



ДМИТРИЕВ

Борис Михайлович

доктор технических наук,
профессор кафедры
«Металлообрабатывающие
станки и комплексы»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Достоверность оценки остаточного ресурса металлообрабатывающего станка

Б.М. Дмитриев

Рассмотрен один из параметров долговечности станка, как остаточный ресурс. В проблеме остаточного ресурса среди множества задач существует задача, в оценке достоверности значения остаточного ресурса. В работах по станкостроению этот аспект не нашел своего отражения. Статья посвящена разработке обеспечения достоверности оценки остаточного ресурса металлообрабатывающего станка.

Ключевые слова: ресурс, станок, остаточный ресурс, достоверность, закон старения, предельное состояние, текущее состояние, точность станка, точность детали.

The parameter of a machine durability such as a residual life is being considered. The problem of residual life along with many problems involves such an important problem as a residual life reliable evaluation. This topic has not been given an appropriate consideration in machine-tool construction researches. The article is devoted to the development to ensure the reliability of estimation of the metal-working machine residual life.

Keywords: resource, machine, residual life, reliability, aging law, limiting condition, current status, machine accuracy, part accuracy.

Одним из основополагающих показателей работоспособности технического изделия является срок службы до предельного состояния, или ресурс. Под ресурсом будем понимать установленную продолжительность работы изделия до предельного состояния, предельное состояние изделия — состояние, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна [1]. Во время эксплуатации изделие подвергается различным воздействиям. Действие многих из них при проектировании не учитывают, так как возникают в конкретной рабочей обстановке. Такое положение приводит к тому, что расчетная скорость деградации отличается от реальной. Вследствие этого возникает неопределенность в оценке текущего состояния любого изделия и в том числе металлообрабатывающего станка. Неопределенность в оценке текущего состояния приводит к возможности «неожиданного» выхода из строя станка, что влечет за собой моральные и экономические потери. Для того чтобы оперативно обеспечить работоспособное состояние оборудования требуется информация о текущем состоянии станка.

В данной статье рассмотрен станок универсального назначения с ЧПУ. Для станков такого типа наиболее важным показателем является точность поверхностей деталей. Предмет исследований в данной ра-

боте — остаточный ресурс по точности станка. Под точностью станка будем понимать геометрическую точность конструкции [2].

Целью этой работы является разработка метода оценки остаточного ресурса металлообрабатывающего станка с регулируемым уровнем достоверности оценки. Остаточный ресурс (τ) рассчитывают как разницу между значением ресурса (T) и временем текущего состояния (t) эксплуатации станка:

$$\tau = T - t.$$

Задача сводится к определению времени текущего состояния, т. е. времени, которое станок проработал от начала эксплуатации до текущего состояния. Оценка текущего времени эксплуатации представляет собой прогностическую процедуру. Анализ существующих методов прогнозирования развития различных явлений и процессов обнаруживает общую черту, независимую от объекта прогноза: установление закона или закономерности деградации системы, определение количественного значения параметров этого закона [3]. Изменение работоспособности станка, как показали исследования, не противоречит экспоненциальному закону [4].

В станкостроении следует отметить наличие системы планово-предупредительных ремонтов [5]. Она была основана на анализе огромного фактического материала. При этом, при проведении работ по восстановлению станков предлагалось пользоваться некоторыми усредненными показателями, что не обеспечивало достоверной оценки остаточного ресурса для конкретного станка.

За последние 15—20 лет сильно усложнилась конструкция станков, резко возросла энерговооруженность всей системы в связи с ужесточением режимов работы: к механическим воздействиям в процессе обработки заготовок присоединяется действие термических процессов. И это действие становится соизмеримым с механическим действием, как на точность, так и на производительность. При этом термические процессы не только изменяют параметры геометрической точности станка, но и ме-

няют свойства несущей системы, а также жесткость конструкции [6].

Исследование свойств станка в таких условиях приводит к необходимости рассматривать его как термодинамическую систему (ТДС). По определению ТДС — это система, состоящая из макротел, обменивающаяся энергией с внешней средой и обменивающаяся энергией между составными частями системы. Обязательным условием является наличие в системе термических явлений, т. е. изменение температуры в конструкции [7]. Данное условие требует при исследовании свойств станка воспроизводить рабочий процесс.

Второе начало термодинамики утверждает, что все ТДС изменяют свое состояние под действием естественных процессов и состояние изменяется всегда в одну сторону, в сторону деградации, в сторону увеличения энтропии. Этот процесс описывается формулой Больцмана:

$$S = k \ln W,$$

где S — энтропия системы; k — коэффициент Больцмана; W — вероятностная характеристика внутреннего состояния ТДС.

Приведенная зависимость показывает связь того ненаблюдаемого внутреннего состояния ТДС (W) и внешнего наблюдаемого параметром (S) и показывает логарифмический характер изменения внутреннего состояния ТДС при протекании естественных процессов. Применительно к станку как к ТДС параметр W характеризует ненаблюдаемое внутреннее состояние, которое изменяется как под действием процессов, связанных с перераспределением напряжений в конструкции (литейные напряжения, усилия от затяжки резьбовых соединений и т. д.), так и процессов, связанных с рабочим процессом (изнашивания, вибрации, коррозия, термические явления). Эти и другие процессы, происходящие внутри конструкции, влияют на выходных параметрах системы в виде изменения температуры, вибрации, либо изменения точности станка, либо его производительности

В практике существуют две равнозначные формы закона деградации конструкции: экспо-

ненциальная и логарифмическая. Для исследований используем наиболее применяемую в теории надежности экспоненциальную форму

$$S(t) = S_m(1 - e^{-\lambda t}),$$

где $S(t)$ — текущая погрешность обработки выпускаемых деталей (внешнее проявление тех внутренних ненаблюдаемых процессов, характеризующих внутреннее состояние конструкции). При оценке количественных значений величин, входящих в зависимость, воспроизводят условия существования ТДС. Величина S_m определяет максимально допустимую погрешность для данной модели станка, по достижению которой станок требует восстановления. Внутреннее ненаблюдаемое состояние характеризуется величиной λt .

Под точностью станка будем понимать геометрическую точность его элементов в начале эксплуатации q_0 , а под изменением точности станка — изменения геометрической точности элементов конструкции под действием сил/моментов (механических, термических, износовых). Обозначим точность станка $q(t)$ и соответственно q_m — когда исчерпан ресурс T . Для определения качественного значения остаточного ресурса τ необходимо иметь нормативные документы на q_0 , q_m , T , текущее значение погрешности обработки $q(t)$, а также значение параметра λ . Эту величину определяют по форме закона старения и двух достаточно определенных состояний. Начальное состояние после проведения приемо-сдаточных испытаний и предельного состояния, когда станок выводится в ремонт. В предельном состоянии максимальное значение погрешности не равно максимальному значению, как указано в нормативных документах, а равно отсюда ближайшему к нему, например $0,99 q_m$. Отсюда величину λ определим из соотношения

$$0,99q_m = q_m(1 - e^{\lambda t})$$

$$\lambda = -\frac{\ln 0,01}{T} = 4,6 \frac{1}{T} = 0,217 \frac{1}{T}.$$

Текущее значение точности станка определим, рассмотрев процесс образования поверх-

ности детали при взаимодействии инструмента и заготовки при токарной обработке (рис. 1).

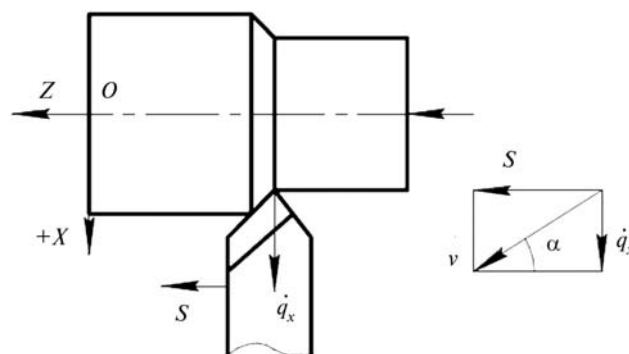


Рис. 1. Взаимодействие составляющих скоростей в процессе обработки:

S — движение подачи; q_x — движение погрешности; v — скорость формирования погрешности станка

Вершина резца в момент обработки участвует в двух движениях: движение формообразования (со скоростью S величиной подачи) и скоростью перпендикулярно к движению подачи (имеющей значение q_x). Это движение, конструкции станка, назовем его движением погрешности, возникает в результате тех процессов, которые образуются в конструкции как следствие процесса резания: отжатие заготовки от инструмента, износ инструмента, движение конструкции под действием термических возмущений, непрямолинейности направляющих и т. д. В принципе скорость изменений геометрической точности станка под действием возникающих возмущений от рабочего процесса.

Как угол $\alpha = \frac{q_x}{S}$, так и скорость $v = \pm \sqrt{S^2 + q_x^2}$ характеризуют процесс изменения точности станка. Однако оба параметра α и v характеризуют мгновенное состояние системы, и в практическом плане не пригодны для количественной оценки остаточного ресурса. Для того чтобы знать количественное значение точности станка рассмотрим процесс обработки базовой (100 мм) длины (рис. 2).

Из заготовки диаметром d_1 требуется получить деталь диаметром d_2 . После обработки на поверхности детали d_3 остается слой металла объемом d_3 ; z_0 ; π ; $q(z)$:

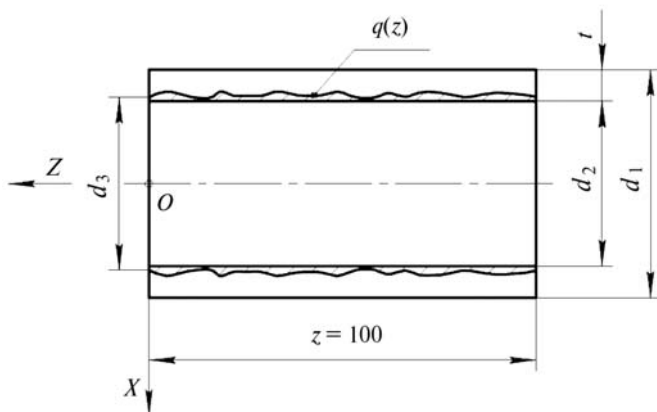


Рис. 2. Погрешность станка, реализованная на детали:

d_1 — диаметр заготовки; d_2 — требуемый диаметр детали; d_3 — реальный диаметр детали

$$q(z) = \pi d_3 \int_0^{z_0} q(z) dz.$$

Исходя из условия воспроизведения ТДС, оценка точности станка должна учитывать обмен энергией с внешней средой и обмен энергией между составными частями конструкции. В первом случае это потребление электромагнитной энергии (приводами станка), во втором — взаимодействие частей конструкции (кинематической энергии формообразующих узлов). Выполнение указанных выше условий возможно только при наличии процесса резания. Кроме того требуется, чтобы проявилось действие температуры. Для этого потребуется обработка партии заготовок в течение смены. Тогда точность станка будет оцениваться суммарным объемом оставшегося металла как сумма с полученных деталей:

$$q(t) = \sum_1^n q(z).$$

В результате проведенного анализа определен метод оценки времени остаточного ресурса, что позволяет разработать способ регулирования достоверностью оценки остаточного ресурса. Зависимость остаточного ресурса от составляющих имеет следующий вид (после элементарных преобразований):

$$\tau = T \left[1 + 0,217 \ln \left(1 - \frac{q(t)}{q_m} \right) \right].$$

Точность станка в текущий момент оценивается путем нагружения станка силами резания и измерением реакции станка, т. е. остаточного объема металла на обработанной поверхности.

Для того чтобы однозначно и достоверно оценить текущее состояние станка следует воспроизвести процесс обработки всех материалов, для обработки которых создан станок, всех возможных конфигурациях получаемых деталей и т. д.

Результаты обработки заготовок требуется измерять, при этом так же допускаются погрешности. Таким образом, задача неозрима.

При решении таких задач существуют ограничения на требуемую достоверность, что обусловлено материальными и временными затратами. Причем зависимость достоверности от этих затрат имеет нелинейный характер. Сначала затраты приносят планируемое увеличение достоверности, но наступает момент когда рост затрат не обеспечивает увеличения достоверности.

В первом приближении примем, что достоверность имеет вид экспоненциальной зависимости. В этой связи перед началом работ по оценке остаточного ресурса конкретного станка устанавливают количественное значение уровня достоверности оценки остаточного ресурса и допустимый объем затрат для этих работ. При этом возможно управлять процессом в достижении требуемой достоверности. Во-первых путем исключения из рассмотрения того объема рабочего пространства, в котором станок редко производил работу. Во-вторых за счет использования материала одной марки, наиболее часто используемой при работе на данном станке и т. д.

Для практического применения данного подхода к оценке остаточного ресурса необходимо использовать данные из нормативных документов, ГОСТов на нормы точности и жесткости [2], «Проверке станка в работе». В «Проверке станка в работе» установлены: га-

бариты, форма, материал, требуемая точность, режимы обработки, способ закрепления заготовки, инструмент для обработки, требуемая точность, которая определяет q_0 . В технических заданиях на станок задан ресурс T и допустимая величина погрешности обработки, из которой следует q_m . Данный подход удовлетворителен тем, что в нем использованы положения, согласованные с приемо-сдаточными испытаниями, результаты которых принимаются как пользующиеся доверием при эксплуатации.

При проведении экспериментальных работ по определению величины $q(t)$ при каждом действии следует учитывать различные виды погрешностей. Это важно и для оценки остаточного ресурса, так как на результат оценки сильное влияние оказывает форма закона деградации станка (рис. 3).

В первом приближении считаем, что все погрешности независимы, имеют малое и одинаковое влияние на суммарную погрешность, что дает основание интерпретировать суммарную погрешность как нормальный закон распределения (среднеквадратическое отклонение)

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^n \sigma_i^2},$$

где σ — суммарное отклонение; σ_i — отклонения элементарных составляющих погрешности (свойства материала заготовок, погрешность в оценке скорости резания и т. д.).

Вероятность оценки текущего времени эксплуатации станка

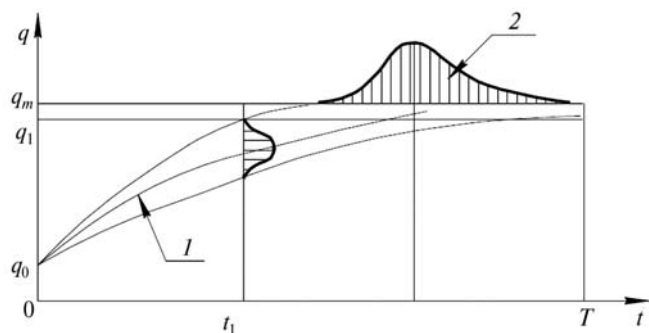


Рис. 3. Формирование погрешности прогноза

$$P(t) = \Phi \left[\frac{q_m - q_0 - q(t) \left(1 - \exp \frac{1}{\lambda} \right)}{\sigma} \right].$$

Математическое ожидание текущего времени эксплуатации станка 1 (рис. 3)

$$M(t) = q + q(t) \left[1 - \exp \frac{1}{\lambda} \right].$$

Математическое ожидание текущего времени эксплуатации станка позволяет определить количественное значение остаточного ресурса, ч,

$$\tau = M(T) - M(t),$$

где $M(T)$ — математическое ожидание ресурса или срока службы станка; $M(t)$ — математическое ожидание времени старения станка.

Дисперсия текущего времени 2 (рис. 3) эксплуатации определяет достоверность оценки остаточного ресурса:

$$D = \int_0^\infty (M(t) - t)^2 f(t) dt,$$

где $f(t) = \frac{dP(t)}{dt}$.

Уровень достоверности данного способа оценки остаточного ресурса определим, сравнив дисперсию (или среднеквадратическое отклонение), полученную экспериментально, с дисперсией ресурса из нормативных документов. Если экспериментальная дисперсия меньше дисперсии ресурса, то достоверность удовлетворительная, если больше, то неудовлетворительна на столько, на сколько она больше требуемой. Оценив, на сколько достоверность оценки неудовлетворительна, необходимо внести корректирующие действия в процесс оценки остаточного ресурса.

Выводы

1. Основопологающим условием достоверной оценки остаточного ресурса является знание закона деградации.

2. Информационная часть оценки, основанная на экспериментальной работе. Это дает возможность регулировать уровень необходимой достоверности оценки, так как каждый из параметров имеет определенную область изменения.

3. Метод может быть применен не только к станкам токарного типа, но и к другим типам и моделям станков.

Литература

1. *Проников А.С.* Параметрическая надежность машин. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 559 с.
2. ГОСТ 18097—72. Станки токарные и токарно-винторезные. Нормы точности и жесткости. Введен 1972—18-8. М.: Изд-во стандартов, 1972. 33 с.

3. *Эрих Янг.* Прогнозирование научно-технического прогресса. М.: Прогресс, 1972. 586 с.

4. *Базовский И.* Надежность. Теория и практика. М.: Мир, 1965. 373 с.

5. Единая система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий. М.: Машгиз, 1962. 735 с.

6. *Дмитриев Б.М., Королев О.Г.* Изменение жесткости станка от действия тепловых возмущений // *Машиностроение*. Изд-во вузов, 1994. № 10. С. 112—116.

7. *Бер Г.Д.* Техническая термодинамика. Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 518 с.

Статья поступила в редакцию 28.11.2011