

УДК 621.9.06

Ускоренный метод оценки эксплуатационно-технического потенциала станка по технологической точности

А.А. Серёгин

Оренбургский государственный университет

Accelerated approach to assessing the machine operation and its technical potential

A.A. Seregin

Orenburg State University

Предложен универсальный метод оценки эксплуатационно-технического потенциала станков всех групп и типов. Проведен анализ основных потребительских свойств станка. Показано, что использование всех показателей качества станка может привести к неопределенности оценки его эксплуатационного потенциала. По результатам анализа в качестве основного оценочного параметра выбрана технологическая точность. На основе представления станка как многоконтурной замкнутой системы построена блок-схема активизации факторов, формирующих погрешность обработки. По рассмотренным факторам составлены уравнения для расчета погрешности обработки и вероятности безотказной работы станка по технологической точности. Метод апробирован на колесотокарных станках различного конструктивного исполнения. Проведено сравнение полученных результатов с данными производственной статистики.

EDN: UJSOMU, <https://elibrary/ujsomu>**Ключевые слова:** колесотокарные станки, эксплуатационно-технический потенциал, стабильность эксплуатационно-технических параметров, технологическая точность, эксплуатационная надежность

The paper proposes a universal approach to assessing operation and technical potential of the machine tools in all groups and types. It analyzes the main consumer properties of a machine. The paper shows that using all the machine quality indicators could lead to uncertainty in assessing its operation potential. Analysis results demonstrate that technological accuracy is selected as the main assessment parameter. Based on representing machine as a multi-loop closed system, a block diagram of the factors' activation is created forming the machining error. The factors considered make it possible to compile equations for computing the machining error and probability of the machine failure-free operation according to the technological accuracy. This approach was tested on the wheel-turning lathes of various designs. The obtained results were compared with the production statistics.

EDN: UJSOMU, <https://elibrary/ujsomu>**Keywords:** wheel-turning lathes, operation and technical potential, stability in operation and technical parameters, technological precision, operation reliability

Станок — прецизионная машина, предназначенная для производства продукции, к которой предъявляют требование по точности изготовления. Существует несколько методик оценки эксплуатационно-технического потенциала (ЭТП) станка по основным параметрам [1–5].

В работах [1, 2] использованы несколько подходов к оценке ЭТП, основанные на применении стохастических [1] или весовых коэффициентов [2]. Чтобы объединить известные методики, введен показатель, названный продуктивностью станка [2]. Однако применение трех весовых коэффициентов при вычислении этого показателя может привести к субъективным и даже противоречивым выводам.

Необходимо разработать метод оценки ЭТП, основанный на современных требованиях к оборудованию и включающий в себя выбор аналогов сравнения с учетом наиболее важных параметров станка исходя из его назначения и области применения. Выделение основных потребительских свойств позволит сузить поле деятельности экспертов и, соответственно, повысить объективность оценки ЭТП.

Цель статьи — разработка универсального метода оценки ЭТП, рекомендуемого к применению на стадиях проектирования, приобретения (при создании новых производств) и эксплуатации станка.

Оценка ЭТП на указанных стадиях жизненного цикла станка подразумевает сравнение с аналогами — моделями станков, схожих по конструкции или назначению и области применения. Для современного станочного оборудования выделяют следующие основные показатели ЭТП:

- эксплуатационно-технические параметры: точность, энергопотребление, металлоемкость (в численном выражении они убывают для приоритетной модели станка);

- параметры эксплуатационно-экономической эффективности: производительность и надежность (в численном выражении они возрастают для приоритетной модели); под надежностью понимают [1, 2] безотказность, долговечность (время наработки на отказ), ремонтпригодность и другие показатели, влияющие на эксплуатационные затраты.

Одновременное использование всех перечисленных показателей возвращает к неопределенности заключений и даже противоречивым суждениям при оценке ЭТП. Это объясняется тем, что простое суммирование или другие дей-

ствия интегрального типа, соединяющие уменьшающиеся и увеличивающиеся величины, может привести к тому, что более приоритетная модель станка будет иметь объединенный показатель, меньший по значению, чем у станка с наихудшим техническим уровнем.

Универсальным показателем может выступить параметрическая надежность [6–8]. Тогда необходимо рассчитать надежность технологического процесса, реализуемого на станке по всем размерам [6],

$$P_N = \prod_{d=1}^N [1 - (1 - p_d)(1 - p_{kd})]. \quad (1)$$

Здесь N — число получаемых размеров d на i -й позиции; p_d — вероятность получения размера d в пределах допуска; p_{kd} — надежность контрольной операции по измерению d .

Определяя вероятность p_d методами статистического моделирования для всей гаммы параметров, характеризующих ЭТП нового станка, а надежность p_{kd} — для аттестованного измерительного инструмента, а затем, вычисляя произведение (1), получаем надежность технологического процесса P_N нового станка в пределах 0,6...0,8. Однако производственный опыт эксплуатации новых станков показывает, что $P_N = 0,95...0,98$. Брак продукции, выпущенной на новых станках, редко превышает 2 %.

Чтобы избежать перечисленных недостатков оценки ЭТП, необходимо выделить один параметр, который мог бы отражать важнейшие потребительские свойства. Расчет эксплуатационной надежности по одному параметру позволит ускорить процедуру оценки ЭТП. Наиболее емким параметром, оказывающим влияние на производительность и энергопотребление, является технологическая точность (ТТ) — точность станка в работе или точность обработки образца-изделия по ГОСТ 25 443–82. Увеличение погрешности обработки требует большего числа проходов или доработки детали, что снижает объем выпуска и увеличивает затраты на электроэнергию [1, 9, 10].

Дальнейшее сокращение времени оценки ЭТП можно достичь путем назначения экспертами только одного размера d_T образца-изделия. Основными критериями при выборе d_T являются точность и назначение станка.

Постановка и решение задачи. Технологическую точность легко проверить при приобретении и эксплуатации уже изготовленного станка,

но труднее оценить на стадии проектирования. Для решения этой проблемы рассмотрим блок-схему активизации факторов, формирующих погрешность механической обработки на станке (рис. 1), представленном в виде многоконтурной замкнутой системы [1, 2]. Факторы, влияющие на точность обработки, активируются в ходе рабочих процессов и объединяются в несущей системе станка, внося существенное отличие в расположение ее элементов от номинального.

Следовательно, для достижения поставленной цели необходимо решить задачу о нахождении численного значения указанных отклонений. Из курса технологии машиностроения известно, что все эти факторы имеют вероятностный характер. Погрешность обработки включает в себя систематические и случайные составляющие.

Синим цветом на рис. 1 отмечены погрешности, относящиеся к систематическим со-

ставляющим, красным — к случайным. Факторы, обозначенные символом Э можно устранить при однократной проверке ТТ взятого станка, но их нельзя исключить при длительном использовании станка по назначению

Методы их устранения различаются для станков разного класса точности и заключаются в следующем:

- по контуру 1 — образец-изделие для станков класса Н изготовить на станках класса П, для класса П — на станках классов В и А, для которых соответственно производят образцы на станках класса С (мастер-станках или ультрапрецизионных по зарубежной терминологии); для устранения явления технологического наследования при обработке на станках класса С погрешность геометрических размеров образца-изделия, значения которых больше 0,1 мкм, необходимо уменьшать до 0,1 мкм, используя доводочные операции; однородность

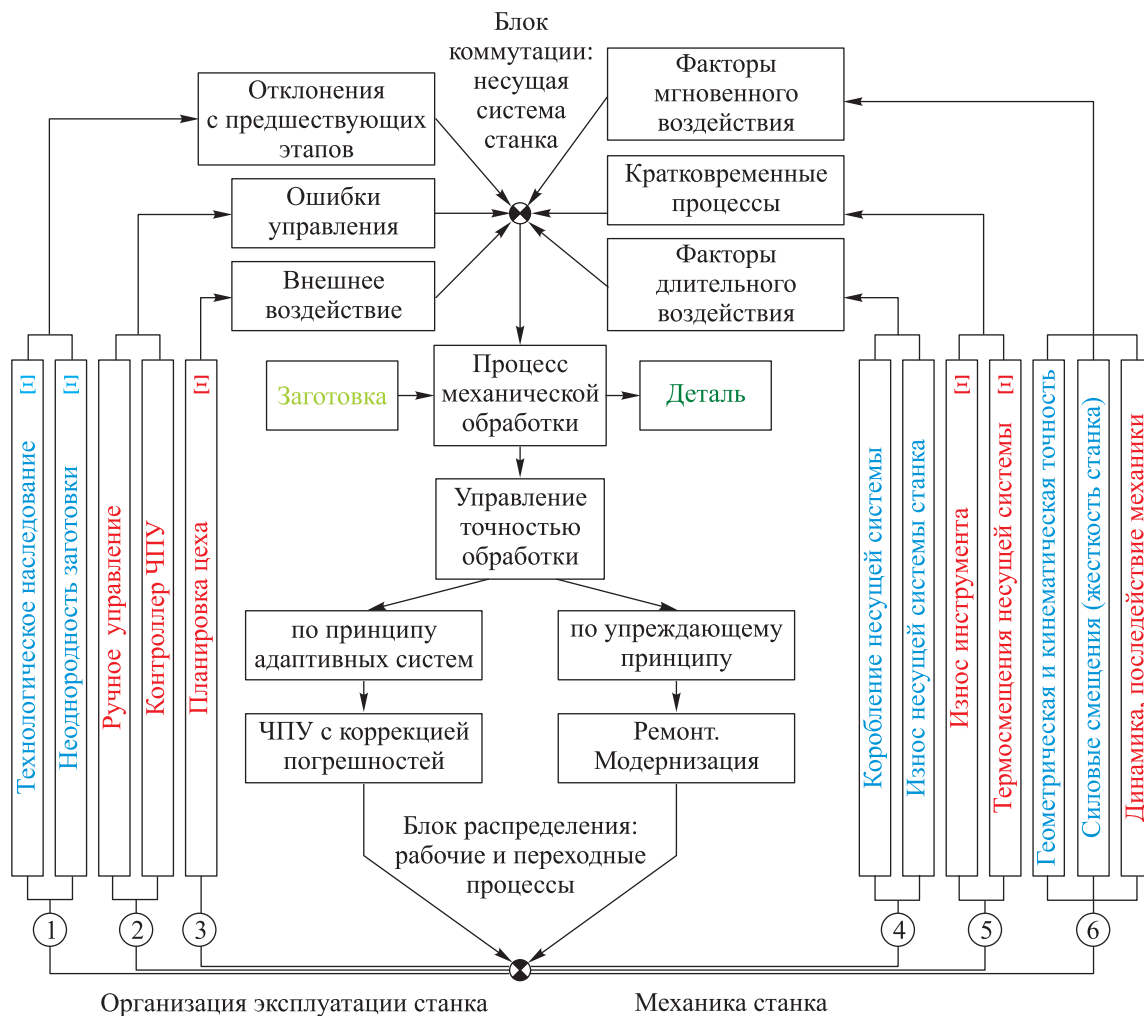


Рис. 1. Блок-схема активизации факторов, формирующих погрешность механической обработки на станке

заготовок проверяют измерением твердости обрабатываемых поверхностей и химическим анализом;

- по контуру 3 — исключить влияние кузнечно-прессового и заготовительного оборудования, если таковое имеется на участке, а также изъять из проверки образцы-изделия, если при их обработке произошел скачок давления в сети сжатого воздуха или отключение электроэнергии; для станков классов П, В, А и С — соблюдать температурный режим на участке;

- по контуру 5 — проводить обработку на прогретом станке за промежуток времени в 10 раз меньше, чем расчетная стойкость инструмента.

Следует отметить, чем точнее оборудование, тем больше компоненты контуров 2, 4 и 6 влияют на окончательный результат обработки. Так, для станков класса С геометрическая точность равна 0,1 мкм, а технологическая — 2...4 мкм, т. е. больше в 20–40 раз. Для станков класса Н при геометрической точности 0,01 мм ТТ составляет 0,05 мм, что соответствует пятикратному превышению.

Отсюда следует, что факторы Э можно исключить при проектной оценке ТТ станка. Тогда решение основной задачи приобретает вид

$$\Delta = \sqrt{\delta Gk^2 + \left(\frac{R_N}{J}\right)^2 + (\alpha\chi\delta U)^2 + LF^2 + \delta D^2 + \delta C^2}, \quad (2)$$

где Δ — ожидаемая погрешность размера d_T ; δGk — суммарные геометрические и кинематические погрешности нового станка; R_N/J — смещение элементов несущей системы при силовом нагружении (R_N — составляющая силы резания, направленная по нормали к обрабатываемой поверхности; J — жесткость); $\alpha\chi$ — коэффициент, учитывающий отклонение закона распределения износа от нормального значения; δU — величина износа и коробления; LF — величина последствия элементов несущей системы при изменении нагрузки; δD — динамическая составляющая погрешности; δC — ошибки управления.

Все перечисленные величины берут в виде проекций на направление размера d_T образца-изделия. Если основным потребительским свойством образца-изделия выступает погрешность формы, то величины δU и R_N/J представляют собой разность максимального и минимального значений износа и податливости узлов соответственно [1].

При оценке ЭТП необходимо проводить разделение некоторых погрешностей, вносимых мгновенными и долгосрочными факторами. Для нового станка используют погрешность δGk , а $\delta U = 0$. Величину δU включают в состав формулы (2) при оценке предельного состояния станка в процессе эксплуатации. Износ со временем начинает доминировать над первичными погрешностями. Так как невозможно точно ответить на вопрос, когда погрешность δU заменит собой δGk , проектную оценку ЭТП целесообразно выполнять на момент среднего или капитального ремонта, считая, что $\delta Gk = 0$.

После расчета погрешности размера Δ оценивают надежность станка по точности на заданном промежутке времени его использования по назначению. Для этого вычисляют стандартную функцию распределения Φ от обратного значения ϑ_{dT} коэффициента вариации LS -функции, характеризующей предельное состояние станка по ТТ Δ при получении размера d_T :

$$P_{TT} = \Phi\left(\frac{1}{\vartheta_{dT}}\right),$$

где P_{TT} — эксплуатационная надежность по ТТ, значение P_{TT} должно увеличиваться для наиболее приоритетных моделей.

LS -функция представляет собой вероятностную величину с математическим ожиданием μ и средним квадратичным отклонением σ . Для универсальных станков LS -функцию выбирают для размера d_T изготавливаемой детали, в направлении которого сумма действующих погрешностей максимальна. Для специализированных, специальных, агрегатных и станков-автоматов размер d_T выбирают исходя из назначения станка. Тогда коэффициент вариации имеет вид

$$\vartheta_{dT} = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\sigma_{TD}^2 + \sigma_{\Delta}^2}}{TD - \Delta},$$

где σ_{TD} — приемочный допуск, определяемый условиями производства; TD — поле допуска размера d_T детали, обрабатываемой на станке в рассматриваемый момент стадии «эксплуатация»; σ_{Δ} — среднее квадратичное отклонение погрешности размера d_T .

Величину $1/\vartheta_{dT}$ можно рассматривать как показатель стабильности выходной точности станка при получении размера d_T . Стабильность эксплуатационно-технических параметров сни-

жается у всех станков. Чем меньше темп снижения, тем перспективнее разрабатываемая модель станка. Например, чем меньше разность между величинами $1/\partial_{dT}$ для нового станка и станка на момент капитального ремонта, тем выше качество выпускаемых изделий в течение ремонтного цикла. Если значение $1/\partial_{dT}$ становится отрицательным, то это означает стопроцентную вероятность выпуска бракованной продукции на рассматриваемый момент времени.

По результатам анализа эксплуатационной надежности $P_{ТТ}$ проводят управление точностью станка по двум основным направлениям (см. рис. 1):

- установкой систем ЧПУ по ГОСТ ISO/TR 16 907–2017;

- модернизацией конструкции станка во время проведения ремонта специализированным предприятием.

Пример. Рассмотрим проекты колесотокарных станков производства Краматорского завода тяжелого станкостроения (КЗТС) и Рязанского станкостроительного завода (Рязанского токарного — РТ). Оценим потенциал станков при условии, что они отработают 40 000 ч оперативного времени (10 лет эксплуатации в две смены). Рассчитаем эксплуатационную надежность $P_{ТТ}$ для двух размеров, получаемых на станках.

За размер d_{T1} принимаем профиль поверхности бандажа. Согласно инструкции № ЦТ-329, допуск на отклонение профиля по кругу катания $TD_k = 0,5$ мм, допуск по гребню $TD_{гр} = 1$ мм. За размер d_{T2} принимаем диаметр круга катания бандажа обрабатываемых пар: 920^{+4}_1 ; 1050^{+2}_1 и 1250^{+1} мм. Минимальный допуск $d_{T2} = 1$ мм.

Область применения рассматриваемых станков — локомотивные и вагоностроительные предприятия. Назначение станков 1836 (КЗТС) и РТ905Ф3 — обработка бандажей вагонных колесных пар, а 1836.М10 (КЗТС) и РТ910Ф3 — бандажей локомотивных колесных пар. Класс точности — Н. Измерительные инструменты — шаблон для контроля профиля поверхности катания И718.00.01, набор щупов и штангенбандажемер И725. Масса заготовок — 900...1500 кг. Используемые режимы обработки: глубина резания — 5...15 мм; подача на оборот — 0,5...2,0 мм/об; скорость резания — 50...150 м/мин; среднее расчетное значение составляющей силы резания $R_N = 1,6 \cdot 10^4$ Н.

Компоновочный код станков, составленный с минимальной степенью уточнения по методике

[11], — $(r_1 w_1 C_1 + r_2 w_2 C_2)_h O(Z_1^3 X_1^3 b_1 + Z_2^3 X_2^3 b_2)$. Код движений формообразования — $C_h \cup X \downarrow Z \uparrow$. Для рассматриваемого случая $\delta Gk = 0$. Необходимо найти отклонения векторов продольной δZ и поперечной δX подач от номинального значения, вызванные износом деталей привода и направляющих.

Расчет проведем без учета вертикальных отклонений δY , так как проекция от них, переносимая на размер d_T , меньше 0,1 мкм. Износ опор шпинделя и пиноли также не учитываем, поскольку он вызывает отклонение δC_h главного движения от идеального вращательного, влияет на биение, но не изменяет профиль и диаметр круга катания бандажа. Средняя скорость изнашивания для большинства групп и типов станков известна [1].

Расчет влияния износа на точность проведем по методикам, указанным в работах [1, 12]. Зависимость линейных размеров от износа направляющих суппортов и шпиндельных бабок колесотокарных станков определим с учетом длины опорной части этих узлов [1]. При расчете погрешности формы образца-изделия будем учитывать только вид кривой износа направляющих суппорта, так как шпиндельные бабки во время обработки неподвижны ($r_1 w_1$ и $r_2 w_2$ — движения вспомогательные).

Силовые нагрузки, действующие между узлами станка, подчиняются $\alpha\chi$ -распределению [1]. Следовательно, закон рассеивания размеров, вызванных износом, отличается от нормального. На основе правил метрологии принимаем $\alpha\chi = 1,12$.

Величину R_N/J при проектировании можно получить, используя программу для расчета несущих систем станков ANSYS Workbench и ее российский аналог АРМ WinMachin (АРМ Mechanic) [13, 14]. В этих программах нельзя учесть зазор между подвижными деталями, но его представление как стыка базовых узлов [14] позволяет частично компенсировать этот недостаток.

Податливость учитываем при расчете Δ_2 для d_{T2} , так как она описывает смещение заготовки от нуля программы станков РТ910Ф3 или отклонение от точки начала копирования станков 1836М.10. В рамках теоретического исследования считаем, что податливость станков и прилагаемая нагрузка симметричны относительно центральной оси. В этом случае податливость не влияет на погрешность Δ_1 формы профиля бандажа: $R_N/J = 0$.

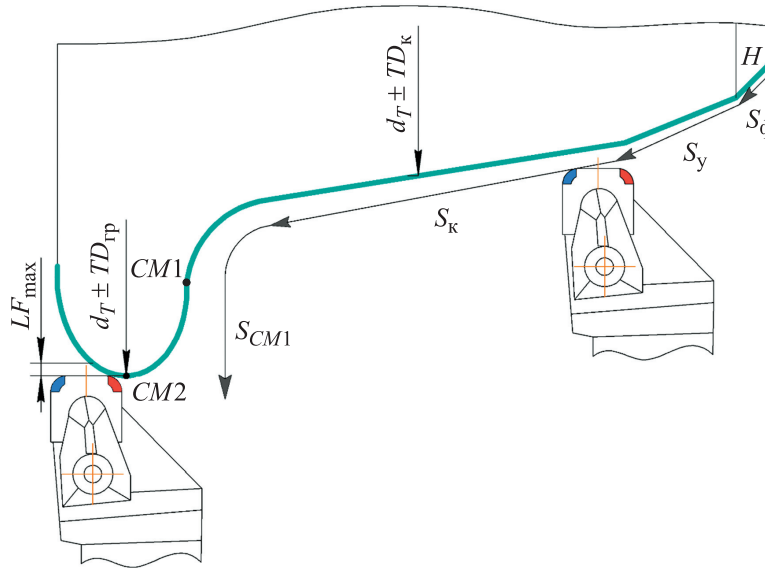


Рис. 2. Расчетная схема влияния последствия механики станка LF на точность обработки бандажа

Расчетная схема влияния последствия механики станка LF на точность обработки бандажа приведена на рис. 2. Последствие механики станка LF (остаточное силовое смещение [15]) проявляется при обработке двухкромочным резцом на гребне профиля (обрабатываемая поверхность показана зеленым цветом). Сначала последствие возникает в точке $CM1$, когда происходит смена направления подачи от S_k до S_{CM1} , затем (максимальное значение LF_{max}) — в точке $CM2$, когда происходит отход инструмента от заготовки для смены режущей кромки: левой (отмеченной синим цветом) на правую (выделенной красным цветом). По поверхности от начала обработки H до $CM1$ величина LF изменяется незначительно: от $0,29LF_{max}$ на участке фаски S_ϕ до $0,01LF_{max}$ на участке уклона S_y . На участке круга катания S_k значение LF не принимаем во внимание.

При расчете динамических погрешностей учитываем, что обработку на станках не проводят на частотах, вызывающих резонанс несущей системы. Тогда основным негативным фактором является динамическая неуравновешенность колесной пары, которая равна 25 кг·см. При этом центробежная сила при частоте вращения 60 мин⁻¹ будет составлять 2,5 Н. Смещением, которое она вызывает, можно пренебречь: $\delta D = 0$.

Численные значения указанных факторов отклонения и погрешность управления рассмотрим далее.

Оценка ЭТП колесотокарных станков 1836 и 1836.M10 производства КЗТС. К конструктивным особенностям таких станков относятся горизонтальная станина из чугуна НВ 250 и два копировальных гидравлических крестовых суппорта.

Хроматическая диаграмма податливости R_z/J узлов станка 1836М.10 после 40 000 ч работы приведена на рис. 3, а. Диаграмма составлена в направлении $X \uparrow$ поперечной подачи по результатам математического моделирования в ука-

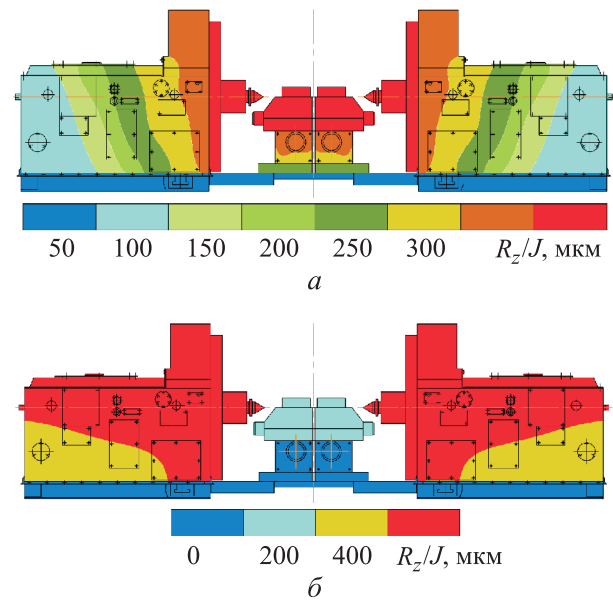


Рис. 3. Хроматические диаграммы податливости R_z/J , мкм, узлов колесотокарного станка 1836М.10 после 40 000 ч работы (а) и проявления последствия (б)

занных программах и согласована с нормами жесткости на тяжелые токарные станки [1]. Погрешности, вносимые податливостью узлов, несущих заготовку и инструмент, суммируются [1].

Величину последействия механики станка рассчитывали по методике, указанной в работе [15]. Расчет выполняли для каждого отдельного узла станка. Результаты приведены на рис. 3, б.

Следует отметить, что программ для расчета последействия не существует, а хроматические диаграммы использованы для визуального сравнения полученных результатов с податливостью узлов.

Величина переноса погрешности на деталь, вызванная износом чугунных направляющих суппорта, $\delta U_1 = 0,075$ мм. Значение износа, изменяющее диаметр круга катания, включает в себя износ боковой поверхности направляющих шпиндельной бабки (0,05 мм) и износ суппорта. Тогда $\delta U_2 = 0,125$ мм. Износ боковой поверхности направляющих у станков 1836 обычно в 10 раз меньше, чем у горизонтальной. Но износ горизонтальных плоскостей исключаем, поскольку он влияет только на вертикальные отклонения δY оси заготовки. Износ деталей гидрокопировальных суппортов не влияет на точность обработки, так как компенсируется при настройке.

К погрешности системы управления копированием относят запаздывание [16] срабаты-

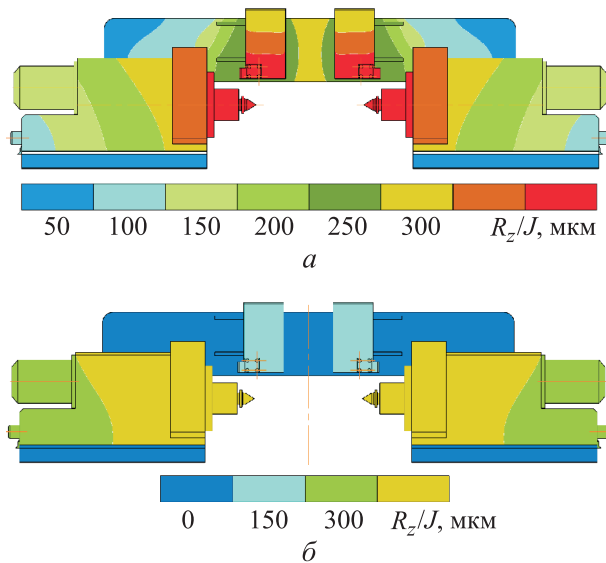


Рис. 4. Хроматические диаграммы податливости R_z/J , мкм, узлов колесотокарного станка РТ910Ф3 после 20 000 ч работы (а) и проявления последействия (б)

вания гидропривода (погрешность по времени), которая вызовет линейную погрешность $\delta C_1 = \delta C_2 = 0,1$ мм.

Оценка ЭТП колесотокарных станков РТ905Ф3 и РТ910Ф3. Конструктивными особенностями этих станков являются наклонная станина портального типа из чугуна со стальными планками, закаленными до твердости 56...61 HRC, и два электромеханических крестовых суппорта.

Податливость элементов несущей системы (рис. 4, а) в направлении поперечной подачи вычисляли так же, как и для станков КЗТС. Последействие узлов определяли как функцию от значений податливости (рис. 4, б). Учитывали, что из-за наклонной компоновки станины эффект последействия у РТ910Ф3 на 18...20 % меньше, чем у 1836М.10. Это связано с тем, что составляющая силы трения, направленная вдоль широкого участка поверхности направляющих, меньше у станков с наклонной компоновкой. Именно эта составляющая определяет смещение исполнительных узлов по направлению получаемого размера.

Величина переноса погрешности на деталь, вызванная износом стальных накладок, $\delta U_1 = 0,038$ мм. Износ, изменяющий диаметр круга катания, включает в себя износ боковой поверхности направляющих шпиндельной бабки 0,15 мм, износ деталей механизмов подачи электромеханических суппортов $\delta X = 0,05$ мм и износ суппорта 0,038 мм, т. е. $\delta U_2 = 0,238$ мм.

В отличие от станка 1836 у станка РТ910Ф3 износ боковой грани направляющих шпиндельных бабок полностью переносится на размер детали. Но он невелик по величине, поскольку при установке заготовки шпиндельные бабки останавливаются в зоне минимального износа. При этом составляющая погрешности детали, зависящая от износа, включает в себя возможное смещение центра, вызванное перекосом оси шпинделя из-за неравномерности износа направляющих бабки. Точность δX настройки станка по оси X определяли после 20 000 ч работы, так как детали механизмов подачи необходимо заменить или отремонтировать при проведении среднего ремонта, т. е. через 17 000...20 000 ч после сдачи станка в эксплуатацию.

К погрешности системы управления ЧПУ относят дрейф нуля [15] детали: $\delta C_1 = \delta C_2 = 0,01$ мм.

Таблица 1

Расчетные данные проектной оценки эксплуатационной надежности при профилировании гребня бандажа колесотокарных станков

Модель станка	Погрешность, мм			Δ_1 , мм	$P_{ТТ1}$
	$\alpha\chi\delta U_1$	LF_{\max}	δC_1		
1836.M10	0,084	0,80	0,10	0,811	0,8106
РТ910Ф3	0,043	0,65	0,01	0,651	0,9599

Таблица 2

Расчетные данные проектной оценки эксплуатационной надежности при обработке диаметра круга катания бандажа

Модель станка	Погрешность, мм			Δ_2 , мм	$P_{ТТ2}$
	R_N/J	$\alpha\chi\delta U_2$	δC_2		
1836.M10	0,8	0,14	0,10	0,818	0,8023
РТ910Ф3	0,7	0,27	0,01	0,750	0,8849

Расчетные данные проектной оценки эксплуатационной надежности при профилировании гребня бандажа станков 1836.M10 и РТ910Ф3 приведены в табл. 1 и 2. Для станков 1836 и РТ905Ф3 получены аналогичные результаты.

У станков производства КЗТС различие между величинами $P_{ТТ1}$ и $P_{ТТ2}$ составляет не более 1,5 %, а у станков РТ910Ф3 — 7,8 %. Это свидетельствует в пользу гипотезы о достаточности использования одного размера образца-изделия при прогнозировании эксплуатационной надежности по ТТ.

Результаты теоретического исследования подтверждены данными о работе станков КЗТС и РТ, эксплуатируемых на предприятиях АО «Желдорремаш» в течение 12 лет. Брак деталей, обработанных на станках РТ, достигает 5...9 %, а на станках КЗТС — 12...15 %.

Наиболее распространенный брак бандажа после обработки на станке РТ — ступенчатая форма его гребня, а на станке КЗТС — наибольшее отклонение от шаблона в месте радиусного сопряжения круга катания и гребня. Такой брак, являющийся проявлением последствия узла при изменении направления по-

дачи, операторы станков устраняют увеличением числа проходов.

Выводы

1. Разработан универсальный метод оценки ЭТП станков, позволяющий сократить время выбора приоритетной модели. Доказана возможность уменьшения трудоемкости расчетов при сохранении достоверности полученных результатов за счет выбора одного размера детали исходя из назначения станка.

2. Получена хорошая сходимости результатов теоретических исследований с данными производственной статистики, что позволяет рекомендовать применение метода в станкостроении.

3. Проведенные исследования позволили сформулировать принцип исключения компонент минимального влияния из поливектора конструктивных параметров. Этот принцип можно применять для ускорения выбора приоритетных моделей станков конструкторами-станкостроителями, технологами и руководителями машиностроительных производств.

Литература

- [1] Решетов Д.Н. ред. *Детали и механизмы металлорежущих станков: в двух томах*. Т. 1. *Общие основы конструирования; направляющие и несущие системы*. Москва, Машиностроение, 1972. 664 с.
- [2] Пуш В.Э. *Конструирование металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 1977. 392 с.
- [3] Никитин А.В., Раменская Е.В., Бургардт Е.В. и др. Технология оценки качества станков. *Вестник СибГАУ*, 2005, № 6, с. 228–233.

- [4] Любимов В.А. Оценка эксплуатационно-экономической эффективности сложного технического объекта. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2022, № 9, с. 90–93.
- [5] Романцов Р.С., Юракова Т.Г. Метод экспертных оценок в повышении конкурентоспособности машиностроительной продукции. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2020, № 2, с. 142–148, doi: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-142-148>
- [6] Проников А.С. *Параметрическая надежность машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 559 с.
- [7] Алябьев В.А., Рахимов Р.С., Рахимов И.Р. Оценка уровня надежности технической системы на этапе проектирования. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2022, т. 22, № 3, с. 42–51.
- [8] Авдеев В.Б. Оценка безотказности токарных станков с ЧПУ по параметрам точности обработки. *Известия МГТУ МАМИ*, 2012, т. 2, № 2, с. 158–164.
- [9] Xie Z., Xie F., Liu X. et al. Tracking error prediction informed motion control of a parallel machine tool for high-performance machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2021, vol. 164, art. 103714, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103714>
- [10] Zulaika J.J., Campa F.J., Lopez de Lacalle L.N. An integrated process-machine approach for designing productive and lightweight milling machines. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2011, vol. 51, no. 7–8, pp. 591–604, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.04.003>
- [11] Врагов Ю.Д. *Анализ компоновок металлорежущих станков. Основы компонентики*. Москва, Машиностроение, 1978. 208 с.
- [12] Vogl G., Jameson N., Archenti A. et al. Root cause analysis of wear induced error motion changes of machine tool linear axes. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2019, vol. 143, pp. 38–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.05.004>
- [13] Щурова Е.И. Расчет деформации станков и обрабатывающих роботов от сил резания в условиях технологической подготовки производства. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2022, т. 22, № 4, с. 30–41.
- [14] Поляков А.Н., Додоров А.И. Методика выбора твердотельных конечно-элементных моделей несущих систем станков при проведении их инженерного анализа. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2019, № 6, с. 102–116, doi: https://doi.org/10.34031/article_5d07863d89d1e9.79636729
- [15] Серегин А.А., Кравцов А.Г. Мониторинг технологических систем при обработке точных поверхностей сложного контура. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2018, т. 18, № 4, с. 48–56, doi: <https://doi.org/10.14529/engin180405>
- [16] Брон Л.С., Тартаковский Ж.Э. *Гидравлический привод агрегатных станков и автоматических линий*. Москва, Машиностроение, 1974. 328 с.

References

- [1] Reshetov D.N. ed. *Detali i mekhanizmy metallovezhushchikh stankov: v dvukh tomakh*. Т. 1. *Obshchie osnovy konstruirovaniya; napravlyayushchie i nesushchie sistemy* [Parts and mechanisms of metal-cutting machine tools: in two volumes. Vol. 1. General bases of designing; guiding and bearing systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972. 664 p. (In Russ.).
- [2] Push V.E. *Konstruirovaniye metallovezhushchikh stankov* [Designing of metal-cutting machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 392 p. (In Russ.).
- [3] Nikitin A.V., Ramenskaya E.V., Burgardt E.V. et al. The machine tools quality estimation technology. *Vestnik SibGAU*, 2005, no. 6, pp. 228–233. (In Russ.).
- [4] Lyubimov V.A. Complex estimation of readiness of difficult technical object. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2022, no. 9, pp. 90–93. (In Russ.).
- [5] Romantsov R.S., Yurakova T.G. Expert assessment method in increasing competitiveness of machine-building products. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V.G. Shukhov], 2020, no. 2, pp. 142–148, doi: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-2-142-148> (in Russ.).
- [6] Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 559 p. (In Russ.).

- [7] Alyabyev V.A., Rakhimov R.S., Rakhimov I.R. Assessment of the level of reliability of the technical system at the design stage. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry], 2022, vol. 22, no. 3, pp. 42–51. (In Russ.).
- [8] Avdeev V.B. Reliability estimation of lathes with CNC by the accuracy of processing. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2012, vol. 2, no. 2, pp. 158–164. (In Russ.).
- [9] Xie Z., Xie F., Liu X. et al. Tracking error prediction informed motion control of a parallel machine tool for high-performance machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2021, vol. 164, art. 103714, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103714>
- [10] Zulaika J.J., Campa F.J., Lopez de Lacalle L.N. An integrated process-machine approach for designing productive and lightweight milling machines. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2011, vol. 51, no. 7–8, pp. 591–604, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.04.003>
- [11] Vragov Yu.D. *Analiz komponentov metallorazhreshchikh stankov. Osnovy komponentiki* [Analysis of machine tool layouts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p. (In Russ.).
- [12] Vogl G., Jameson N., Archenti A. et al. Root cause analysis of wear induced error motion changes of machine tool linear axes. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2019, vol. 143, pp. 38–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.05.004>
- [13] Shchurova E.I. Calculation of machine tools and machining robots deformations caused by cutting force under conditions of manufacturing process design. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry], 2022, vol. 22, no. 4, pp. 30–41. (In Russ.).
- [14] Polyakov A.N., Dodorov A.I. The method of selection the solid finite element models of load-bearing systems of machine tools when performing engineering analysis. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University Named After V.G. Shukhov], 2019, no. 6, pp. 102–116, doi: https://doi.org/10.34031/article_5d07863d89d1e9.79636729 (in Russ.).
- [15] Seregin A.A., Kravtsov A.G. Monitoring of technological systems when cutting complex contoured surfaces. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 48–56, doi: <https://doi.org/10.14529/engin180405> (in Russ.).
- [16] Bron L.S., Tartakovskiy Zh.E. *Gidravlicheskiy privod agregatnykh stankov i avtomaticheskikh liniy* [Hydraulic drive of machine tools and automatic lines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 328 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 19.12.2023

Информация об авторе

СЕРЁГИН Андрей Алексеевич — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы». Оренбургский государственный университет (460018, Оренбург, Российская Федерация, проспект Победы, д. 13, e-mail: aasdom@yandex.ru).

Information about the author

SEREGIN Andrey Alekseevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Metalworking Machines and Complexes. Orenburg State University (460018, Orenburg, Pobedy Avenue, Bldg. 13, e-mail: aasdom@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Серёгин А.А. Ускоренный метод оценки эксплуатационно-технического потенциала станка по технологической точности. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 8, с. 42–51.

Please cite this article in English as:

Seregin A.A. Accelerated approach to assessing the machine operation and its technical potential. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 8, pp. 42–51.