

УДК 621.192

DOI 10.18698/0536-1044-2016-3-49-55

Мехатронный комплекс диагностических испытаний и прогнозирования надежности токарных станков


А.Г. Ягопольский, Н.Ю. Кропотин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Mechatronic Complex of Diagnostic Tests and Reliability Forecasting of Lathes

A.G. Yagopolskiy, N.J. Kropotin

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

 e-mail: elessar.vtx@gmail.com

i Рассмотрены особенности и принципы разработки мехатронного комплекса диагностических испытаний и прогнозирования надежности. Исследованы взаимосвязи параметров траекторий поступательного перемещения суппортного узла и технологической надежности токарных станков. Показана диагностическая информативность параметров траекторий перемещения суппортного узла. Предложен формальный математический аппарат использования параметров как единичных реализаций траекторий перемещения суппортного узла при диагностировании токарных станков. Рассмотрены автоматизированная система диагностирования станков по параметрам траекторий перемещения суппортного узла, а также типовая методика диагностирования станков. Даны предложения по методике оценки и прогнозирования технологической надежности токарного станка на основе изменений параметров траекторий перемещения суппортного узла. Установлено, что объемы диагностических обследований станков можно сократить за счет использования различий в диагностической информативности параметров траекторий перемещения суппортного узла при различных условиях их нагружения.

Ключевые слова: токарный станок, диагностика, прогнозирование, надежность, суппортный узел, испытание, параметры траекторий перемещений.

i The features and design principles of a mechatronic complex of diagnostic tests and reliability forecasting are considered in this article. The interrelations between the translational displacement parameters of the lathe carriage and the technological reliability of the lathe are studied. The diagnostic information value of the displacement path parameters of the lathe carriage is shown. Formal mathematical apparatus is proposed to use the parameters as single representations of the carriage displacement path for lathe diagnostics. The automated system of lathe diagnostics with regard to displacement path parameters is considered, and the typical methods of lathe diagnostics are reviewed. Methods of evaluating and forecasting the technological reliability of the lathe using variations in the displacement path parameters of the lathe carriage are proposed. It is established that the amount of diagnostic tests can be reduced using the variations in the diagnostic information value of the displacement path parameters at different loading conditions.

Keywords: lathe, diagnostics, forecasting, reliability, support unit, test, path parameters.

Существующие методы диагностирования станков и прогнозирования их технологической надежности имеют недостатки, основными из которых являются: обособленность существующих видов испытаний; недостаточная разработанность тестовых методов диагностирования; отсутствие общепризнанного представления о выходных параметрах станка; отсутствие надежных методик учета стохастического характера явлений и др. Вследствие этого такие методы малоприменимы для решения задач обеспечения качества изделий машиностроения.

В настоящее время практически отсутствуют исследования, в которых в комплексе осуществляется диагностирование и прогнозирование технологической надежности станков по параметрам траекторий перемещения (ПТП) их суппортных узлов (СУ). Приоритетным направлением разработки автоматизированных методов диагностирования и испытаний станков является обеспечение методического и информационного прогнозирования технологической надежности станков по ПТП их формообразующих узлов, к которым относится СУ токарного станка, непосредственно участвующий в процессе формообразования и влияющий на формирование качества обработанной поверхности [1–4]. В суммарной погрешности обработки поверхности доля составляющих, связанных с состоянием СУ, достигает 25 % и более [5, 6].

Цель работы — создание методики, позволяющей мониторинг ПТП СУ, который позволит более достоверно диагностировать текущее состояние станка, определять и прогнозировать его технологическую надежность, вносить обоснованные коррективы в технологические задачи и проводить необходимые ремонтно-профилактические работы. Это позволит обеспечить уровень технологической надежности станка, необходимый для достижения заданного качества изделий.

Траекторию формообразующей точки, совпадающей с вершиной резца, установленного в СУ токарного станка, предложено рассматривать как реализацию случайной функции, аргументом которой является управляемая координата. При любом значении аргумента для случайной функции могут быть определены статистические характеристики: математическое ожидание, дисперсия, корреляционная функция и др.

При нормальном распределении значений отклонений точек траектории по координате X

от заданной ширины зоны, в которую с вероятностью γ будут укладываться возможные значения отклонений, последние можно определить по выражению

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

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

Корреляционная функция от траектории как случайной функции имеет вид

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

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

При указании предельно допустимого значения параметра $[g_j]$ соответствующий запас надежности определяют по формуле

$$(k_n)_j = \frac{[g_j]}{\max\{g_{ji}\}}; \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

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 его нахождения в области допустимых значений и интенсивность изменения запаса надежности. Последовательность этапов диагностирования, их назначение и роль в процессе оценки параметрической надежности станка универсальны и применимы к любому объекту диагностирования. Это позволило разработать типовую методику диагностирования станков по ПТП СУ [7, 8] и концептуальную модель диагностирования, ориентированную на автоматизированную реализацию.

При наличии адекватной математической модели диагностирования станка, ориентированной на использование в автоматизированных системах, причины потери им работоспособности можно определить на основе анализа функций чувствительности модели к изменению значений ее параметров, для чего была предложена формальная методика [9].

Экспериментальные исследования проводились с помощью мехатронного комплекса диагностических испытаний (МКДИ) [10–12], структура которого показана на рис. 1.

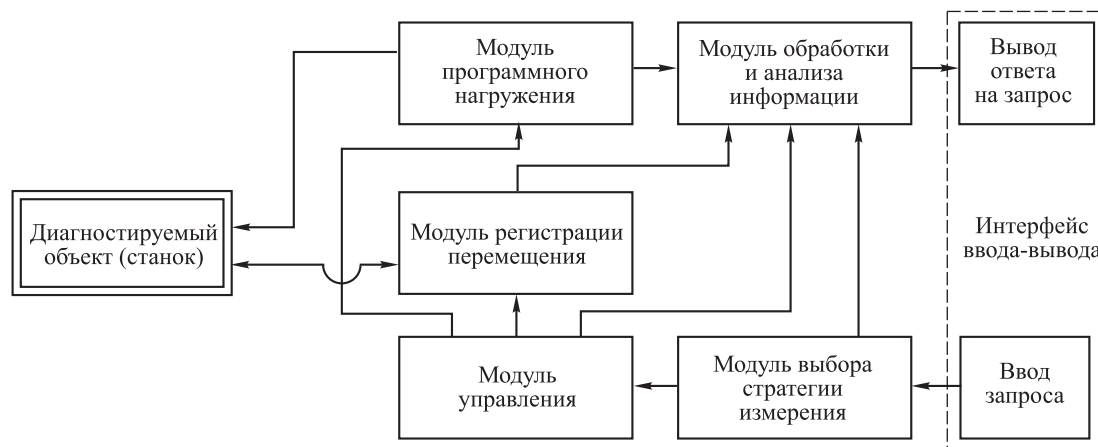


Рис. 1. Структура МКДИ

Исследования диагностической информативности параметров поступательного перемещения СУ выполнялись на токарно-винторезном станке с ЧПУ, работоспособность и технологическую надежность которого в наибольшей мере характеризуют параметры траекторий, соответствующих зоне наиболее интенсивной эксплуатации станка. Эту зону определяли по результатам статистической обработки данных о загрузке станка, на базе которых сформирована область диагностирования токарных станков по ПТП СУ.

Проведенные исследования позволили: установить, что в области диагностирования значения ПТП СУ подчиняются закону нормального распределения независимо от положения группы траекторий, реализованных при фиксированных условиях; определить основные статистические характеристики этих параметров.

На основе анализа значений ПТП СУ оценена доля факторов, определяющих суммарную погрешность обработки: при чистовых режимах доминирует геометрическая точность станка (доля до 35...40 %); при получистовых и черновых режимах преобладают упругие деформации технологической системы; тепловые деформации относительно стабильны во всех режимах (доля до 30...35 %) [13, 14].

Рассмотрим прогнозирование технологической надежности и диагностирование состояния токарных станков по ПТП СУ [15]. У станков токарной группы, состояние которых отвечает требованиям действующих стандартов, отклонение размера обработанной поверхности в среднем на 25 % определяется состоянием СУ. При эксплуатации станка доля погрешностей, обусловленных работой СУ, возрастает. Каж-

дому состоянию станка соответствует определенный уровень значений каждого из множества ПТП СУ.

Область работоспособности станка по ПТП СУ имеет вид

$$R_j = \left| [g_j(t_s)] - g_j \right| = \left| g_j \left\{ [k_{\Delta}(t_s)] - 1 \right\} \right|, \quad (4)$$

где g_j — значение j -го параметра в начале эксплуатации станка; $[g_j(t_s)]$ — предельно допустимое значение параметра j (после времени эксплуатации t_s); $[k_{\Delta}(t_s)]$ — предельно допустимое увеличение доли погрешностей обработки, связанных с состоянием СУ.

Основными характеристиками технологической надежности станка являются величины $(k_n)_j$ и $P_j(\tau)$. Введем следующие показатели:

- запас надежности

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

- вероятность безотказной работы

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

где $(k_n)_{j,\tau_1}$, $(k_n)_{j,\tau_2}$ — запасы надежности по параметру j в моменты времени τ_1 , τ_2 ; $P_j(\tau_1)$, $P_j(\tau_2)$ — вероятности безотказной работы по параметру j в моменты времени τ_1 , τ_2 .

Вероятность безотказной работы станка по совокупности параметров в фиксированный момент времени τ можно оценить по формуле

$$P_c(\tau) = \prod_1^m P_j(\tau), \quad j = 1, \dots, m. \quad (5)$$

Для определения допустимых диапазонов значений каждого из рассматриваемых параметров и выявления их связей с характери-

ками точности обработки на станке проведено экспериментальное исследование. В качестве объектов исследования были выбраны три станка токарной группы, которые до начала эксперимента не эксплуатировались. Мониторинг значений ПТП СУ осуществляли через определенные длительные промежутки времени (контрольные моменты), в каждый из которых с использованием МКДИ определяли значения ПТП СУ. Кроме того, проводили эксперимент, связанный с выполнением операции чистового точения заготовки-образца, диаметр и линейные размеры которого были выбраны с учетом приближения зоны работы СУ к наиболее характерной для этих станков области

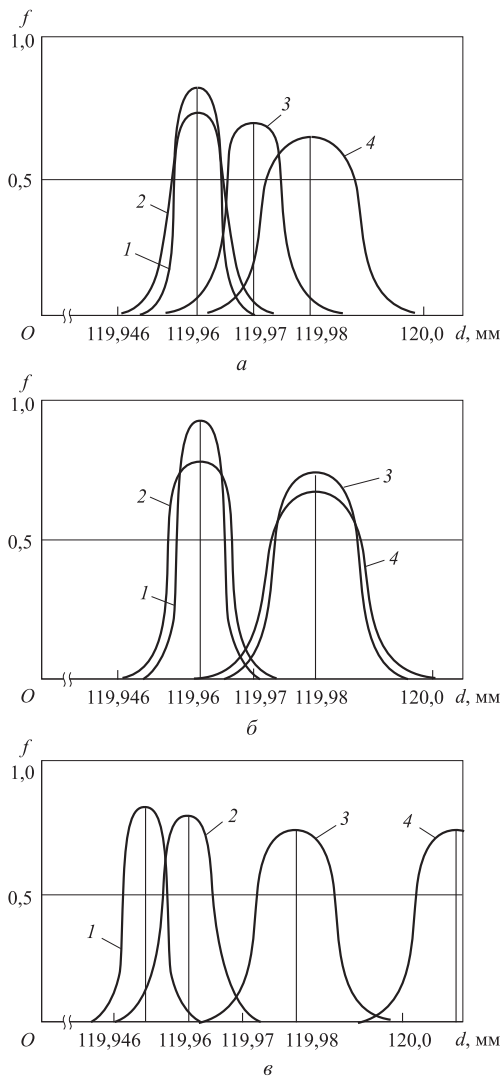


Рис. 2. Распределение диаметров d обработанной поверхности заготовки-образца для первого (а), второго (б) и третьего (в) станков:

1, 2, 3, 4 — контрольные моменты (годы); f — частотность попадания в диапазон (отношение количества деталей, попавших в диапазон, к заданному количеству деталей)

диагностирования. Определяли статистические характеристики ПТП СУ и диаметры обработанных поверхностей заготовок-образцов (рис. 2). Изменение запаса надежности $(k_n)_d$ по точности для исследуемых станков показано на рис. 3.

Анализ полученных зависимостей показал, что станки токарной группы класса Н даже в начальные периоды эксплуатации имеют сравнительно невысокие (не более трех) запасы технологической надежности. За четыре года эксплуатации запас технологической надежности снизился приблизительно в два раза. По мере эксплуатации станка наблюдается перманентное смещение значения математического ожидания выдерживаемого размера в сторону его верхнего предельного значения, а также увеличение рассеивания размера. Изменение указанных характеристик происходит по зависимостям, близким к линейным. Запас технологической надежности с ростом времени эксплуатации убывает по зависимости, близкой к линейной. Изменение статистических характеристик параметров траекторий СУ практически линейно зависит от времени эксплуатации станка.

Диагностирование токарных станков, прогнозирование их технологической надежности и предельных сроков эксплуатации предложено выполнять с помощью разработанной интерактивной автоматизированной системы диагностирования по ПТП СУ. Система позволяет: определять ПТП СУ, взаимодействуя с МКДИ; 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 экс-

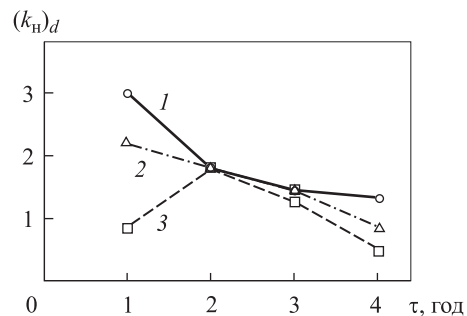


Рис. 3. Изменение запаса надежности по точности $(k_n)_d$ для первого (1), второго (2) и третьего (3) станков

плутации при сохранении технологической надежности.

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

Выводы

1. Диагностирование токарных станков по ПТП СУ, прогнозирование их технологической надежности и предельных сроков эксплуатации можно проводить с помощью интерактивной автоматизированной системы диагностирования, разработанной на базе предложенного методического и информационного обеспечения, и с использованием МКДИ, позволяющего определять эти параметры в автоматизированном режиме реального времени.

2. Каждому состоянию станка и уровню его технологической надежности соответствует определенное значение каждого из множества ПТП СУ, которые обладают диагностической информативностью, применимой для оценки и прогнозирования состояния станка.

3. Изменение статистических характеристик ПТП СУ практически линейно зависит от времени эксплуатации. Интенсивность изменения рассеивания выше, чем интенсивность изменения математических ожиданий параметров, что свидетельствует о возрастании роли случайных составляющих при формировании выдерживаемого размера.

4. Модели относительных изменений ПТП СУ, запасов технологической надежности по станку в целом и по каждому параметру имеют относительную погрешность не более 15 % и могут быть использованы при диагностировании станка и прогнозировании его работоспособности.

Литература

- [1] Проников А.С. *Параметрическая надежность машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
- [2] Abele E., Lieder M., Hölscher R., Hubig Ch. Qualitative Erfassung von Werkzeugverschleiß. *Werkstattstechnik online: wt*, 2012, 102(5), pp. 319–323.
- [3] Rößler M.P., Abele E. Enhancement of the overall equipment effectiveness measure: A contribution for handling uncertainty in shop floor optimization and production planning. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2015, no. 20(2), pp. 141–154.
- [4] Pfeifer T., Schmitt R. *Autonome Produktionszellen Komplexe Produktionsprozesse flexibel automatisieren*. Berlin, Springer Umfang, 2006, pp. 187–209.
- [5] Вереина Л.И., Ягопольский А.Г. *Расчет и конструирование станков*. Москва, Академия, 2014. 272 с.
- [6] Чернянский П.М., ред. *Проектирование автоматизированных станков и комплексов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. Т. 1, 331 с.; т. 2, 202 с.
- [7] Ягопольский А.Г. Методика диагностирования станков по параметрам траекторий поступательного движения суппортных узлов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2003, № 5, с. 49–52.
- [8] Васильев Г.Н., Ягопольский А.Г. Обеспечение технологической надежности токарных станков мониторингом параметров перемещения суппортных узлов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2010, № 2(79), с. 91–105.
- [9] Ягопольский А.Г., Тремасов А.П. Современные методы диагностики и контроля для обеспечения технологической надежности станков. *Состояние и проблемы измерений: тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, с. 86–87.
- [10] Никулин Ю.В., Ягопольский А.Г. Место измерительных преобразователей промышленного типа в диагностической аппаратуре и контроле динамических процессов станка. *Инженерно-физические проблемы новой техники: тез. докл. VI Всерос. совещания-семинара*, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001, с. 168–169.
- [11] Ягопольский А.Г., Ткаченко Я.В. Использование автоматизированных испытаний для повышения технологического уровня станков. *Состояние и проблемы измерений: тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, с. 82–83.

- [12] Ягопольский А.Г., Зыков А.В. Автоматизация системы обработки данных (COD) датчиков станка для диагностики напряжения формообразующих узлов. *Состояние и проблемы измерений: тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, с. 84–85.
- [13] Ягопольский А.Г., Крикунов Д.Э. Анализ коррекции тепловых деформаций в станках. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 5(98), с. 98–105.
- [14] Chen C., Zhang J.F., Wu Z.J., Feng P.F. Real-time measurement of machine tool temperature fields and their effect on machining errors. *Mechanika*, 2011, vol. 17(4), pp. 413–417.
- [15] Васильев Г.Н., Ягопольский А.Г., Трemasов А.П. Проблемы диагностики и обеспечение надежности металлорежущих станков. *СТИН*, 2003, № 7, с. 14–17.

References

- [1] Pronikov A.S. *Parametricheskaia nadezhnost' mashin* [Parametric reliability of the machines]. Moscow, Bauman Press, 2002. 560 p.
- [2] Abele E., Lieder M., Hölscher R., Hubig Ch. Qualitative Erfassung von Werkzeugverschleiß. *Werkstattstechnik online: wt*, 2012, no. 102(5), pp. 319–323.
- [3] Rößler M.P., Abele E. Enhancement of the overall equipment effectiveness measure: A contribution for handling uncertainty in shop floor optimization and production planning. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 2015, no. 20(2), pp. 141–154.
- [4] Pfeifer T., Schmitt R. *Autonome Produktionszellen Komplexe Produktionsprozesse flexibel automatisieren*. Berlin, Springer Umfang, 2006, pp. 187–209.
- [5] Vereina L.I., Iagopol'skii A.G. *Raschet i konstruirovaniie stankov: uchebnik dlia studentcheskikh uchrezhdenii vysshego obrazovaniia* [Calculation and design of machines: the textbook for students' higher education institutions]. Moscow, Akademiia publ., 2014. 272 p.
- [6] *Proektirovaniie avtomatizirovannykh stankov i kompleksov* [Design of automated machines and systems]. Ed. Chernianskii P.M. Moscow, Bauman Press, 2012, vol. 1. 331 p. Vol. 2. 202 p.
- [7] Iagopol'skii A.G. Metodika diagnostirovaniia stankov po parametram traektorii postupatel'nogo dvizheniia supportnykh uzlov [Methods of diagnosis tools for trajectory parameters of the translational motion support nodes]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 2003, no. 5, pp. 49–52.
- [8] Vasil'ev G.N., Iagopol'skii A.G. Obespecheniie tekhnologicheskoi nadezhnosti tokarnykh stankov monitoringom parametrov peremeshcheniia supportnykh uzlov [Provision of Technological Reliability of Turning Lathes by Monitoring of Parameters of Trajectories of Support-Group Movements]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering]. 2010, no. 2(79), pp. 91–105.
- [9] Iagopol'skii A.G., Tremasov A.P. Sovremennyye metody diagnostiki i kontroliia dlia obespecheniia tekhnologicheskoi nadezhnosti stankov [Modern methods of diagnosis and control to ensure the reliability of the technological tools]. *Sostoianie i problemy izmerenii: tezisy dokladov 8-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [State and problems of measurement: abstracts of the 8th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Moscow, Bauman Press, 2002, pp. 86–87.
- [10] Nikulin Iu.V., Iagopol'skii A.G. Mesto izmeritel'nykh preobrazovatelei promyshlennogo tipa v diagnosticheskoi apparature i kontrole dinamicheskikh protsessov stanka [Place transducers industrial type in diagnostic equipment and control of dynamic processes of the machine]. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoi tekhniki: tezisy dokladov 6-go Vserossiiskogo soveshchaniia-seminara* [Engineering and physical challenges of new technology: abstracts of the 6th All-Russian meeting of the seminar]. Moscow, Bauman Press, 2001, pp. 168–169.
- [11] Iagopol'skii A.G., Tkachenko Ia.V. Ispol'zovaniie avtomatizirovannykh ispytaniia dlia povysheniia tekhnologicheskogo urovniia stankov [Use of automated testing to improve the technological level of the machines]. *Sostoianie i problemy izmerenii: tezisy dokladov 8-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [State and problems of measurement: ab-

- stracts of the 8th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Moscow, Bauman Press, 2002, pp. 82–83.
- [12] Iagopol'skii A.G., Zykov A.V. Avtomatizatsiia sistemy obrabotki dannykh (COD) datchikov stanka dlia diagnostiki napriazheniia formoobrazuiushchikh uzlov [Automation of the data processing system (COD) of the machine sensors for diagnosing the forming voltage node]. *Sostoianie i problemy izmerenii: tezisy dokladov 8-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [State and problems of measurement: abstracts of the 8th All-Russian Scientific and Technical Conference]. Moscow, Bauman Press, 2002, pp. 84–85.
- [13] Iagopol'skii A.G., Krikunov D.E. Analiz korrektsii teplovykh deformatsii v stankakh [Analysis of Correction of Thermal Deformation in Machine Tools]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering]. 2014, no. 5(98), pp. 98–105.
- [14] Chen C., Zhang J.F., Wu Z.J., Feng P.F. Real-time measurement of machine tool temperature fields and their effect on machining errors. *Mechanika*, 2011, vol. 17(4), pp. 413–417.
- [15] Vasil'ev G.N., Iagopol'skii A.G., Tremasov A.P. Problemy diagnostiki i obespechenie nadezhnosti metallovezhushchikh stankov [Problems of diagnosis and ensuring the reliability of machine tools]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2003, no. 7, pp. 14–17.

Статья поступила в редакцию 02.12.2015

Информация об авторах

ЯГОПОЛЬСКИЙ Александр Геннадиевич (Москва) — старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

КРОПОТИН Николай Юрьевич (Москва) — инженер кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: elessar.vtx@gmail.com).

Information about the authors

YAGOPOLSKIY Aleksandr Gennadievich (Moscow) — Senior Lecturer, Department of Metal-Cutting Machines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

KROPOTIN Nikolai Yurievich (Moscow) — Engineer, Department of Metal Cutting Machine Tools. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: elessar.vtx@gmail.com).