрязнений. Надежность станков определяется надежностью механизмов и узлов станков по критерию прочности и других отказов, а также по критериям параметрических отказов, одним из видов которых является точность обработки.

Универсальные станки работают 60–75 % времени с мощностью до 0,5 номинальной и только 1–10 % времени – с номинальной мощностью или допустимой перегрузкой.

Станки с ЧПУ характеризуются более высокими уровнями средних и максимальных значений рабочих нагрузок по сравнению со станками общего назначения. Так, уровень использования токарных станков с ЧПУ по сравнению с обычным для обработки в патроне выше по моменту на 20–25 %, для обработки в центрах выше по мощности – на 20 % и частоте вращения – на 30–40 %. Это приводит к росту частоты отказов.

Математическому моделированию оборудования и инструментов посвящено большое количество работ [1]–[14] и др., позволяющих производить оценку надежности по различным показателям. Однако недостаточно уделялось внимания инженерному анализу ремонтпригодности узлов и оснастки станков [15].

Цель работы – повышение ремонтпригодности трехкулачкового патрона на основе математического моделирования матричным методом.

Моделирование и анализ

Пусть в сборочной единице имеется n деталей и при необходимости замены детали с номером a_i требуется предварительно снять детали с номерами $a_k, a_\ell \dots a_m$. Такую информацию можно записать в матричном виде

$$a_i(a_k, a_\ell \dots a_m).$$

Эта матрица позволяет наглядно оценить доступность детали a_j при ее замене. Число номеров в скобках указывает на количество деталей, которые необходимо предварительно снять (независимо от их состояния), чтобы осуществить замену детали a_i .

Обозначим сумму всех снятых деталей через

$$\sum_j = \sum_{i=k}^m a_i.$$

Эта сумма позволяет вычислить коэффициент доступности j -й детали

$$K_{dj} = 1 - \frac{\sum_j - 1}{\sum_j} = \frac{1}{\sum_j}.$$

Для абсолютно доступных деталей $K_{dj} = 1$, для труднодоступных (базовых) деталей $K_{dj} = \frac{1}{n}$, где n – количество деталей в узле.

Оценку ремонтпригодности узла по критерию его полной разборки можно выполнить по информации, записанной в виде:

$$\begin{aligned} &a_1(a_2 a_3 \dots a_k); \\ &a_2(a_4 a_6 \dots a_8); \\ &\dots\dots\dots \\ &a_n(a_7 a_9 \dots a_m). \end{aligned}$$

Исходную информацию ремонтпригодности узла можно представить в виде матрицы $n \times n$. При этом номера деталей занимают на поле матрицы положения, соответствующие номерам столбцов. Тогда число занятых ячеек в каждой строке \sum_j характеризует доступность детали с номером a_j , а число занятых ячеек в каждом столбце \sum_j будет определять число возможных случаев попутных съёмов детали с номером a_j при необходимой замене других деталей. Чем больше число \sum_i , тем большему числу деталей создаются помехи при их замене. Эта характеристика ремонтпригодности деталей может быть оценена коэффициентом помех

$$K_n = 1 - \frac{1}{\sum_j},$$

который изменяется в пределах $0 \leq K_{nj} < 1$. Для деталей, не создающих помех при замене других элементов узла, $K_{nj} \rightarrow 0$; для деталей, максимально создающих неудобства при замене других деталей, $K_{nj} \rightarrow 1 - \frac{1}{n}$.

Построенная квадратичная матрица несет исходную упорядоченную информацию, общий массив которой

$$M_1 = \sum_{j=a_i}^n (\sum_j)_j \sum_{j=a_i}^n (\sum_i)_i.$$

Квадратичные матрицы обладают рядом признаков, с помощью которых удастся распознавать положение каждого элемента узла в структурной схеме надежности.

Рассмотрим три основных признака первичных квадратичных матриц на примерах матриц $n \times n = 5 \times 5$.

Признак 1. Если у квадратной матрицы заполнены все ячейки и

$$\left. \begin{array}{l} \sum_j = n \\ \sum_i = n \\ M_1 = n^2 \\ i = 1, 2 \dots n \end{array} \right\},$$

то такая матрица является полной, а все представленные в ней элементы являются базовыми и в структурной схеме соединены последовательно, при этом

$$M(1) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \text{ т. е. в схеме } \boxed{1-2-3-4-5}$$

$$K_{ij} = \frac{1}{n}; K_{nj} = 1 - \frac{1}{n}; P(T_y) = \prod_{j=1}^K P_j.$$

Признак 2. Если у квадратной матрицы заполнены только диагональные ячейки, т. е.

$$\left. \begin{array}{l} \sum_j = 1 \\ \sum_i = 1 \\ M_1 = n^2 \\ i = 1, 2 \dots n \end{array} \right\},$$

то такая матрица является диагональной, а все представленные в ней элементы обладают абсолютной доступностью и в структурной схеме соединены параллельно, при этом

$$M(1) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ т. е. в схеме } \begin{array}{|c|} \hline 1 \\ \hline 2 \\ \hline 3 \\ \hline 4 \\ \hline 5 \\ \hline \end{array}$$

$$K_{nj} \rightarrow 1; K_{nj} \rightarrow 0; P(T_\gamma) = 1 - \prod_{j=1}^K (1 - P_j).$$

Признак 3. Если у квадратной матрицы заполнены все ячейки справа (или слева) от диагонали, то в первом случае

$$\begin{aligned} \sum_j^1 &= n; & \sum_i^1 &= 1; \\ \sum_j^2 &= n-1; & \sum_i^2 &= 2; \\ & \dots & & \dots \\ \sum_j^{n-1} &= 2; & \sum_i^{n-1} &= n-1; \\ \sum_j^n &= 1; & \sum_i^n &= n; \end{aligned}$$

$$M = \frac{n+n^2}{2},$$

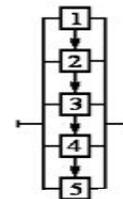
а во втором случае

$$\begin{aligned} \sum_j^1 &= 1; & \sum_i^1 &= n; \\ \sum_j^2 &= 2; & \sum_i^2 &= n-1; \\ & \dots & & \dots \\ \sum_j^{n-1} &= n-1; & \sum_i^{n-1} &= 2; \\ X_n &= n; & \sum_i^n &= 1; \end{aligned}$$

$$M = \frac{n+n^2}{2}.$$

Такие матрицы являются медианными, у которых в первом случае по мере возрастания номеров деталей их коэффициенты доступности и коэффициенты помех монотонно растут:

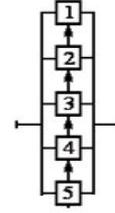
$$M(1) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ т. е. в схеме}$$



$$K_{nj} \rightarrow 1 \text{ при } i \rightarrow n; K_{nj} \rightarrow 1 - \frac{1}{n} \text{ при } j \rightarrow n.$$

При этом $P(T_\gamma) = P_1$, а во втором случае коэффициенты помех монотонно убывают

$$M(1) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \text{ т. е. в схеме}$$



$$K_{nj} \rightarrow \frac{1}{n} \text{ при } j \rightarrow n; K_{nj} \rightarrow 0 \text{ при } j \rightarrow n \text{ и } P(T_\gamma) = P_n.$$

При этом в каждом случае в ряду одноименных коэффициентов нет одинаковых значений. Структурная схема представлена базовым элементом с признаком $\sum_j j = n$ и $\sum_i i = 1$, у которого под стрелкой располагаются элементы в последовательности убывания значений $\sum_j j$.

Вышеперечисленные схемы являются базисными, из комбинаций которых обычно составляют сложные конфигурации структурных схем различных сборочных единиц.

Признак 4. Если первичная матрица обладает признаком 3 и среди членов ряда $\sum_j j$ и ряда $\sum_i i$ есть такие, которые удовлетворяют условию

$$\sum_j^1 = \sum_j^2 = \dots = \sum_j^\ell = n;$$

$$\sum_i^1 = \sum_i^2 = \dots = \sum_i^\ell = \ell,$$

и замена всех оставшихся элементов равносильна замене базового элемента

$$\left(\sum_{j=\ell+1}^n \{a_j\} \right) = n; j = 1, 2, \dots, n,$$

то элементы с номерами a_1, a_2, \dots, a_ℓ являются базовыми и в структурной схеме соединены между собой последовательно. Зная информацию о числе базовых элементов, можно записать структурную формулу в виде

$$P(T_\gamma) = \left(\prod_{j=1}^\ell P_j \right) P_{(\ell+1)-n}.$$

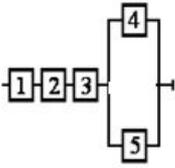
Оставшаяся группа элементов выделяется во вторичную матрицу, внешние характеристики которой определяются по следующим зависимостям:

$$n_2 = n_1 - \ell; \sum_j^{(2)} = \sum_j^{(1)}; \sum_i^{(2)} = \sum_i^{(1)} - \ell;$$

$$M_2 = M_1 - n_1 \ell_1; j = (\ell + 1), (\ell + 2), \dots, n_1.$$

Если вторичная матрица обладает одним из трех первых признаков, то структурная схема полностью определена. В нашем случае вторичная матрица обладает признаком 2. Поэтому можно записать

$$P(T_\gamma) = \prod_{j=1}^{\ell} P_j \left[1 - \prod_{j=\ell+1}^n (1 - P_j) \right].$$

$$M(1) \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \text{т. е. в схеме}$$


Признак 5. Если первичная матрица обладает некоторыми свойствами признака 4, но среди членов ряда $\sum_j^{(1)}$ и ряда $\sum_i^{(1)}$ есть такие, которые удовлетворяют условиям

$$\sum_j^{(1)} = \sum_j^{(2)} = \dots = \sum_j^{(\ell_1)} = n;$$

$$\sum_i^{(1)} = \sum_i^{(2)} = \dots = \sum_i^{(\ell_1)} = \ell_1;$$

$$\sum_j^{(\ell_1+1)} = \sum_j^{(\ell_1+2)} = \dots = \sum_j^{(S_1)} = S_1;$$

$$\sum_i^{(\ell_1+1)} = \sum_i^{(\ell_1+2)} = \dots = \sum_i^{(S_1)} = N_1;$$

$$\{a_{\ell_1+1} \cup a_{\ell_1+2} \cup \dots \cup a_{S_1}\} = S_1; \quad \ell_1 + S_1 = n,$$

то элементы с номерами $a_1, a_2, \dots, a_{\ell_1}$ соединены между собой последовательно и у них под общей стрелкой расположены соединенные между собой последовательно элементы с номерами $a_{\ell_1+1}, a_{\ell_1+2}, \dots, a_n$.

В нашем примере имеем

$$P(T_\gamma) = \prod_{j=1}^{\ell_1} P_j.$$

При этом характеристики вторичной матрицы (для элементов, находящихся под стрелкой в структурной схеме) будут определяться по следующим зависимостям:

$$n_2 = n_1 - \ell_1; \quad \sum_j^{(2)} = \sum_j^{(1)}; \quad \sum_i^{(2)} = \sum_i^{(1)};$$

$$M_2 = M_1 - n(S_1 + \ell_1) + S_1 \ell_1; \quad j = (\ell_1 + 1), (\ell_1 + 2), \dots, n_1.$$

Легко убедиться, что вторичная матрица для элементов под стрелкой в нашем случае обладает признаком 1.

Характеристики вторичной матрицы для базовых элементов определяют по зависимостям

$$n_2 = n_1 - S_1; \quad \sum_j^{(2)} = \sum_j^{(1)} - S; \quad \sum_i^{(2)} = \sum_i^{(1)};$$

В этой матрице можно выделить отдельные блоки, которые позволяют использовать вышеприведенные частные случаи, и составить структурную схему (рис. 2).

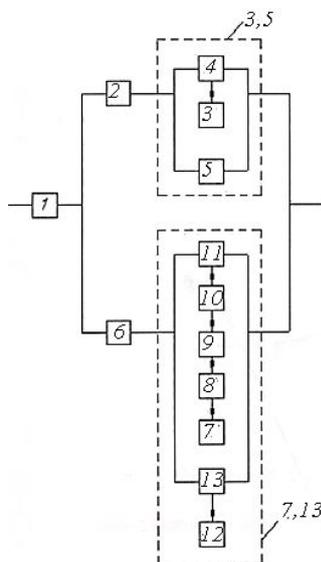


Рис. 2. Структурная схема

Тогда расчетная формула имеет вид:

$$P_c = P_1 [1 - (1 - P_2 P_{3,5})(1 - P_6 P_{7,13})],$$

где

$$P_{3,5} = 1 - (1 - P_4)(1 - P_5), \quad P_{10,17} = 1 - (1 - P_{11})(1 - P_{13}).$$

Подставив в эти зависимости параметры можно рассчитать комплексный показатель ремонтпригодности. При проектировании можно условно применить принцип равнонадежности, при котором $P_i = 0,9$. В этом случае необходимо произвести аналогичный анализ другого конструктивного варианта и определить лучший по комплексному показателю ремонтпригодности.

Заключение

Приведена методика математического моделирования узла станка, позволяющая оценить его надежность по комплексному показателю ремонтпригодности. в процессе его проектирования и выполнен анализа ремонтпригодности трехкулачкового патрона токарного станка.

Литература

1. Махутов, Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н. А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2008. – 528 с.
2. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность : в 2 ч. / Н. А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2005. – Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. – 494 с. ; ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. – 610 с.
3. Махутов, Н. А. Ресурс безопасной эксплуатации сосудов и трубопроводов / Н. А. Махутов, В. Н. Пермяков. – Новосибирск : Наука, 2005. – 516 с.

4. Проблемы разрушения, ресурса и безопасности технических систем : к 60-летию чл.-кор. РАН Н. А. Махутова / под ред. В. В. Москвичева, М. М. Гаденина, А. П. Черняева. – Красноярск : КОДАС, 1987. – 519 с.
5. Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем : сер. из 5 кн. – Новосибирск : Наука, 2002–2006.
6. Акимов, В. А. Катастрофы и безопасность / В. А. Акимов, В. А. Владимиров, В. И. Измалков. – М. : Деловой экспресс, 2006. – 392 с.
7. Техногенный риск, надежность и диагностика технических систем: подходы, модели, методы / Н. А. Махутов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3/4 (20, 21). – С. 67–85.
8. Альгин, В. Б. Динамика, надежность и ресурсное проектирование трансмиссий мобильных машин / В. Б. Альгин. – Минск : Навука і тэхніка, 1995. – 256 с.
9. Альгин, В. Б. Расчет реальной надежности машин. Подходы ресурсной механики / В. Б. Альгин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 1 (14). – С. 10–20.
10. Альгин, В. Б. Методология ресурсно-функционального вероятностного расчета, проектирования и оценки мобильной техники / В. Б. Альгин // Механика машин на пороге III тысячелетия : материалы Междунар. науч. конф., Минск, 23–24 нояб. 2000 г. – Минск : Белавтотракторостроение, 2001. – С. 292–306.
11. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В. Б. Альгин [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2010. – 109 с.
12. Расчет реальной надежности машин. Методики, программные средства, примеры / В. Б. Альгин [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2011. – № 2 (15). – С. 11–17.
13. Samuel, P. D. A planetary gearbox diagnostic technique using constrained adaptive lifting / P.D. Samuel, D.J. Pines // In Proceedings of the DSTO Third International Conference on Health and Usage Monitoring. – HUMS2003, Melbourne, Australia, Febr. 2003. – Paper No. 5.9; Included on CD-ROM.
14. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 272 с.
15. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. – М. : Машиностроение, 1990. – Т. 8: Эксплуатация и ремонт / под ред. В. И. Кузнецова и Е. Ю. Барановича. – 320 с.

Получено 10.09.2018 г.