

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АТТЕСТАЦИИ УЗЛОВ СТАНКОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

*Шитов А.М., Кондратьев И.М.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г.Москва*

**Ключевые слова:** аттестация, стабильность, технологический процесс, узлы станка, жесткостные характеристики, шпиндельный узел, математическая модель.

**Аннотация.** Одна из современных тенденций в станкостроении – сборка станков с ЧПУ из готовых узлов. Это обуславливает высокие требования к стабильности рабочих параметров однотипных узлов. При этом технологические процессы предприятий, специализирующихся на их производстве, должны обеспечивать соответствующую стабильность. В статье изложен подход к оценке стабильности технологического процесса производства узлов станков на основе контроля их рабочих характеристик. В качестве критерия оценки стабильности технологического процесса предложено использовать коэффициент стабильности. Для иллюстрации особенностей предлагаемого подхода рассмотрен анализ стабильности технологического процесса сборки шпиндельного узла (ШУ) на основе одного из важных его рабочих параметров – жесткости. Показано, как с помощью измерений этого параметра можно оценить стабильность процесса сборки ШУ, а используя математическую модель ШУ, выявить источники и причины возникающей нестабильности рабочего параметра.

## USING THE RESULTS OF CERTIFICATION OF MACHINE TOOL COMPONENTS FOR DIAGNOSTICS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF THEIR MANUFACTURING

*Shitov A.M., Kondrat'ev I.M.*

*Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of Russian Academy of Sciences,  
Moscow*

**Keywords:** certification, stability, technological process, machine tool components, stiffness factors, spindle unit, mathematical model.

**Abstract.** One of the current trends in machine tool construction is the assembling of CNC machines from ready-made components. This leads to high requirements for the stability of the operating parameters of the machine tool components. At the same time, the technological processes of manufactures specializing in their production must ensure appropriate stability. The article describes an approach to assessing the stability of the technological process of production of machine tool components based on the control of their operating parameters. It is proposed to use the stability coefficient as a criterion for evaluating the stability of the technological process. To illustrate the features of the proposed approach, the stability analysis of the spindle assembling process is considered based on one of its important operating parameters – stiffness. It is shown how the measurements of this parameter can be used to assess the stability of the spindle assembling process, and using the mathematical model of the spindle unit helps to identify the sources and causes of the instability of the operating parameters.

Важное значение в обеспечении высокого качества узлов станков имеет достижение минимального разброса величин (стабильности) показателей рабочих параметров у серии однотипных узлов. В этих условиях особую важность

приобретает стабильность технологических производственных процессов изготовления узлов станков.

На машиностроительном предприятии была проведена аттестационная проверка шпиндельных узлов (ШУ) станков на стадии их изготовления. В качестве главного рабочего параметра выбран коэффициент радиальной жёсткости ШУ (далее – радиальная жесткость). В результате получены экспериментальные данные, которые показали наличие значительных расхождений в значениях этого рабочего параметра у серии однотипных узлов (табл. 1). В таблице 1 каждое значение является средним арифметическим серии измерений конкретного ШУ. Нестабильность рабочих параметров ШУ имеет следствием уменьшение гарантийного моторесурса и возникновение отказов станков при обработке изделий.

Табл. 1. Результаты определения коэффициента радиальной жёсткости  $K_R$  шпиндельных узлов

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$J_{Ri} \cdot 10^7$ , Н/м	3,70	4,83	6,02	3,91	5,84	7,69	4,33	7,06	4,94

Для оценки стабильности технологического процесса предложен критерий  $K_C$ , который определялся по формуле:

$$K_C = K_R^{\max} / K_R^{\min} = 7,69/3,70 = 2,08.$$

Коэффициент  $K_C$  показывает, что изготовленные и проверенные контрольной службой предприятия ШУ имели недопустимо большой разброс значений рабочего параметра (радиальной жёсткости) –  $K_R$ . Причиной такого разброса является наличие отказов в производственном технологическом процессе изготовления ШУ.

В обследуемых узлах шпиндели были установлены на трёх опорах, в которых использовались радиально-упорные подшипники, предварительно нагруженные осевым усилием.

Для серии проверенных узлов на основе экспериментальных данных (табл.1) определено среднее арифметическое значение и доверительный интервал коэффициента радиальной жесткости

$$K_R^E = 5,37 \pm 3,92 \cdot 10^7 \text{ Н/м.}$$

Для определения причин нестабильности рабочих параметров (жёсткости) узлов необходимо выявить и определить внутренние параметры и факторы в конструкции ШУ, влияющие на рабочие параметры.

Одним из возможных методов решения этой непростой задачи является математическое моделирование с применением моделей, содержащих изменяющиеся внутренние параметры ШУ.

В использованной математической модели шарнирные упругие опоры шпинделя обладают линейной (радиальной) и угловой податливостью [1]. В результате моделирования рассчитан коэффициент жёсткости  $K_R^P$ . Расчётное значение для этих узлов, составило  $K_R^P = 6,85 \cdot 10^7$  Н/м. И, таким образом, оно находится в интервале допустимых значений радиальной жёсткости ШУ, т.е. результаты расчета и контрольной проверки подтверждают адекватность принятой модели ШУ.

Как следует из использованной модели ШУ к числу изменяющихся внутренних параметров, влияющих на жёсткость шпинделя, относятся угловая и радиальная жёсткости упругих опор. Эти показатели для рассматриваемого типа ШУ зависят от усилия  $F_H$  осевого натяга подшипников.

В работах [2, 3] приводятся формулы для расчёта радиальной жёсткости опор шпинделя с подшипниками качения.

Формула (1) показывает влияние силы осевого натяга  $F_H$ , на радиальную жёсткость  $J_{R1(2)}$  опор шпинделя [3]:

$$J_{R1(2)} = [K \cdot (i_{1(2)} \cdot C)^{2/3} \cdot F_H^{1/3}] / \text{tg}^2 \alpha, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, характеризующий распределение нагрузки между телами качения;  $F_H$  – усилие осевого натяга;  $\alpha$  – угол контакта тел качения в подшипнике;  $i=1(2)$  – число подшипников в опорах;  $C$  – коэффициент, учитывающий количество шариков и диаметр шариков в подшипниках.

Как следует из формулы (1) при изменении усилия осевого натяга  $F_H$ , радиальная жёсткость опор  $J_{R1(2)}$  тоже будет изменяться. Угловая и осевая жесткости опор таким же образом зависят от усилия осевого натяга [2].

Показатель  $F_H$  является одним из основных параметров, влияющих на стабильность жесткостных характеристик серийных ШУ. Это, в частности, было подтверждено результатами исследования модели ШУ, в котором значения усилия осевого натяга  $F_H$  изменялись от минимально допустимого до максимального значения в 3,5 раза, при этом максимальное значение коэффициента стабильности  $K_C$  достигало недопустимо больших значений ( $K_C=4,5$ ).

Поэтому при диагностировании технологического процесса особое внимание следует обращать на выполнение технологических операций, связанных с обеспечением стабильности усилия осевого натяга подшипников ШУ.

Для определения минимального значения коэффициента  $K_C$ , которое может быть получено для узлов данной конструкции, проведено определение индивидуального коэффициента  $K_{Ci}$  каждого ШУ, как отношение значения жесткости ШУ  $K_{Ri}$  и базового значения  $K_{R6}$ , в качестве которого принято наибольшее значение этого показателя (столбец № 6 таблицы 1).

Табл. 2. Значения индивидуального коэффициента  $K_C$  серии ШУ

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{Ci}$	2,08	1,59	1,28	1,96	1,32	1,00	1,78	1,09	1,56

Результаты сравнение (табл. 2) показали, что на предприятии возможно изготавливать ШУ, у которых разброс значений рабочего параметра не превышает 10% ( $K_{C8} = 1,09$ ).

Обследование технологического процесса на предприятии, где проводилась проверка ШУ, позволило определить отказ в технологическом процессе сборки, который заключался в несовершенстве процесса монтажа подшипниковых опор шпинделя. Кроме этого, установлено несколько факторов, которые являются причиной нестабильности жесткостных параметров ШУ.

Проверка показала, что на предприятии стандовое оборудование, на котором проводится контрольная проверка изготовленных ШУ, не приспособлено для проведения комплексных испытаний (обкатки под нагрузкой) и контроля жесткостных параметров ШУ; отсутствуют современные приборы для измерения усилия осевого натяга подшипников; не проводится входной контроль качества изготовленных деталей и комплектующих изделий. Указанные факторы можно рассматривать как составляющие технологического отказа, поскольку они оказывают существенное влияние на стабильность выходных рабочих параметров ШУ и, в частности, на стабильность радиальной жесткости.

После проведения ряда мероприятий по устранению обнаруженных отказов в технологическом процессе предприятия коэффициент  $K_C$  для новой серии шпиндельных узлов уменьшился до значения  $K_C=1,35$ .

При наличии в современном станкостроении тенденции, которая предполагает сборку станков с ЧПУ из готовых узлов, предложенный метод диагностирования технологических процессов на основе регистрации параметров разной физической природы может быть перспективным для заводов, выпускающих серийные и унифицированные узлы станков.

#### Список литературы

1. Шитов А.М., Кондратьев И.М. Диагностирование узлов металлорежущих станков и прогнозирование остаточного ресурса // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018. № 4. С. 142-149.
2. Левина З.М. Расчёт жёсткости современных шпиндельных подшипников // Станки и инструмент. 1982. № 10. С. 1-3.
3. Кирилин Ю.В., Шестернинов А.В. Расчет и проектирование шпиндельных узлов металлорежущих станков с опорами качения. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 72 с.

#### Сведения об авторах:

*Шитов Аркадий Михайлович* – к.т.н., старший научный сотрудник, ИМАШ РАН, г.Москва;

*Кондратьев Игорь Михайлович* – к.т.н., старший научный сотрудник, ИМАШ РАН, г.Москва.