

УДК 621.09

Г. Н. Васильев, А. Г. Ягопольский

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ МОНИТОРИНГОМ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СУППОРТНЫХ УЗЛОВ<sup>1</sup>

*Рассмотрены вопросы обеспечения технологической надежности токарных станков мониторингом параметров траекторий перемещения суппортного узла. Экспериментальные исследования выполнены с помощью разработанного испытательно-диагностического комплекса с электрогидравлическим модулем программного нагружения. Реализована интерактивная автоматизированная система диагностирования по параметрам траекторий перемещения суппорта.*

**E-mail: VASGN41@mail.ru**

**Ключевые слова:** токарные станки, программный метод испытаний, суппорт, траектория перемещения суппорта, испытательно-диагностический комплекс, интерактивная система диагностики.

Проблема обеспечения высокой технологической надежности металлорежущих станков по мере возрастания требований к качеству станков, усложнению конструкций и условий производства исключительно актуальна для современного машиностроения. Существующие методы диагностирования и прогнозирования технологической надежности станков малоприменимы для решения поставленных задач.

Современным тенденциям развития станкостроения отвечает программный метод испытаний (ПМИ) станков. Важнейшим направлением разработки этого метода является создание методического и информационного обеспечения диагностирования и прогнозирования технологической надежности станков по параметрам траекторий перемещения их формообразующих узлов, к которым, в частности, относится суппортный узел (СУ) токарных станков. В балансе суммарной погрешности обработки цилиндрической поверхности доля составляющих, связанных с состоянием СУ, достигает 25...30% и более. Вместе с тем практически отсутствуют исследования, в которых в комплексе осуществляется диагностирование и прогнозирование технологической надежности станков по параметрам траекторий движения узлов

<sup>1</sup>Материалы статьи являются продолжением работ по программному методу испытаний, предложенному профессором А.С. Прониковым.

поступательного перемещения, к которым относится СУ. Мониторинг параметров траекторий перемещения СУ позволит более достоверно диагностировать текущее состояние станка, прогнозировать его технологическую надежность и вносить обоснованные коррективы в технологические задачи, решаемые с его применением, или проводить необходимые ремонтно-профилактические мероприятия. Это обеспечит такой уровень технологической надежности станка, который необходим для достижения заданного качества изделий. Таким образом, существуют два аспекта актуальной научно-технической задачи обеспечения технологической надежности токарных станков мониторингом параметров траекторий перемещения СУ, имеющей важное значение для экономики:

— исследование влияния теплового режима оборудования на его параметрическую (технологическую) надежность;

— разработка общей методики прогнозирования технологической надежности оборудования инвариантно его группе и типу.

Существующие методы диагностирования станков и прогнозирования их технологической надежности имеют принципиальные недостатки, основными из которых являются: обособленность существующих видов испытаний; отсутствие общепризнанного представления о выходных параметрах станка; отсутствие надежных методик учета стохастического характера явлений при работе станка; недостаточная разработанность тестовых методов диагностирования; недостаточное использование возможностей современной вычислительной техники — все это делает такие методы малопригодными для решения современных задач обеспечения качества изделий.

Современным тенденциям развития станкостроения, выдвигающим длительное сохранение точности основных узлов станков в качестве основного требования, отвечает ПМИ станков, предложенный А.С. Прониковым в 80-х годах XX в. [1]. Основными особенностями, принципиально отличающими ПМИ от существующих методов, являются отказ от суперпозиционного подхода к процессу испытаний, программная автоматизация нагружения станка и ориентация на использование современной вычислительной техники и информационных технологий.

Важнейшим направлением разработки ПМИ станков является создание методического и информационного обеспечения диагностирования и прогнозирования технологической надежности станков по параметрам траекторий перемещения их формообразующих узлов. Ведущими отечественными научными школами, разрабатывающими указанное направление ПМИ, являются МГТУ им. Н.Э. Баумана и МГТУ “СТАНКИН”, что наиболее полно нашло отражение в работах А.С. Проникова, А.В. Пуша, В.М. Утенкова и др. [2, 3].

Суппортный узел, непосредственно участвуя в формообразовании, прямо влияет на процесс формирования качества обработанной поверхности. В настоящее время практически отсутствуют методы комплексного диагностирования и прогнозирования технологической надежности станков по параметрам перемещения их СУ.

Уровень разработок по методическому и информационному обеспечению диагностирования и прогнозирования технологической надежности по параметрам траекторий поступательного перемещения (суппортов, столов, ползунов) металлорежущих станков недостаточен для их использования при реализации ПМИ станков.

Сформулируем цель и основные задачи настоящей работы.

Траекторию формообразующей точки, совпадающей с вершиной реза, установленного в СУ токарного станка, предложено рассматривать как реализацию случайной функции, аргументом которой является значение управляемой координаты [4]. При любом значении аргумента для случайной функции могут быть определены статистические характеристики [5]: математическое ожидание, дисперсия, корреляционная функция. Траекторию формообразующей точки при продольном течении предложено рассматривать в координатном квадранте  $XOZ$  (рис. 1) принятой для токарных станков системы координат. Ее основные выходные параметры приведены в табл. 1.

Определяем правила и зависимости для нахождения значений каждого выходного параметра при продольном и поперечном перемещениях СУ, а также при одновременном перемещении СУ по двум координатам. При нормальном распределении значений отклонений точек траектории по координате  $X$  от заданных значений ширины зоны, в которую с вероятностью  $\gamma$  будут укладываться возможные значения

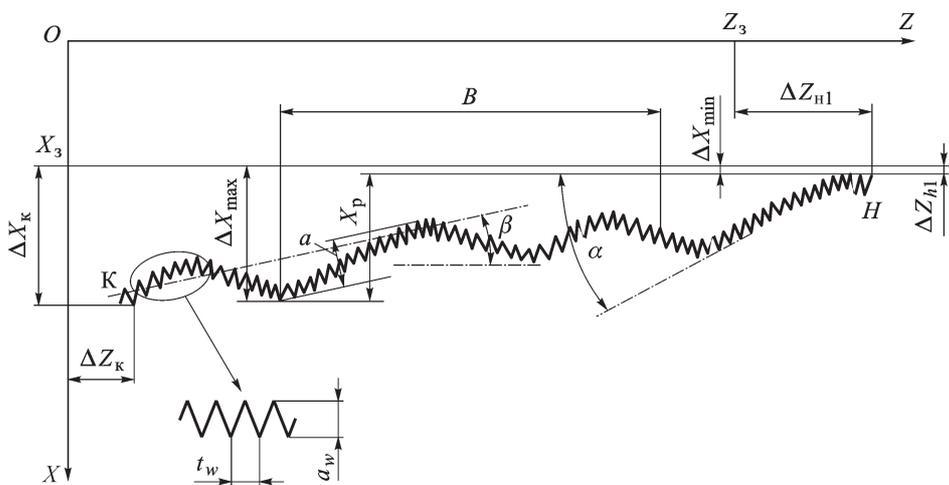


Рис. 1. Выходные параметры единичной реализации траектории формообразующей точки инструмента, установленного в СУ токарного станка при продольном перемещении

Выходные параметры траектории перемещения СУ

Обозначение	Характеристика параметра	Примечание
$\frac{\Delta X_n}{\Delta Z_n}$	Отклонение начала траектории по осям $X$ и $Z$	Отклонение размера
$\frac{\Delta X_k}{\Delta Z_k}$		
$\frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha}$	Наклон траектории Наибольший наклон траектории	Отклонение формы
$\frac{\Delta X_{\min}}{\Delta X_{\max}}$	Минимальное и максимальное отклонения траектории	Отклонение размера
$\frac{X_p}{B}$		
$\frac{B}{a}$	Шаг и высота периодических волн	Волнистость
$\frac{t_w}{a_w}$	Шаг и высота высокочастотных волн	Шероховатость

отклонений, можно найти по уравнению

$$\Delta X(Z_3) = \Delta \bar{X}(Z_3) \pm U_\gamma \sigma_{Z_3}(x), \quad (1)$$

где  $Z_3$  — заданное значение управляемой координаты  $Z$ ;  $\Delta \bar{X}(Z_3)$  — математическое ожидание отклонения при фиксированном значении  $Z_3$ ;  $U_\gamma$  — квантиль нормального распределения при заданной вероятности  $\gamma$ ;  $\sigma_{Z_3}(x)$  — среднеквадратическое отклонение, соответствующее фиксированному значению  $Z_3$ .

Корреляционная функция от траектории как случайной функции имеет вид

$$K(Z_{31}, Z_{32}) = M \left\{ [\Delta X(Z_{31}) - \Delta \bar{X}(Z_{31})] \times \right. \\ \left. \times [\Delta X(Z_{32}) - \Delta \bar{X}(Z_{32})] \right\}, \quad (2)$$

где  $Z_{31}, Z_{32}$  — значения аргумента  $Z_3$ .

Доказано свойство эргодичности траектории как случайной функции.

Группу траекторий, реализованных при фиксированных условиях, называют ансамблем. Найдем параметры ансамблей траекторий поступательного перемещения СУ (рис. 2, табл. 2), правила и зависимости для определения их значений. Ансамбли траекторий заключают в себе диагностическую информацию. Широкополосные совокупности траекторий характерны для внешних силовых воздействий. Узкополосные совокупности характерны при доминирующем влиянии геометрических погрешностей направляющих. Угловая миграция ансамбля

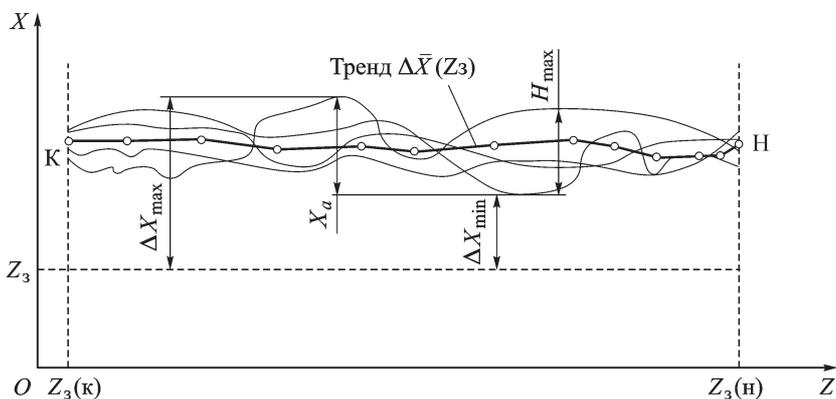


Рис. 2. Параметры ансамблей траекторий (направление оси  $X$  условно изменено)

траекторий связана с влиянием тепловых источников. Смещения ансамблей в разных положениях СУ зависят от деформации корпусных деталей и контактных деформаций. Высота волн траектории в разные периоды эксплуатации станка связана с оценкой интенсивности протекания периода макроприработки направляющих.

Таблица 2

**Параметры ансамблей траекторий поступательного перемещения (рис. 2)**

Параметр	Характеристика параметра
$\Delta\bar{X}(Z_3)$	Тренд – как единичная реализация траектории
$D[F(Z_3)]$	Дисперсия “сечения” ансамбля
$\sigma_{Z_3}(x)$	Среднеквадратическое отклонение координаты $X$ в “сечении” ансамбля
$\Delta X_{\max}$	Максимальное отклонение ансамбля
$\Delta X_{\min}$	Минимальное отклонение ансамбля
$X_a$	Размах ансамбля
$H_{\max}$	Максимальное поле рассеяния ансамбля

Предложим аппарат формальной оценки изменений ансамблей траекторий. В частности, угловую миграцию ансамбля оценивают разностью углов наклонов трендов  $\beta(0)$ ,  $\beta(t_1)$ , сформированных в моменты  $t = 0$  и  $t = t_1$ , например к оси  $Z$ :

$$\xi = \beta(t_1) - \beta(0). \quad (3)$$

Интенсивность миграции может быть оценена как

$$v_\xi = \frac{d\xi}{dt}. \quad (4)$$

В качестве параметра  $t$  может выступать как время, так и, например, средняя температура в технологической системе.

Разработан алгоритм анализа траекторий перемещения СУ по установленным параметрам и необходимый математический аппарат, использующий матричные формы. При указании предельно допустимого значения параметра  $[g_j]$  соответствующий запас надежности  $(k_n)_j$  определяют по формуле

$$(k_n)_j = \frac{[g_j]}{\max \{g_{ji}\}}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где  $i$  — индекс реализации траектории;  $N$  — число реализаций;  $g_{ji}$  — значение  $j$ -го параметра в  $i$ -й реализации траектории.

Для каждого параметра можно определить вероятность нахождения его значения внутри области допустимых значений, интенсивность изменения запаса надежности и вероятность нахождения параметра в области допустимых значений. Для станка в целом могут быть определены оценки сепарабельного типа. Совокупность полученных оценок служит основой для прогнозирования технологической надежности.

Последовательность этапов диагностирования, их назначение и роль в общем процессе оценки и параметрической надежности станка инвариантны объекту диагностирования. Это позволило разработать типовую методику диагностирования по параметрам траекторий перемещения СУ станков. Предложенная концептуальная модель диагностирования ориентирована на автоматизированную реализацию.

При наличии адекватной математической модели диагностируемого объекта определить причины потери им работоспособности можно на основе анализа функций чувствительности модели к изменению значений ее параметров, для чего в настоящей работе предложена формальная методика.

На формирование траектории поступательного перемещения СУ существенно влияют контактные деформации и деформации элементов упругой системы станка, взаимно влияющие друг на друга. Для оценки указанного влияния на значения параметров формирующихся траекторий разработана математическая модель, ориентированная на использование в автоматизированных системах диагностирования станков.

Экспериментальные исследования выполнены с помощью разработанного и аттестованного мехатронного испытательно-диагностического комплекса (ИДК), структура которого показана на рис. 3. Комплекс обеспечивает измерение перемещений СУ до 10 м, дискретность перемещений 0,1 мкм, относительную погрешность измерения  $10^{-6}$  при скорости контролируемых перемещений до 18 м/мин. Регистрация перемещений движущегося СУ выполнялась за счет использования стабилизированного двухчастотного He–Ne-лазера с основной частотой излучения  $5 \cdot 10^{14}$  Гц. Луч лазера после прохождения делителя

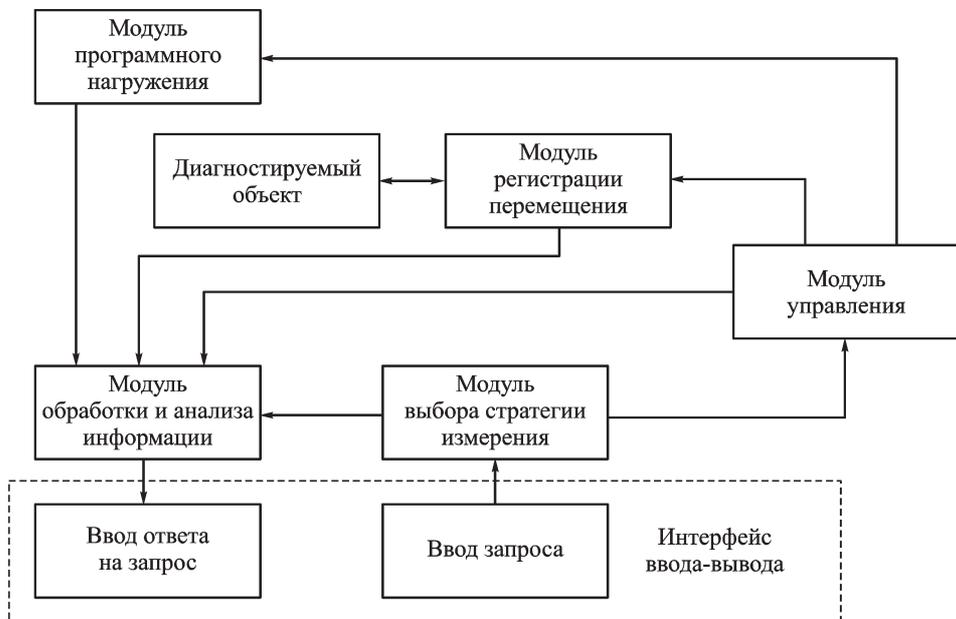
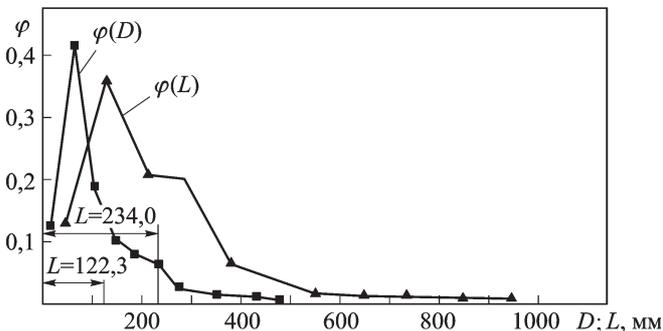


Рис. 3. Структура ИДК

(по направлениям  $Z/X$ ) и оптической системы, состоящей из призмы, отражателя, установленного на магнитной опоре на СУ, поступал в волоконно-оптический интерферометр типа Фабри–Перо с суммарной шириной спектральной линии  $4 \cdot 10^{-9}$  м. Сформированный в счетчиках интерференционных максимумов (по направлениям) сигнал после прохождения аналого-цифрового преобразователя (интерфейс M-Box 4 фирмы Mahr) обрабатывался компьютером (Intel Pentium 4 2400 MHz) с использованием разработанного проблемно-ориентированного программного обеспечения. Результаты обработки информации отображались с помощью интерфейса, через который осуществлялось и управление комплексом.

Оптико-электронная регистрация перемещений движущегося СУ требует исключения влияния флуктуаций атмосферы, что достигалось введением в состав программного обеспечения ИДК модуля атмосферной компенсации. Модуль программного нагружения – это гидравлическая система, включающая в себя гидростанцию, дроссель, гидрораспределитель и гидроцилиндр (диаметр поршня 22 мм, максимальное давление 6,3 МПа, максимальная сила штока 2200 Н), рабочее тело (индустриальное масло 20); нагружение СУ имитировалось при обработке на станке; нагрузка изменялась ступенчато от 500 до 1500 Н.

Исследования диагностической информативности параметров поступательного перемещения СУ выполнялось на токарно-винторезных станках с ЧПУ моделей 16К20Ф3 и 16К20Т1. Работоспособность станка и его технологическую надежность в наибольшей мере характеризуют параметры траекторий и их ансамблей, соответствующих зоне



**Рис. 4.** Изменение относительных частот распределения диаметров  $\varphi(D)$  и длин заготовок  $\varphi(L)$ , обрабатываемых на токарно-винторезных станках с ЧПУ

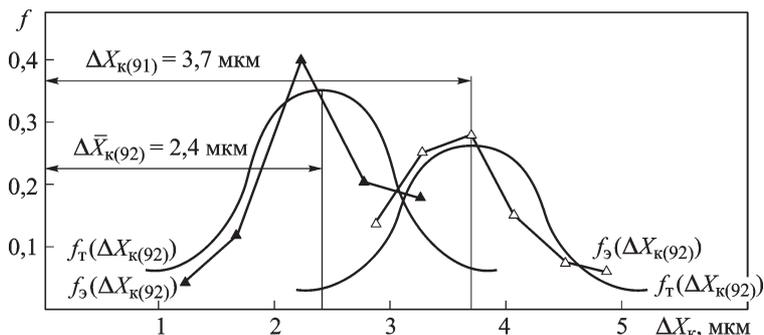
наиболее интенсивной эксплуатации. Указанную зону определяли в результате статистической обработки данных о загрузке станка. На рис. 4 показано изменение относительного распределения диаметров  $\varphi(D)$  и длин деталей  $\varphi(L)$ , полученное на основе изучения нагружения 25 станков указанных моделей с февраля 1999 г. по февраль 2003 г.

На базе полученных данных была определена область диагностирования указанных станков по параметрам траекторий перемещения СУ.

В результате исследований установлено, что значения параметров траекторий перемещения СУ подчиняются закону нормального распределения инвариантно положению ансамбля в области диагностирования (рис. 5). Для каждого параметра проверена гипотеза нормального распределения и определены основные статистические характеристики.

Значение статистических характеристик прямых и обратных траекторий не совпадают. Траекториям рабочих перемещений соответствуют большие значения математических ожиданий параметров и большие поля их рассеяния.

Анализ полученных корреляционных функций, графики которых показаны на рис. 6, выявил малую коррелированность значений ис-



**Рис. 5.** Распределение параметра  $\Delta X_k$  прямой (91) и обратной (92) траекторий СУ:

$f$  — относительная частота;  $f_9$  — экспериментальное распределение;  $f_T$  — теоретическое распределение

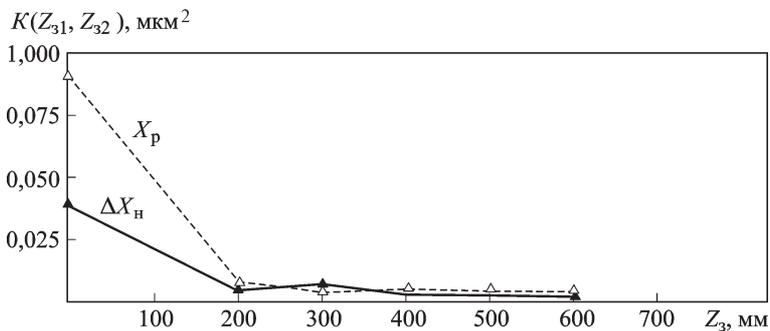


Рис. 6. Графики корреляционных функций (2) для параметров  $\Delta X_n$  и  $X_p$

следуемых параметров с единичными реализациями траекторий и подтвердил их эргодичность как случайных функций.

Для траекторий перемещения СУ, сформированных без нагружения технологической системы, абсолютные изменения значений математических ожиданий линейных параметров составляют 1...3 мкм, относительные — в пределах 0,5...2,4 раза, поля рассеяния изменяются в диапазоне 0,5...3,0 раза.

Характеристики угловых параметров прямых и обратных траекторий, принадлежащих разным ансамблям, близки по значениям и стабильны, что свидетельствует о независимости указанных параметров от реализации ансамбля траекторий, формируемых без нагружения технологической системы. Для параметров — линейных отклонений управляемых координат перемещений — наблюдается накапливание значений на конце траектории.

На основе анализа значений параметров траекторий перемещения СУ оценена доля факторов, определяющих суммарную погрешность обработки: при чистовых режимах доминирует геометрическая точность станка (доля до 40%); при получистовых и черновых режимах доминируют упругие деформации технологической системы; тепловые деформации составляют до 35% суммарной погрешности обработки и относительно стабильны на всех режимах.

Упругое смещение СУ под действием нагружающей силы происходит неравномерно: в центральной части траектории оно больше, чем по краям, что объясняется различием жесткости системы “СУ–направляющие” по длине последних. Параметры траектории перемещения СУ, сформированные под нагрузкой, и их статистические характеристики обладают разной диагностической информативностью: отклонения начала и конца траектории по управляемой координате практически не зависят от нагрузки; отклонения траектории в направлении приложенной силы прямо пропорциональны ее значению и могут быть использованы для определения других характеристик элементов станка.

Наклон траектории перемещения СУ увеличивается с ростом нагрузки технологической системы, что объясняется изменением положения средней линии траектории вследствие деформаций технологической системы. Максимальный наклон траектории практически не зависит от нагрузки и не может быть рекомендован для использования при диагностировании по параметрам траекторий, сформированных под нагрузкой.

Значения параметров траекторий, сформированных под нагрузкой, мало зависят от положения ансамбля в области диагностирования, что может быть использовано для сокращения объема и трудоемкости диагностического обследования станков.

Рассмотрим прогнозирование технологической надежности и диагностирование состояния токарных станков по параметрам траекторий перемещения СУ. У станков токарной группы, состояние которых отвечает требованиям действующих стандартов, отклонение размера обработанной поверхности в среднем на 20 % определяется состоянием СУ. При эксплуатации оборудования баланс составляющих погрешностей нарушается в сторону возрастания доли погрешностей, обусловленных работой СУ. Каждому состоянию станка соответствует определенное значение каждого из множества параметров траекторий перемещения СУ.

Область работоспособности станка ( $R_j$ ) по параметрам траектории перемещения СУ можно записать как

$$\forall j = 1, \dots, m, \quad R_j = |[g_j(t_3)] - g_j| = |g_j \{ [k_\Delta(t_3)] - 1 \}|, \quad (6)$$

где  $g_j$  — значение  $j$ -го параметра в начале эксплуатации станка;  $[g_j(t_3)]$  — предельно допустимое значение параметра  $j$  (после времени эксплуатации  $t_3$ );  $[k_\Delta(t_3)]$  — предельно допустимое увеличение доли погрешностей обработки, связанное с состоянием СУ;  $m$  — общее число параметров.

Область состояния по  $j$ -му параметру для фиксированного времени  $\tau$  ( $0 \leq \tau \leq t_3$ ) при нормальном распределении параметра определяется по формуле

$$C_j = 6\sigma_j(\tau), \quad (7)$$

где  $\sigma_j(\tau)$  — среднеквадратическое отклонение параметра  $j$ .

Условия работоспособности станка по параметру  $j$  представим как

$$g_j \leq \bar{g}_j(\tau) \pm 3\sigma_j(\tau) \leq [g_j(t_3)]. \quad (8)$$

Запас надежности (работоспособности) по параметру  $j$  запишем следующим образом:

$$(k_n)_j = \frac{R_j}{C_j}. \quad (9)$$

При перманентном увеличении значения параметра запас надежности определяют по выражению (5). При невыполнении условия (8)

определяют вероятность безотказной работы станка по  $j$ -му параметру:

$$P_j(\tau) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{[g_j(t_2)] - \bar{g}_j(\tau)}{\sigma_j(\tau)} \right], \quad (10)$$

где  $0 \leq \Phi \leq 0,5$  — нормированная функция Лапласа.

Величины  $(k_n)_j$  и  $P_j(\tau)$  — основные характеристики технологической надежности станка.

Запишем следующие показатели стабильности:

$$k_j(\tau_1, \tau_2) = \frac{(k_n)_{j,\tau_2}}{(k_n)_{j,\tau_1}}$$

— запас надежности;

$$P_j(\tau_1, \tau_2) = \frac{P_j(\tau_2)}{P_j(\tau_1)}$$

— вероятность безотказной работы, где  $(k_n)_{j,\tau_1}$ ,  $(k_n)_{j,\tau_2}$  — запасы надежности по параметру  $j$  в моменты времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ;  $P_j(\tau_1)$ ,  $P_j(\tau_2)$  — вероятности безотказной работы по параметру  $j$  в моменты времени  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ .

Оценить вероятность безотказной работы станка по всей совокупности параметров в фиксированный момент времени  $\tau$  можно по формуле

$$P_c(\tau) = \prod_1^m P_j(\tau), \quad j = 1, \dots, m. \quad (11)$$

В целях установления допустимых диапазонов изменения значений каждого из исследуемых параметров траекторий и выявления связей значений параметров и характеристик точности обработки на станке выполним экспериментальное исследование. В группу исследуемого оборудования входили станки 16K20Ф3, 16K20Т1, 16K30 по одной штуке. Станки выпущены в 1993 г. и до 1998 г. не эксплуатировались (были законсервированы). Мониторинг значений параметров траекторий перемещения СУ проводился один раз в год в течение четырех лет (1999–2003). В каждый контрольный момент с использованием ИДК определяли значения параметров траекторий перемещения СУ и проводили эксперимент, связанный с выполнением операции чистового точения заготовки-образца втулочного типа, установленной в концевой оправке. Обработывали 50 шт. заготовок-образцов из стали 45 в состоянии поставки продольным точением проходным резцом, оснащенным ромбической пластиной из твердого сплава ТЗ0К4 с главным углом в плане  $\varphi = 95^\circ$  (табл. 3).

Диаметр и линейные размеры заготовки-образца выбирали с учетом приближения зоны работы СУ к наиболее характерной для этих станков области диагностирования. Определяли статистические характеристики параметров траектории СУ и диаметрального размера обработанных поверхностей заготовок (рис. 7). Изменение запаса надежности по точности для исследуемых станков приведено на рис. 8.

Условия чистовой обработки заготовок-образцов

Рабочий ход	Настроечный размер	Режим резания			
		$t$ , мм	$S$ , мм/об	$v$ , м/мин	$n$ , об/мин
1	$\varnothing 120,4_{-0,1}$	0,5	0,12	151,2	400
2	$\varnothing 120_{-0,054}$	0,2	0,12	150,7	400

Анализ полученных зависимостей показал, что станки токарной группы класса Н даже в начальные периоды эксплуатации имеют сравнительно невысокие (не более 3) запасы технологической надежности. За 4 года эксплуатации запас технологической надежности снизился

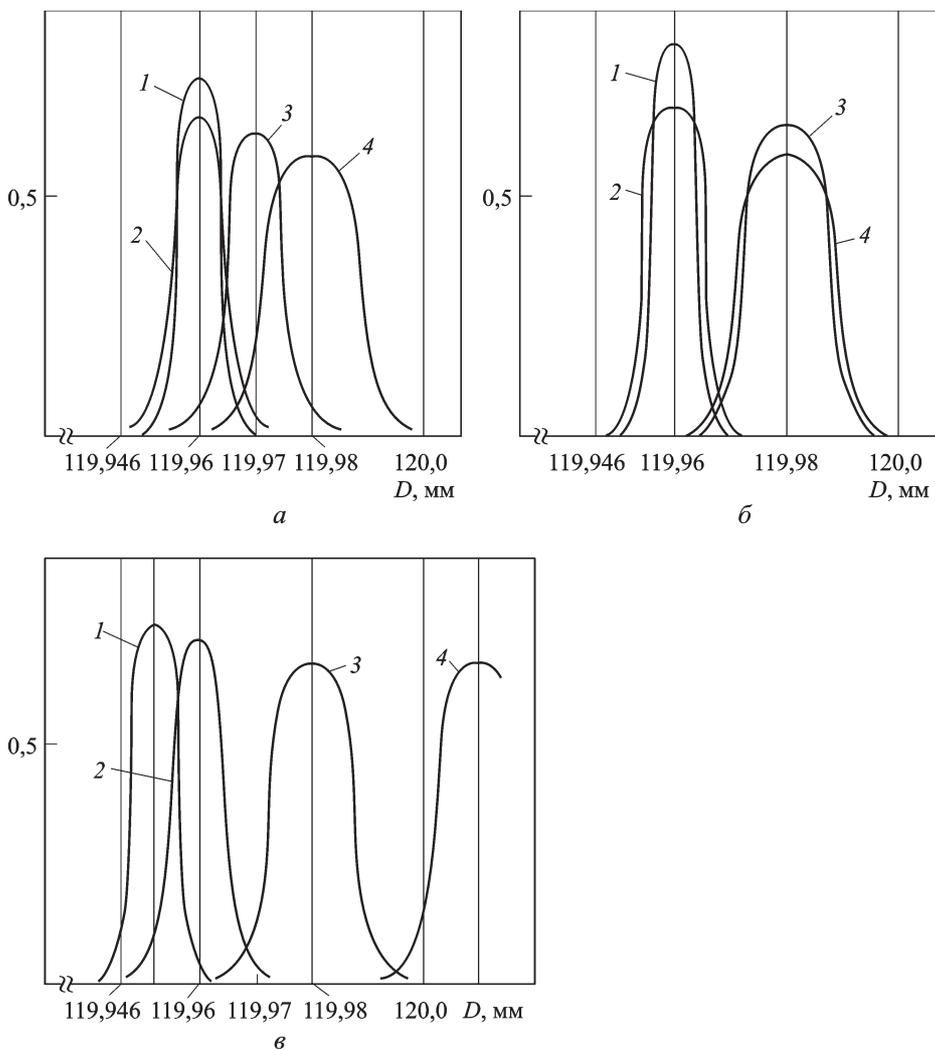
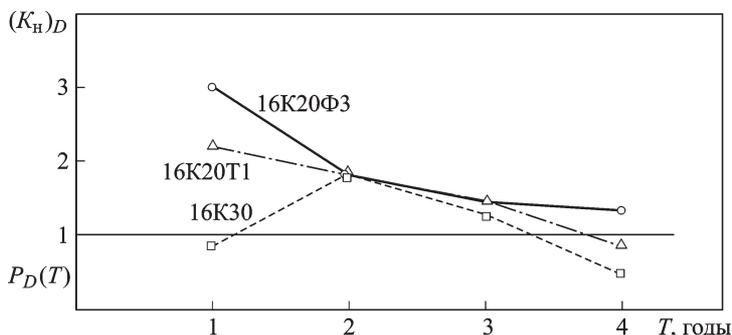


Рис. 7. Распределения значений диаметров обработанной поверхности заготовки-образца для станков 16K20Ф3 (а), 16K20Т1 (б), 16K30 (в) (1, 2, 3, 4 — контрольные моменты (годы))



**Рис. 8.** Изменение запаса надежности по точности  $(K_n)_D$  и (или) вероятности безотказной работы  $P_D(T)$  исследуемых станков

в 2,2–2,3 раза, что делает, в частности, получение точности размеров обработанных поверхностей в пределах IT7 проблематичным. По мере эксплуатации станка наблюдается перманентное смещение значения математического ожидания выдерживаемого размера в сторону его верхнего предельного значения, а также увеличение рассеяния размера. Изменение указанных характеристик происходит по зависимостям, близким к линейным. Запас технологической надежности с увеличением времени эксплуатации убывает по зависимости, близкой к линейной. Изменение статистических характеристик параметров траекторий СУ практически линейно зависит от времени эксплуатации станка. Интенсивность изменения рассеяния размеров превышает интенсивность изменения его математического ожидания. Это свидетельствует о возрастании роли случайных (стохастических) составляющих при формировании выдерживаемого размера. Предложена следующая модель относительных изменений характеристик параметров траекторий перемещения СУ:

$$\alpha_* = 1 + \beta_*(\tau - 1), \quad (12)$$

где  $\alpha_*$  — относительное изменение характеристики параметра по сравнению со значениями к концу первого года эксплуатации ( $\alpha_n$  — математическое ожидание;  $\alpha_\sigma$  — среднеквадратическое отклонение);  $\beta_*$  — угловой коэффициент аппроксимирующей МНК-прямой;  $\tau$  — срок эксплуатации станка (годы).

Для рассматриваемых параметров определим линейные МНК-модели, прогнозирующие их характеристики с погрешностью не более 10...15%. Для прогнозирования значения запаса технологической надежности в зависимости от относительного изменения характеристик параметров траекторий СУ и времени предложим выражения

$$(k_n)_D^\tau = \frac{(k_n)_D^n}{1 + \beta_\sigma(\tau - a)}; \quad (13)$$

$$(k_n)_D^\tau = \frac{(k_n)_D^n}{1 + \beta_\sigma \frac{(\alpha_n - 1)}{\beta_n}}, \quad (14)$$

где  $(k_n)_D^n, (k_n)_D^\tau$  — исходный запас технологической надежности, определяемый через  $a$  лет после начала эксплуатации;  $\tau$  — текущее время эксплуатации;  $\beta_n, \beta_\sigma$  — коэффициенты аппроксимирующих МНК-прямых в эмпирических зависимостях относительного изменения математических ожиданий и среднеквадратических отклонений параметров траекторий СУ;  $\alpha_n$  — значение относительного изменения математического ожидания параметра по сравнению с  $a$ -м годом эксплуатации.

Для оценки и прогнозирования работоспособности станков по разработанной методике, инвариантной типу станка, определены предельные значения параметров траекторий СУ.

Диагностирование токарных станков, прогнозирование их технологической надежности и предельных сроков эксплуатации предложено выполнять с помощью разработанной интерактивной автоматизированной системы диагностирования по параметрам траекторий перемещения СУ.

Система позволяет: определять параметры траекторий перемещения СУ, взаимодействуя с ИДК; выполнять статистическую обработку параметров траекторий; оценивать запасы надежности по каждому параметру и станку в целом; определять относительные изменения запасов надежности по каждому параметру; выделять параметры, определяющие работоспособность станка; прогнозировать работоспособность станка с определением срока предельной эксплуатации при сохранении технологической надежности.

Тестирование системы показало, что при прогнозировании сроков предельной эксплуатации станка до исчерпания запаса технологической надежности и их оценке по сравнению с эмпирическими данными относительная погрешность составила не более  $\pm 15\%$ .

**Выводы.** 1. Параметры траекторий перемещения СУ токарного станка, множество которых определено в ходе исследования, обладают диагностической информативностью, применимой как для оценки, так и для прогнозирования состояния станка. Каждому состоянию станка и уровню его технологической надежности отвечает определенное значение каждого из множества параметров траекторий перемещения СУ.

2. Оценивать состояние диагностируемого станка целесообразно как на основе единичных реализаций траектории СУ как случайной функции, заданной с управляемой координаты, так и на базе параметров мигрирующих реализаций при закономерно изменяющихся условиях, что возможно при применении программного метода испытаний станков.

3. Диагностирование токарных станков по параметрам траекторий перемещения СУ можно выполнять с помощью разработанного и аттестованного мехатронного испытательно-диагностического комплекса. Параметры траекторий надежно определяются в автоматизированном

реальном режиме на базе разработанного методического, информационного и программного обеспечения комплекса.

4. Станки токарной группы класса Н даже в начальные периоды эксплуатации имеют сравнительно невысокие (не более 3) запасы технологической надежности. За 4 года эксплуатации запас надежности снизился в 2,2–2,3 раза, что делает, в частности, получение размеров обработанных поверхностей в пределах 7-го качества точности проблематичным и требует постоянного мониторинга состояния станков.

5. Диагностирование токарных станков и прогнозирование их технологической надежности, а также предельных сроков эксплуатации с относительной погрешностью не более  $\pm 15\%$  может выполняться с помощью интерактивной автоматизированной системы диагностирования (по параметрам траекторий перемещения СУ), разработанной на базе предложенного методического и информационного обеспечения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пронилов А. С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
2. Пронилов А. С., Утенков В. М., Дмитриев Б. М., Ягопольский А. Г. Надежность станков и машин // Труды кафедры МТ-1. Кафедра “Металлорежущие станки” – 70 лет: Сб. статей / Под ред. Г.Н. Васильева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – С. 17–21.
3. Пуш А. В., Юркевич В. В., Мартынов В. В. Автоматизированные нагрузочные силовые устройства для программных испытаний станков // Станки и инструмент. – 1992. – № 7.
4. Васильев Г. Н., Ягопольский А. Г., Трёмасов А. П. Проблемы диагностики и обеспечения надежности металлорежущих станков // СТИН. – 2003. – № 7. – С. 14–17.
5. Вентцель А. Д., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.

Статья поступила в редакцию 2.10.2009

Герман Николаевич Васильев родился в 1941 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1965 г. и МГУ им. М.В. Ломоносова в 1972 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Металлорежущие станки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области станкостроения, автоматизации проектирования и управления технологическим оборудованием.

G.N. Vasiliev (b. 1941) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1965 and the Lomonosov Moscow State University in 1972. D. Sc. (Eng.), professor of “Metal-Cutting Machine-Tools” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of machine-tool manufacture, automation of design and control of manufacturing equipment.

Александр Геннадиевич Ягопольский родился в 1969 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1993 г. Старший преподаватель кафедры “Металлорежущие станки” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 научных работ в области станкостроения, надежности станков и диагностики оборудования.

A.G. Yagopol'skii (b. 1969) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1993. Senior teacher of “Metal-Cutting Machine-Tools” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of machine-tool manufacture, reliability of machine-tools and diagnostics of equipment.