

УДК 621.09

DOI 10.18698/0536-1044-2017-1-71-78

# Сравнительный анализ и обобщение способов коррекции температурных деформаций в металлорежущих станках

А.Г. Ягопольский<sup>1</sup>, Д.А. Винников<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> АО «Электросетьстройпроект», 127566, Москва, Российская Федерация, Высоковольтный проезд, д. 1, стр. 36

## The Comparative Analysis and Synthesis of Methods for Correction of Thermal Deformations in Machine Tools

A.G. Yagopolskiy<sup>1</sup>, D.A. Vinnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

<sup>2</sup> AO Elektrossetstroyproekt, 127566, Moscow, Russian Federations, vysokovoltnyi proezd, Bldg. 1, Block 36



e-mail: vinnikov@essp.ru



Проведены обзор и анализ способов коррекции температурных деформаций, возникающих в процессе эксплуатации металлорежущих станков и приводящих к изменению относительного положения инструмента и заготовки, что снижает точность обработки и надежность оборудования. Описаны некоторые широко применяемые в станкостроении способы коррекции температурных деформаций и принципы их использования, выполнен их сравнительный анализ. Показано, что все существующие способы коррекции температурных деформаций имеют свои достоинства и недостатки, различные достоверность результатов и ограничения по принципам использования, а выбор способа зависит от стоимости, надежности, требований по точности обработки и ряда других факторов. Как следствие, каждый из описанных способов коррекции температурных деформаций имеет свою область применения, в которой он может быть использован с максимальной эффективностью.

**Ключевые слова:** металлорежущий станок, рабочий орган, способ коррекции, температурные деформации, исполнительный механизм, погрешность обработки, сравнительный анализ.



This article provides an overview and analysis of the methods for correcting thermal deformations arising in the process of machine tool operation. These deformations lead to a change in the relative position of the tool and workpiece and reduce the machining accuracy and the reliability of the machine tool. The authors describe some of the methods for correcting thermal deformations that are widely used in machine building, explain their application principles and perform their comparative analysis. It is shown that all the existing methods of correcting thermal deformations have advantages and disadvantages, different reliability of the results and limitations with regards to the application principles. The choice of the method depends on the cost, reliability, machining accuracy requirements and other factors. As a result, each of the described methods for correcting thermal deformations has its own area of application where it can be used with maximum efficiency.

**Keywords:** machine tool, working unit, correction method, thermal deformation, actuating mechanism, machining inaccuracy, comparative analysis.

В суммарном балансе погрешностей обработки заготовок на металлорежущих станках значительную долю занимают погрешности, вызванные температурными деформациями (ТД) узлов и механизмов станка. Эти погрешности приводят к изменению относительного положения инструмента и заготовки и оказывают существенное влияние на баланс формирования погрешностей обработки, что снижает точность и надежность станка в целом. ТД, характеризуемые как процессы средней скорости, сравнительно медленно и нарастают, и медленно исчезают. Поэтому при создании систем контроля способов коррекции ТД необходимо учитывать не только их значения, но и скорость образования.

Цель работы — анализ и обобщение наиболее распространенных способов коррекции ТД с выявлением их достоинств и недостатков, особенностей применения и ограничений по их использованию в современных условиях.

Коррекция ТД — сложная научно-техническая задача, требующая наличия специальных измерительных систем, устанавливаемых часто в рабочей зоне станка и измеряющих значения температурных смещений рабочих органов, исполнительных механизмов и пр. Термин «коррекция» (от латинского *correctio* — исправление, проверка) означает исправление ошибок или недостатков машин и механизмов, результатов их работы, траекторий движений и т. д. Сущность механизма коррекции погрешностей, вызванных ТД, заключается в сокращении и стабилизации пространственных относительных смещений и поворотов систем координат, жестко связанных с деталями станка, которые входят в размерные цепи, определяющие относительное положение рабочих органов станка, несущих заготовку или режущий инструмент [1–8].

Выбор способа коррекции погрешностей, вызванных ТД, зависит от стоимости, надежности, требований по точности обработки и других факторов. Рассмотрим некоторые наиболее распространенные способы коррекции.

**I. Способ коррекции ТД, основанный на нагреве инварового стержня.** На рис. 1 показана схема устройства, примененная для компенсации смещения вертикального шпинделя по координате  $Y$  вследствие ТД [9, 10].

Примерно на уровне оси шпинделя в стенке 5 шпиндельной бабки закреплен инваровый стержень 4, который упирается в рычаг 1, расположенный в крайней левой части шпиндельной бабки и прижимаемый к стержню 4 пружиной через струну 3, накрученную на вал измерительного преобразователя 2. При работе станка и смещении передней части шпиндельной бабки со шпинделем вправо вследствие нагрева (смещение измерялось индикатором А, установленным на столе) инваровый стержень, имеющий очень малый температурный коэффициент линейного расширения, смещается также вправо, рычаг 1 отклоняется и измерительный преобразователь выдает в систему управления сигнал для коррекции значения перемещения салазок станка по координате  $Y$  (перемещение салазок измерялось индикатором Б, установленным на станине).

## II. Способ коррекции ТД на основе их косвенной оценки путем измерения температуры нагрева в характерных (заранее определенных) точках на станке.

На рис. 2 показана схема коррекции смещения ТД для многоцелевого станка с вертикальным расположением шпинделя. В заранее определенных точках станка установлены измерительные преобразователи, сигналы от которых со значениями температуры нагрева в характерных точках на шпиндельной бабке (точка А) и на колонне (точка В) поступают в устройство коррекции. Туда же передается информация от устройства ЧПУ (УЧПУ), где по ней вычисляется смещение оси шпинделя. Сиг-

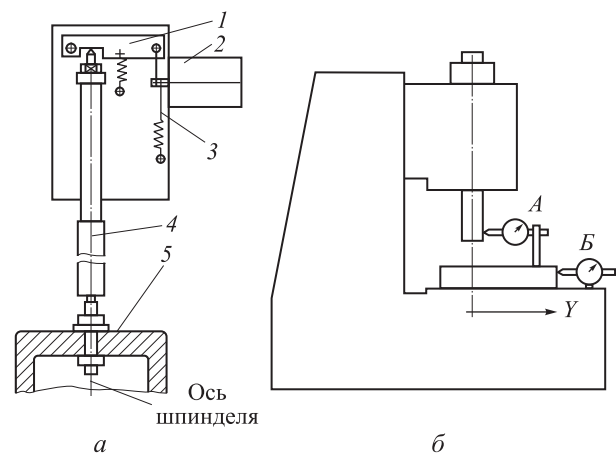


Рис. 1. Схемы:  
а — устройства коррекции смещения шпинделя по координате  $Y$  вследствие ТД на основе нагрева инварового стержня; б — установки датчиков

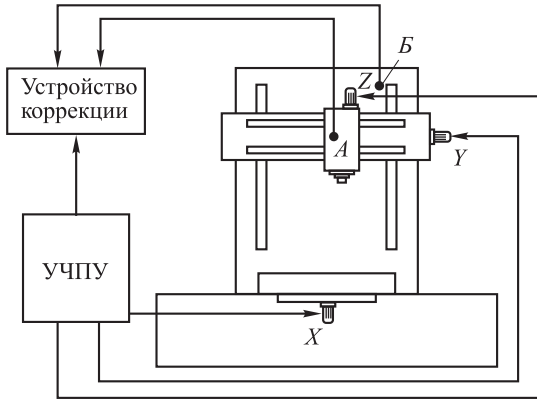


Рис. 2. Схема коррекции ТД на основе косвенной оценки путем измерения температуры в заранее определенных точках станка

налы управления поступают от УЧПУ на приводы подач по координатам X, Y, Z [11, 12].

**III. Способ коррекции ТД токарного многоцелевого станка с помощью пневматического устройства.** Схема пневматического устройства типа «Сопло-заслонка» для коррекции ТД приведена на рис. 3.

Устройство имеет преобразователь типа «сопло-заслонка», предназначенный для преобразования ТД, которая соответствует определенной температуре нагрева и давлению воздуха. Давление воздуха управляет исполнительным механизмом, корректирующим положение рабочего органа станка по какой-либо координате в зависимости от температуры нагрева в определенной зоне станка. Коррекция смещения равна по значению и противоположна по знаку корректируемой ТД  $\Delta z$  [11].

В зависимости от температуры нагрева специальный стержень 5 имеет различную деформацию, которая вызывает изменение ширины щели  $h$  между соплом 3 и заслонкой 2. В результате изменяется давление  $p_2$ . Деформация спе-

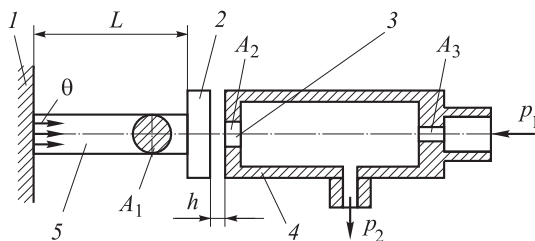


Рис. 3. Пневматическое устройство типа «сопло-заслонка» для коррекции ТД:  
1 — корпус рабочего органа станка; 2 — заслонка; 3 — сопло; 4 — пневмоцилиндр; 5 — специальный стержень;  $p_1$  и  $p_2$  — давление на входе и выходе;  $\theta$  — температурный поток

циального стержня определяется его длиной  $L$ , сечением  $A_1$  и теплофизическими характеристиками материала, из которого он изготовлен, а влияние сопла — подводимым давлением  $p_1$  и размерами поперечных сечений отверстий  $A_2$  и  $A_3$ .

**IV. Способ измерения коррекции наклона колонны многоцелевого станка из-за ТД с использованием электрических уровней.** Устройство, предназначенное для реализации такого способа коррекции, приведено на рис. 4.

Относительное значение наклона колонны 2 в плоскости XOY по отношению к столу 3 измеряется двумя электрическими уровнями 1 и 4, закрепленными на колонне и станине. Полученная информация преобразуется аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и направляется в УЧПУ, который выдает через управляющую программу коррекцию процесса обработки заготовок [2, 12].

**V. Способ коррекции ТД с использованием упруго-силовых приводов микроперемещений.** В тех случаях, когда необходимо проводить смещение рабочих органов в процессе коррекции ТД на значение меньше, чем имеющаяся дискретность приводов подач (как правило, менее 1 мкм), дополнительно можно применять микроприводы для выполнения микроперемещений на очень ограниченном рабочем диапазоне подач. Эти механизмы, обладая высокой жесткостью, обеспечивают получение малых импульсов перемещения, измеряемого десятками долями микрометра при малом поле рассеяния. Для указанных микроперемещений применяют механизмы, в кото-

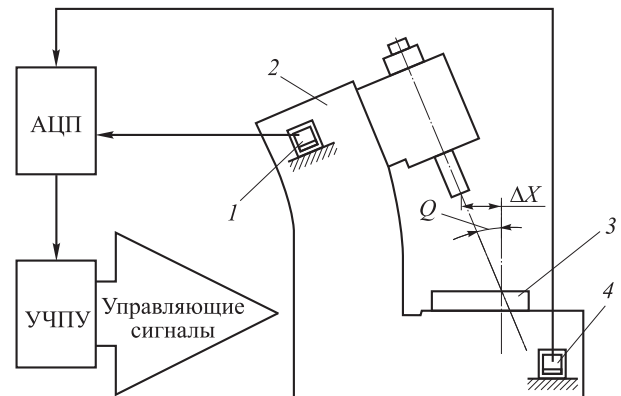


Рис. 4. Схема использования электрических уровней при коррекции ТД колонны многоцелевого станка: Q — угол наклона;  $\Delta X$  — смещение вследствие ТД

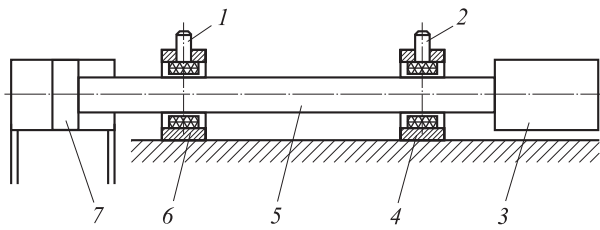


Рис. 5. Упруго-силовой привод микроперемещений

рых использованы различные физические и механические свойства тел (упруго-силовые, магнестрикционные, температурные и гидравлические) [12, 13].

В упруго-силовом приводе для перемещения рабочего органа станка используют деформацию упругих элементов (например, плоских пружин, упругих стержней и шарниров) при силовом воздействии на них. Упругое звено обычно имеет постоянную жесткость и линейную характеристику. Соответствующим подбором геометрических параметров упругого звена можно обеспечить его высокую податливость лишь в одном требуемом направлении при достаточно большой жесткости в других направлениях.

На рис. 5. показана схема упруго-силового привода, в котором используется потенциальная энергия, предварительно деформированного стержня. В начале цикла происходит сжатие стержня 5 гидроцилиндром с поршнем 7 при включенном правом зажиме 2 в опоре 4. Затем включается левый зажим 1 в опоре 6. При открытии правого зажима происходит перемещение рабочего органа 3 на величину деформации стержня 5 при его сжатии между опорами 4 и 6.

#### VI. Способ коррекции ТД с применением магнестрикционного привода.

В таком приводе используют свойство детали типа стержня из ферромагнитного материала, способного изменять свою длину в направлении оси возбужденного в нем магнитного поля. Для изготовления магнестрикторов чаще всего выбирают сплавы железо-кобальт и ферриты, которые обеспечивают в реальных конструкциях общее перемещение в пределах 8...10 мкм на 100 мм длины стержня [14, 15].

На рис. 6. показан пример использования магнестрикционного привода 2 для точного перемещения стола 3 многоцелевого станка в продольном направлении. На этой схеме маг-

нестрикционный привод обеспечивает микроперемещение стола дополнительно к перемещению основного привода 5.

**VII. Способ коррекции ТД с использованием теплового привода.** Принцип работы теплового привода (рис. 7) основан на использовании удлинения стержня 2 при его нагреве источником 3, расположенным внутри. Левый конец стержня жестко связан с рабочим органом 1, а правый закреплен в неподвижной опоре 5. Возвращение рабочего органа в исходное положение происходит при охлаждении стержня жидкостью, подаваемой в рубашку охлаждения 4 [2, 14, 15].

#### VIII. Способ коррекции ТД с использованием управляемой схемы охлаждения шпинделя.

Другим способом снижения ТД является охлаждение станка, включая его активные (подшипники шпинделя, муфты, тормоза, электродвигатели и др.) и пассивные элементы, переносящие тепло (масла, охлаждающие жидкости и пр.), путем создания естественного или искусственного потока воздуха, отвода тепла с помощью охлаждающих устройств и др.

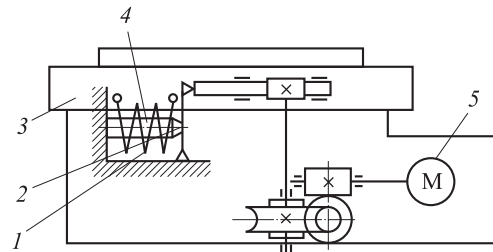


Рис. 6. Схема устройства с использованием магнестрикционного привода для точного перемещения стола многоцелевого станка в продольном направлении:

- 1 — катушка возбуждения электромагнитного поля;
- 2 — магнестрикционный привод; 3 — стол;
- 4 — стержень из ферромагнитного материала;
- 5 — основной привод

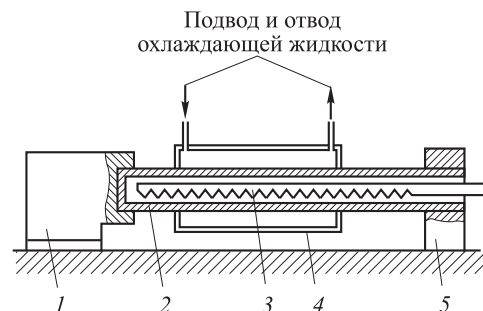


Рис. 7. Тепловой привод

## Анализ способов коррекции ТД

Способ коррекции	Достоинства	Недостатки, ограничения по применению
I	Возможность отслеживания смещения рабочих органов, вызванных только их ТД (высокая достоверность результатов), что обеспечивается использованием инварового стержня с очень малым коэффициентом линейного расширения, не подверженного влиянию источников нагрева	Высокая стоимость; необходимость постоянного измерения смещений оси шпинделя с помощью соответствующего преобразователя; сложность в применении, эксплуатации и пр.
II	Наиболее экономичный и удобный способ для проведения испытаний	Трудность определения характерных точек станка
III	Более высокая долговечность пневматического устройства по сравнению с таковой гидравлического и электрического оборудования; относительная простота конструкции	Тепловая инерция преобразователя; нелинейность характеристики исполнительного механизма в зоне малых давлений; сложность установки датчика в максимальной близости от источника нагрева, а также получения высокой точности коррекции
IV	Простота применяемой конструкции, удобство эксплуатации, оперативность снятия показаний	Сложность получения высокой точности коррекции
V	Высокая жесткость используемой конструкции; возможность перемещения рабочего органа на десятые доли микрометра	Гидропривод с объемным регулированием имеет ограниченные возможности, так как трудно осуществлять малые стабильные подачи жидкости
VI	Высокая жесткость магнитострикционного привода; удобство управления прямым электрическим сигналом	Зависимость магнитострикционного удлинения от температуры и напряжения под действием внешней нагрузки; изменение механических характеристик (в частности, модуля упругости материала) при создании магнитного поля, что необходимо учитывать при высокой точности малых перемещений. При сплошном стержне быстродействие магнитострикционного привода довольно низкое (0,5...0,7 с), поэтому применяют шихтованные магнитострикторы, выполненные из набора пластин или в виде витой ленточной трубки
VII	Экономичность за счет малого потребления электроэнергии; достаточно высокая жесткость применяемой конструкции благодаря отсутствию зазоров между стержнем и рабочим органом	Возможность дополнительного нагрева узлов станка; большая инерция. Так, после начала нагрева движение начинается только через 0,2...1,8 с, а для сокращения длины стержня на 0,1...0,6 мм требуется интенсивное охлаждение в течение 2...4 с
VIII	Создание естественных и искусственных потоков воздуха; увеличенный срок эксплуатации шпинделя; возможность продолжительной работы шпинделя без остановки на высоких оборотах	Увеличенные габаритные размеры узлов (например, узла шпинделя); необходимость использования дополнительных устройств (станция прокачки и охлаждения воды или рабочей жидкости, специальные холодильные установки и пр.)

На рис. 8 показана схема охлаждения узла 1 шпинделя станка с ЧПУ путем принудительной прокачки охлаждаемого в резервуаре 2 масла. В случае превышения заданной температуры

масла от терморпары поступает команда в устройство ЧПУ на включение системы охлаждения масла в резервуаре [2, 14–16]. Такой способ коррекции позволяет снизить влияние ТД на

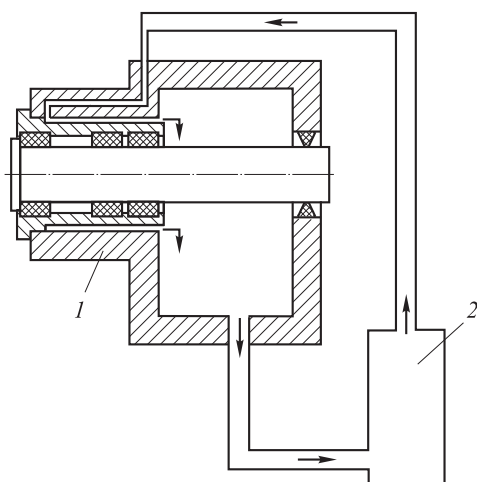


Рис. 8. Управляемая схема охлаждения шпинделя

линейные перемещения шпинделя. Для коррекции угловых поворотов шпинделя рекомендуется метод направленного нагрева (охлаждения) с помощью единичных нагревателей или температурных труб (элементов охлаждения).

Анализ и обобщение рассмотренной информации выявили существование большого числа способов коррекции ТД, имеющих различные принцип действия, конструктивное исполнение, достоверность результатов и экономическую эффективность. Показано, что все способы коррекции ТД имеют определенные особенности, ограничения по применению, достоинства и недостатки (см. таблицу).

## Выводы

1. Все существующие способы коррекции ТД имеют определенные достоинства, недостатки и ограничения по их применению.

2. Недостатком способов коррекции является то, что они очень часто не учитывают характер изменения ТД рабочих органов в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а также разный характер ТД при различных частотах вращения шпинделя.

3. Система управления процессом обработки на основе контроля ТД позволяет посредством предсказания управляющей программы проводить коррекцию ТД и размерных погрешностей, что обеспечивает уменьшение погрешности формы и размеров.

4. Наиболее удобным является способ коррекции ТД, основанный на измерении температуры в заранее определенных точках станка, в которых можно установить термодатчики и измерительные преобразователи при незначительном изменении конструкции узлов и механизмов станка. Такой способ имеет высокую степень реализации при минимальных затратах на подготовительные работы, невысокую стоимость и удобен для эксплуатации. Существенное ограничение данного способа связано с определением характерной точки, где измеряемая температура будет точно взаимосвязана с ТД узла. Однако нахождение таких точек можно установить предварительными экспериментальными исследованиями.

5. Все существующие способы коррекции ТД требуют наличия специальных измерительных систем, устанавливаемых часто в рабочей зоне станка и выполняющих постоянное измерение значения смещения рабочего органа, температуры нагрева или других параметров.

## Литература

- [1] 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.
- [2] Кузнецов А.П. *Тепловой режим металлорежущих станков*. Москва, Изд-во МГТУ СТАНКИН, Янус-К, 2013. 478 с.
- [3] Комшин А.С. Информационно-метрологическое обеспечение эксплуатации объектов машиностроения. *Стандарты и качество*, 2015, № 12, с. 48–52.
- [4] Комшин А.С., Сырицкий А.Б. Измерительно-вычислительные технологии эксплуатации металлорежущего оборудования и инструмента. *Мир измерений*, 2014, № 12, с. 3–9.
- [5] Blazejewski A., Kwasny W., Jedrzejewski J., Tae-Weon Gim. Modelling thermal deformation of tilting rotary table with direct drive system. *Journal of Machine Engineering*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 26–40.
- [6] Dornfeld D., Lee D-E. *Precision Manufacturing*. Springer Science+Business Media, LLC, 2008. 775 p.



- [7] Zhang H., Yang J., Zhang Y., Shen J., Wang C. Measurement and compensation for volumetric positioning errors of CNC machine tools considering thermal effect. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 55, is. 1–4, pp. 275–283.
- [8] Yoshimi Ito, Eng C. *Modular design for machine tools*. McGraw-Hill Companies Inc., 2008. 504 p.
- [9] Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. *Тепломассообмен*. Москва, МЭИ, 2011. 562 с.
- [10] Weck M. *Werkzeugmaschinen 2: Konstruktion und Berechnung*. Springer-Verlag, 2006. 701 p.
- [11] Кузнецов А.П., Косов М.Г. Структурный теплофизический анализ металлорежущих станков. *СТИН*, 2011, № 3, с. 13–21.
- [12] Кузнецов А.П. Критерии подобия теплового поведения деталей и узлов металлорежущих станков. *Вестник машиностроения*, 2011, № 4. с. 57–63.
- [13] 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.
- [14] Кузнецов А.П. Закономерности теплового поведения металлорежущих станков. *Вестник машиностроения*, 2011, № 10, с. 57–62.
- [15] Кузнецов А.П. Тепловое поведение металлорежущих станков различных компоновок. *Вестник МГТУ СТАНКИН*, 2010, № 2 (10), с. 62–65.
- [16] Chow J.H., Zhong Z.W., Lin W., Khoo L.P. A study of thermal deformation in a carriage of a permanent magnet direct drive linear motor stage. *Applied thermal engineering*, 2012, vol. 48, pp. 89–96.

## References

- [1] 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. Series Mechanical Engineering]. 2014, no. 5 (98), pp. 98–105.
- [2] Kuznetsov A.P. *Teplovoi rezhim metallovezhushchikh stankov* [Thermal conditions of machine tools]. Moscow, MSTU STANKIN publ., Ianus-K publ., 2013. 478 p.
- [3] Komshin A.S. Informatsionno-metrologicheskoe obespechenie ekspluatatsii ob"ektov mashinostroeniia [Information and metrological support of operation of engineering facilities]. *Standarty i kachestvo* [Standards and Quality]. 2015, no. 12, pp. 48–52.
- [4] Komshin A.S., Syritskii A.B. Izmeritel'no-vychislitel'nye tekhnologii ekspluatatsii metallovezhushchego oborudovaniia i instrumenta [Measuring and computing technology operating metal-cutting equipment and tools]. *Mir izmerenii* [World of measurement]. 2014, no. 12, pp. 3–9.
- [5] Blazejewski A., Kwasny W., Jedrzejewski J., Tae-Weon Gim. Modelling thermal deformation of tilting rotary table with direct drive system. *Journal of Machine Engineering*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 26–40.
- [6] Dornfeld D., Lee D-E. *Precision Manufacturing*. Springer Science+Business Media, LLC, 2008. 775 p.
- [7] Zhang H., Yang J., Zhang Y., Shen J., Wang C. Measurement and compensation for volumetric positioning errors of CNC machine tools considering thermal effect. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 55, is. 1–4, pp. 275–283.
- [8] Yoshimi Ito, Eng C. *Modular design for machine tools*. McGraw-Hill Companies Inc., 2008. 504 p.
- [9] Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, MPEI publ., 2011. 562 p.
- [10] Weck M. *Werkzeugmaschinen 2: Konstruktion und Berechnung*. Springer-Verlag, 2006. 701 p.
- [11] Kuznetsov A.P., Kosov M.G. Strukturnyi teplofizicheskii analiz metallovezhushchikh stankov [Structural analysis of thermophysical machine tools]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2011, no. 3, pp. 13–21.

- [12] Kuznetsov A.P. Thermal behavior of components in metal-cutting machines. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 4, pp. 351–357.
- [13] Vasil'ev G.N., Iagopol'skii A.G. Obespechenie 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. Series Mechanical Engineering]. 2010, no. 2 (79), pp. 91–105.
- [14] Kuznetsov A.P. Patterns of thermal behavior of metal-cutting machines. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 10, pp. 975–984.
- [15] Kuznetsov A.P. Teplovoe povedenie metallorezhushchikh stankov razlichnykh komponovok [Thermal behavior of Machine tools of different layout]. *Vestnik MGTU STANKIN* [Herald of MSTU STANKIN]. 2010, no. 2 (10), pp. 62–65.
- [16] Chow J.H., Zhong Z.W., Lin W., Khoo L.P. A study of thermal deformation in a carriage of a permanent magnet direct drive linear motor stage. *Applied thermal engineering*, 2012, vol. 48, pp. 89–96.

Статья поступила в редакцию 23.06.2016

## 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).

**ВИННИКОВ Дмитрий Андреевич** (Москва) — главный технолог. АО «Электросетьстройпроект» (127566, Москва, Российская Федерация, Высоковольтный проезд, д. 1, стр. 36, e-mail: vinnikov@essp.ru).

## Information about the authors

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

**VINNIKOV Dmitriy Andreevich** (Moscow) — Chief Technologist. AO Elektrosetsyroyproekt (127566, Moscow, Russian Federation, Vysokovoltniy proezd, Bldg. 1, Block 36, e-mail: vinnikov@essp.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет 2-е издание учебного пособия  
под редакцией Д.А. Ягодникова

### «Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок»

Изложены основы теории, расчета и проектирования агрегатов регулирования жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ). Приведена классификация характеристик режимов работы отдельных агрегатов и ЖРДУ в целом. Рассмотрены основные характеристики ЖРДУ, даны примеры определения статических и динамических режимов работы двигательной установки. Описаны схемы и элементы конструкции агрегатов регулирования ЖРДУ. Приведена конструкторская оценка динамической устойчивости систем регулирования. На примере реальных схем ЖРДУ рассмотрено практическое применение агрегатов регулирования.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru