

УДК 517.977.5

DOI 10.18698/0536-1044-2016-12-58-65

Статистические методы управления технологическими процессами

Г.А. Тимофеев, Н.Н. Барбашов, А.Д. Терентьева

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

Statistical Methods of Control of Technological Processes

G.A. Timofeev, N.N. Barbashov, A.D. Terentyeva

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

@ e-mail: timga@bmstu.ru

i Одним из самых важных и сложных вопросов автоматизации технологических процессов является автоматизация контроля. Активный контроль, направленный на обеспечение необходимого качества размерных и других параметров изделий в самом процессе их получения, на автоматизацию технологических процессов высокой точности, снижение потерь от брака и расходов на контроль, в настоящее время является наиболее перспективным. В современном производстве в области управления технологическим процессом с помощью средств активного контроля задачу повышения точности изготовления изделий машиностроения можно решить выбором рационального алгоритма управления путем введения соответствующих корректировок. Методы, основанные на управлении по скользящей средней, представляются наиболее перспективными для управления точностью, поскольку они включают в себя информацию об изменении нескольких последних измеренных значений контролируемого параметра.

Ключевые слова: автоматизация технологических процессов, управление точностью, рациональный алгоритм, скользящая средняя, адаптивное управление.

i The automation of control is one of most important and complex problems in automation of technological processes. Active control, aimed at ensuring the required quality of dimensional and other parameters of products in the process of manufacturing, automating high accuracy technological processes, and reducing losses from rejected parts and control costs, is currently the most promising. In modern manufacturing where active control of automation is used, the problem of accuracy improvement can be solved by the choice of the rational control algorithm by introducing adjustments. Methods based on the moving average appear most promising for the accuracy control since they include information on the change in the last several measured values of the controlled parameter.

Keywords: automation of technological processes, precision control, rational algorithm, moving average, adaptive control.

В настоящее время математико-статистические методы исследования являются важнейшим элементом управления качеством на промышленном предприятии. При высоких требованиях, предъявляемых к точности изготовления изделий, необходим текущий контроль для регулирования технологического процесса и пре-

дупреждения появления брака [1]. Широко известные математико-статистические выборочные методы контроля применяют главным образом при приемочном контроле в целях проверки соблюдения технических требований, предъявляемых к качеству изделий [2–4]. Таким образом, они не оказывают непосредствен-

ного влияния на производство изделий, а выявляют брак уже готовой продукции [3, 5–8].

Активный контроль, направленный на обеспечение необходимого качества размерных и других параметров изделий в самом процессе их получения, на автоматизацию технологических процессов высокой точности, снижение потерь от брака и расходов на контроль, в настоящее время является наиболее перспективным. Основным смыслом применения активного контроля при обработке деталей на станках заключается в повышении технологической точности путем компенсации погрешностей, вызываемых износом инструмента, тепловыми и силовыми деформациями технологической системы, так как эти факторы приводят к рассеиванию размеров деталей при их обработке на металлорежущих станках.

Большая часть современных станков оснащена датчиками активного контроля, позволяющими определять размеры изготавливаемых деталей и проводить наладку станков во время работы. Управляют датчиками блоки микропроцессоров, которые дают возможность вводить дополнительное управление и приспособлять станок к изменяющимся условиям обработки, что повышает производительность и точность. В связи с этим остается актуальной задача формирования рациональных методик контроля, обеспечивающих как некоторый заданный выходной уровень качества, так и его повышение.

В области управления технологическим процессом с помощью приборов активного контроля задачу повышения точности можно решить выбором рационального алгоритма управления [2–4].

Цель работы — разработка методов управления точностью при активном контроле путем введения соответствующих корректировок [8–12]. Методы, основанные на управлении по скользящей средней, являются наиболее эффективными для управления точностью, поскольку они включают в себя информацию об изменении нескольких последних измеренных значений контролируемого параметра, что позволяет улучшить качество продукции и повысить скорость производства [6, 7, 13, 14].

Отечественные ученые М.С. Невельсон, Ю.А. Шачнев и И.И. Лобунина, предлагавшие в своих работах [6, 7, 13] использование систем активного контроля, опирались на классические математические модели. И.И. Лобунина

доказала в работе [13] эффективность линейной формулы $k\bar{x}_i$ адаптивного управления с введением скользящей средней для конкретных производств, технологических процессов и моделей станка. В этой формуле: k — коэффициент управления; x_i — реализация отклонения на i -м шаге процесса, получаемая в программе с помощью случайной функции, удовлетворяющая выбранному закону распределения.

В основе исследуемой методики лежит вычисление скользящей средней, т. е. при расчете первые три члена последовательности отклонений остаются неизменными: $\bar{x}_1 = x_1$, $\bar{x}_2 = x_2$, $\bar{x}_3 = x_3$. Далее для каждого i -го члена последовательности вычисления проводят следующим образом: $\bar{x}_i = x_i - f(k, \bar{x}_i)$, где $f(k, \bar{x}_i)$ — формула для расчета управления, в которую вместо значений \bar{x}_i будут подставлены соответствующие значения x'_i , рассчитанные как среднее значение трех предыдущих членов, т. е. $x'_i = (x_{i-1} + x_{i-2} + x_{i-3})/3$ [6].

В качестве критерия оценки эффективности управления Ю.А. Шачневым принят коэффициент увеличения точности $\psi_T = \sigma_y/\sigma$ [7], представляющий собой отношение среднеквадратического отклонения процесса после введения адаптивного управления к среднеквадратическому отклонению процесса до его введения. Очевидно, что повышение точности определяется критерием $\psi_T < 1$. Для улучшения восприятия получаемых результатов введена оценка эффективности — улучшение $\Delta = (1 - \psi_T) \cdot 100\%$. Получаемое улучшение Δ , измеряемое в процентах, дает представление об изменении эффективности предлагаемого **метода адаптивного управления (МАУ)**.

Решение поставленной задачи состоит в выборе оптимальных значений k , подбираемых таким образом, чтобы критерий ψ_T был минимальным, т. е. эффективность управления была наибольшей.

Доказать эффективность выбранного МАУ математически не представляется возможным, так как закон распределения исследуемого процесса и соотношение случайной и систематической составляющих изначально не известны [6, 9]. Поэтому целесообразно проводить исследование на математической модели случайной величины, поскольку вероятностный закон на практике почти всегда не известен. В то же время ГОСТ Р серии 50779 регламентирует методики управления качеством для конкретных законов распределения. Возникает противоречивая

ситуация: закон распределения не известен, но государственный стандарт регламентирует действия для различных законов. Большая часть этих законов распределения описана в ГОСТ Р серии 50779: нормальный закон распределения — в ГОСТ Р 50779.21–2004, распределение Вейбулла — в ГОСТ Р 50779.27–2007, а восемь возможных моделей распределения, подобных распределению Рэля, представляющему интерес для статистической обработки данных [1, 15, 16], — в ГОСТ Р 50779.44–2001 (заменен на ГОСТ Р ИСО 21747–2010).

Для доказательства эффективности выбранного МАУ необходимо исследовать его действие при различных законах распределения и интервалах измерения, при введении систематической погрешности и изменении количества измерений.

Перед проведением основного комплекса исследований следует доказать, что эффективность можно повысить практически всегда. Для этого создана математическая модель случайной величины, генерирующая первые три значения x_1, x_2, x_3 последовательности основных отклонений измеряемой величины, а затем, согласно методике управления по скользящей средней, построена зависимость эффективности регулирования от коэффициента k и основного отклонения следующей измеряемой величины x_4 . Результаты предварительного исследования приведены на рис. 1.

Результаты исследования подтвердили, что при любом значении x_4 есть такая область значений коэффициента управления k , при которых коэффициент увеличения точности $\psi_T < 1$, что доказывает эффективность регулирования.

Для проведения основного комплекса исследований создана математическая модель про-

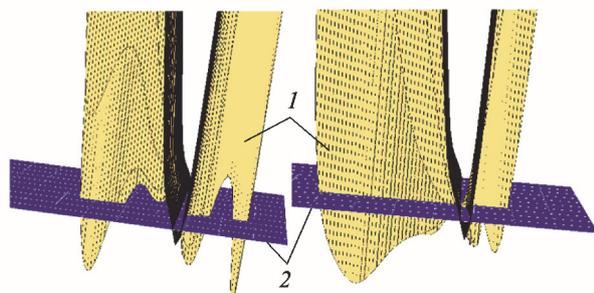


Рис. 1. Результаты предварительного исследования: 1 — зависимость эффективности регулирования от коэффициента k и последующих значений основного отклонения измеряемой величины; 2 — плоскость $\psi_T = 1$ (все значения регулирования функции ниже этой плоскости являются эффективными)

цесса измерения детали с наличием случайной составляющей погрешности [10]. Как показали исследования [13], несмотря на отсутствие видимых признаков смещения настройки (т. е. систематической составляющей), она существует, причем ее доля может составлять более половины суммарной погрешности.

Исследования проведены при многократных измерениях в целях усреднения получаемых результатов для повышения достоверности выводов. Единичный случай эффективности введенного адаптивного управления не может гарантировать эффективности всех последующих экспериментов. Эксперименты выполнены при различном количестве измерений, поскольку предлагаемый МАУ осуществляется при активном контроле, т. е. количество измерений в процессе эксперимента непрерывно накапливается. Следовательно, необходимо доказать эффективность введения адаптивного управления при различном количестве измерений.

Для выбранной формулы из-за принципа расчета по скользящей средней получение положительного эффекта регулирования по коэффициенту увеличения точности ψ_T возможно только при количестве измерений $n = 4$ и более. В качестве минимального количества измерений принято $n = 5$, далее n изменяли в интервале от 10 до 100 с шагом 10. Число многократных повторений однотипных экспериментов — 100.

Исследование возможности применения и эффективности выбранного МАУ при различных законах распределения основных отклонений измеряемой величины. Эксперимент проведен для поля допуска 30 мкм (основное отклонение js). Для нормального закона распределения выбрано стандартное отклонение $\sigma = 5$. Для распределения Вейбулла приняты параметр масштаба $\lambda = 6$ и параметр формы $\delta = 1$, поскольку условия проведения измерений предполагались в рабочей области, а не в зонах приработки или износа. Для распределения Рэля взят параметр масштаба $\lambda = 6$. В качестве коэффициента увеличения точности ψ_T и коэффициента k представлены средние значения по 100 повторениям.

Результаты исследования эффективности выбранного МАУ при различных законах распределения и количестве измерений приведены на рис. 2. Здесь помимо кривых зависимости

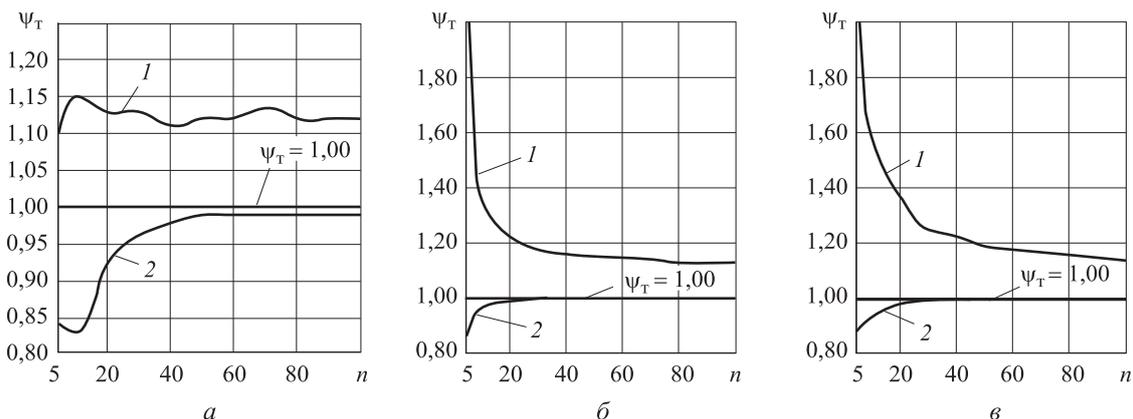


Рис. 2. Сравнение коэффициентов увеличения точности с корректировкой по государственному стандарту (1) и формуле $k\bar{x}_i$ (2) при многократных измерениях для различных законов распределения: а — нормального; б — Вейбулла; в — Рэлея

коэффициента увеличения точности при корректировке по государственному стандарту и формуле $k\bar{x}_i$ от количества измерений n показана линия коэффициента увеличения точности $\psi_T = 1$, которая позволяет визуально определить, эффективно или неэффективно адаптивное управление.

Исследование возможности применения и эффективности выбранного МАУ в различных интервалах измерения. В отличие от предыдущего эксперимента в данном исследовании к двум независимым параметрам (ψ_T и n) добавлен третий в виде изменения поля допуска распределения.

Эксперимент разделен на два этапа. В первом из них исследована эффективность МАУ при увеличении и уменьшении поля допуска, во втором — при смещении поля допуска постоянной величины относительно нулевой линии. Для первого эксперимента в качестве третьего параметра выбрана ширина поля допуска T , для второго — середина поля допуска $(es + ei)/2$, обозначенная как e_0 . В первом эксперименте варьировалась ширина поля допуска, которая принимала значения 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100 мкм, во втором — положение середины поля допуска в диапазоне — 60...60 мкм с шагом 15 мкм. При нормальном законе распределения стандартное отклонение выбрано равным 5.

Результаты измерений с введением корректировок по предлагаемой формуле и государственному стандарту приведены на рис. 3. Как и в предыдущем исследовании, в качестве коэффициента увеличения точности ψ_T представлены средние значения по 100 повторениям.

Исследование возможности применения и эффективности выбранного МАУ при введении систематической погрешности. Эксперимент выполнен в условиях, приближенных к реальным, где настройка станка может смещаться в обе стороны из-за различных факторов. Как уже отмечалось, проведение исследования любого предлагаемого метода при введении систематической погрешности является не только важным, но и актуальным.

Эксперимент разделен на два этапа. В первом из них исследована эффективность выбранного МАУ при введении систематической погрешности, распределенной по линейному закону $kx + b$, а во втором — по периодическому закону $k \sin x$. Для первого эксперимента в качестве третьего параметра выбран угол наклона прямой линии $kx + b$, которая представляет собой систематическую составляющую погрешности, обозначенный как $\alpha = \arctg k$, а для второго — коэффициент k .

При моделировании процесса введения систематической погрешности, распределенной по линейному закону, в формулу прямой линии $kx + b$ в качестве параметра x подставлены значения количества измерений n .

Моделирование процесса введения систематической погрешности, распределенной по периодическому закону, гораздо сложнее. Здесь важно, чтобы при любом количестве n измерением был охвачен целый период функции $k \sin x$, поскольку интересно рассмотреть неблагоприятный случай — периодическую систематическую составляющую погрешности как более «неудобную» в отслеживании и корректировке при введении адаптивного управления. Принято решение ограничить целый

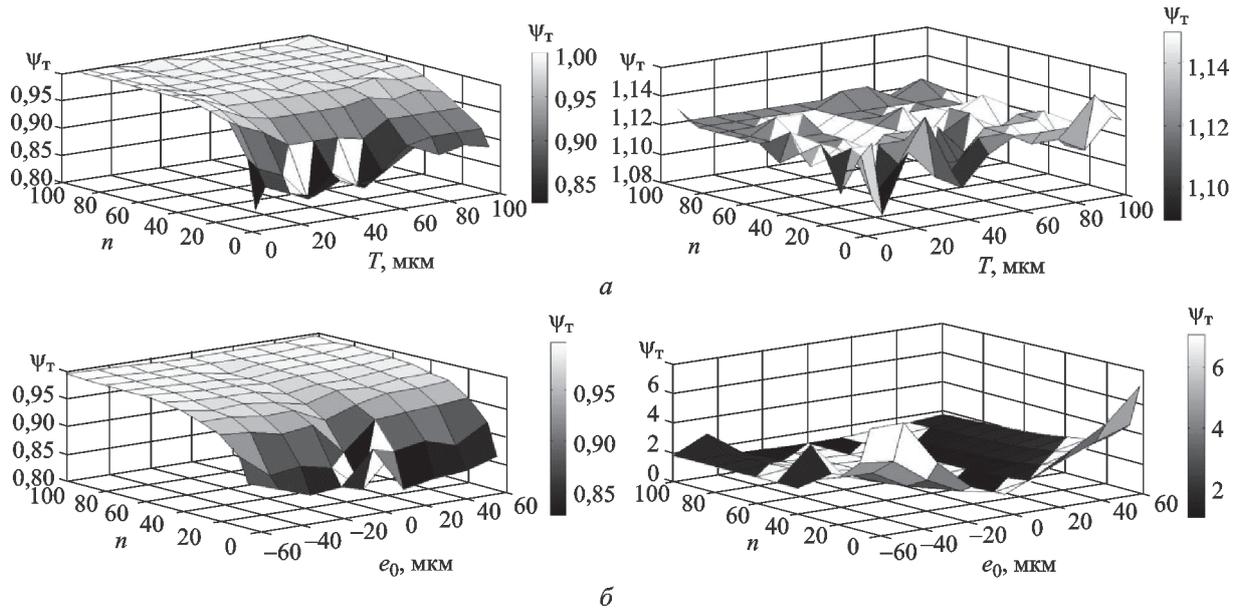


Рис. 3. Сравнение коэффициентов увеличения точности Ψ_T с корректировкой по формуле $k\bar{x}_i$ (слева) и государственному стандарту (справа) при изменении ширины поля допуска (а) и положения середины поля допуска (б)

период функции $k \sin x$ количеством измерений $n = 20$, т. е. если количество измерений $n \leq 20$, то в выбранное количество измерений n должен укладываться целый период функции, иначе — один период на количество измерений $n = 20$.

В первом эксперименте варьировались значения угла α наклона относительно нуля (применительно к полю допуска — нулевой линии)

в диапазоне $-35 \dots 35^\circ$ с шагом 7° , во втором — значения коэффициента k в интервале $0 \dots 2,50$ с шагом $0,25$.

Угол $\alpha = 35^\circ$ наклона прямой, задающей систематическую погрешность, распределенную по линейному закону, и коэффициент $k = 2,50$, определяющий систематическую погрешность, распределенную по периодическому закону, описывают наиболее неблагоприятную модель

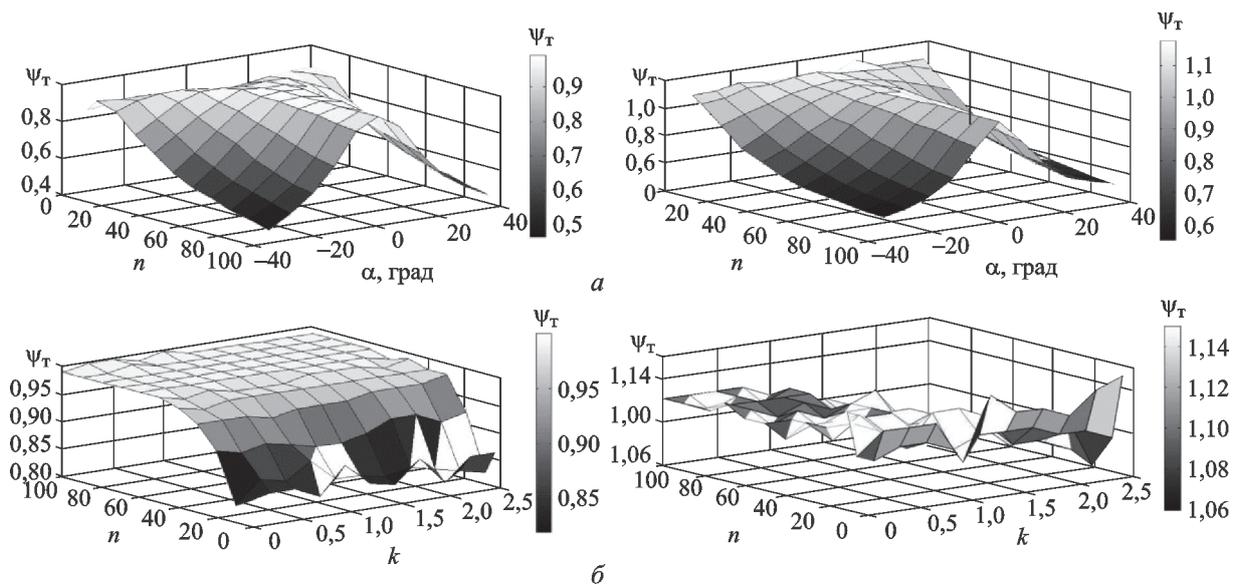


Рис. 4. Сравнение коэффициентов увеличения точности Ψ_T с корректировкой по формуле $k\bar{x}_i$ (слева) и государственному стандарту (справа) при многократных измерениях для линейного (а) и периодического (б) законов распределения систематической погрешности

технологического процесса, поскольку такое резкое измерение линии, вдоль которой распределены значения измеряемой величины, приведет ее к быстрому выходу из поля допуска. Однако для большей уверенности в эффективности предлагаемого МАУ в ходе исследования рассмотрены и такие случаи. При нормальном законе распределения стандартное отклонение выбрано равным 5.

Результаты измерений с введением корректировок по предлагаемой формуле и государственному стандарту для линейного и периодического законов распределения систематической погрешности приведены на рис. 4. Как и в предыдущих исследованиях, в качестве коэффициента увеличения точности ψ_T представлены средние значения по 100 повторениям.

Выводы

1. Доказано, что выбранный МАУ не ухудшает технологический процесс и для любого процесса обеспечивает получение неотрицательных значений коэффициента увеличения точности ψ_T и улучшения Δ .

2. Коэффициент увеличения точности ψ_T достигает наименьшего значения при относительно небольшом количестве измерений $n \leq 30$.

3. Предлагаемый МАУ в среднем дает улучшение $\Delta = 15...25\%$, а в отдельных случаях $\Delta = 89\%$.

4. Методика управления по скользящей средней, предложенная в действующих государственных стандартах, зачастую оказывается неэффективной.

Литература

- [1] ГОСТ Р 50779.21–2004. *Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение*. Введен 2004-06-01. Москва, Изд-во стандартов, 2004. 47 с.
- [2] Рахматуллин А.И., Моисеев В.С. *Математические модели и методы оптимизации нестационарных систем обслуживания*. Казань, Школа, 2006. 211 с.
- [3] Филонов И.П., Медведев А.И. *Вероятностно-статистические методы оценки качества в машиностроении*. Минск, Тесей, 2000. 127 с.
- [4] Шишмарев В.Ю. *Технические измерения и приборы*. Москва, Академия, 2012. 383 с.
- [5] Агамиров Л.В. *Методы статистического анализа механических испытаний*. Москва, Интермет Инжиниринг, 2004. 127 с.
- [6] Невельсон М.С. *Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках*. Ленинград, Машиностроение, 1982. 184 с.
- [7] Шачнев Ю.А. Оптимальное позиционное управление точностью процесса обработки. *Труды МВТУ № 369. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения*. Москва, МВТУ, 1981, с. 98–115.
- [8] Зайцев Г.Н. *Управление качеством. Технологические методы управления качеством изделий*. Санкт-Петербург, Питер, 2014. 266 с.
- [9] Шторм Р. *Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества*. Москва, Мир, 1970. 368 с.
- [10] Мельников В.П., Смоленцев В.П., Схиртладзе А.Г. *Управление качеством*. Москва, Академия, 2007. 345 с.
- [11] Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. *Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами*. Санкт-Петербург, Наука, 2000. 548 с.
- [12] Рубан А.И. *Методы анализа данных*. Красноярск, Изд-во Красноярского гос. техн. ун-та, 2004. 319 с.
- [13] Лобунина И.И. *Разработка и исследование корреляционных методов анализа и повышения точности обработки на шлифовальных станках с приборами активного контроля*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, Сев-Зап. политехн. ин-т, 1970. 17 с.
- [14] Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д. Применение активного контроля для повышения точности обработки. *Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2015, № 10. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/814701.html> (дата обращения 13 января 2016).

- [15] ГОСТ Р 50779.27–2007 (МЭК 61649:1997). *Статистические методы. Критерий согласия и доверительные интервалы для распределения Вейбулла*. Москва, Введен 2008-06-01. Стандартинформ, 2008. 16 с.
- [16] ГОСТ Р ИСО 21747–2010. *Статистические методы. Статистики пригодности и воспроизводимости процесса для количественных характеристик качества*. Москва, Стандартинформ, 2012. 28 с.

References

- [1] GOST R 50779.21–2004. *Statisticheskie metody. Pravila opredeleniia i metody rascheta statisticheskikh kharakteristik po vyborochnym dannym. Chast' 1. Normal'noe raspredelenie* [State Standard R 50779.21–2004. Statistical methods. Determination rules and methods for calculation of statistical characteristics based on sample data. Part 1. Normal distribution]. Moscow, Gosstandart Rossii publ., 2004. 47 p.
- [2] Rakhmatullin A.I., Moiseev V.S. *Matematicheskie modeli i metody optimizatsii nestatsionarnykh sistem obsluzhivaniia* [Mathematical models and methods of optimization of non-stationary systems of service]. Kazan', Shkola publ., 2006. 211 p.
- [3] Filonov I.P., Medvedev A.I. *Veroiatnostno-statisticheskie metody otsenki kachestva v mashinostroenii* [Probabilistic and statistical methods of quality assessment in engineering]. Minsk, Tesei publ., 2000. 127 p.
- [4] Shishmarev V.Iu. *Tekhnicheskie izmereniia i pribory* [Performance measurement and instrumentation]. Moscow, Akademiia publ., 2012. 383 p.
- [5] Agamirov L.V. *Metody statisticheskogo analiza mekhanicheskikh ispytani* [The methods of statistical analysis of the mechanical tests]. Moscow, Internet Inzhiniring publ., 2004. 127 p.
- [6] Nevel'son M.S. *Avtomaticheskoe upravlenie tochnost'iu obrabotki na metallorezhushchikh stankakh* [Automatic precision processing machine tools]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1982. 184 p.
- [7] Shachnev Iu.A. Optimal'noe pozitsionnoe upravlenie tochnost'iu protsessa obrabotki [Optimum position control accuracy of processing]. *Trudy MVTU № 369. Vzaimozameniamost', standartizatsiia i tekhnicheskie izmereniia* [Proceedings of the Moscow Higher Technical School no. 369. Interchangeability, standardization and technical measurements]. Moscow, Bauman Press, 1981, pp. 98–115.
- [8] Zaitsev G.N. *Upravlenie kachestvom. Tekhnologicheskie metody upravleniia kachestvom izdelii* [Quality control. Technological quality management products]. St. Petersburg, Piter publ., 2014. 266 p.
- [9] Shtorm R. *Teoriia veroiatnostei. Matematicheskaia statistika. Statisticheskii kontrol' kachestva* [Probability. Math statistics. Statistical quality control]. Moscow, Mir publ., 1970. 368 p.
- [10] Mel'nikov V.P., Smolentsev V.P., Skhirtladze A.G. *Upravlenie kachestvom* [Quality control]. Moscow, Akademiia publ., 2007. 345 p.
- [11] Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems]. St. Petersburg, Nauka publ., 2000. 548 p.
- [12] Ruban A.I. *Metody analiza dannykh* [Methods of data analysis]. Krasnoyarsk, KSTU publ., 2004. 319 p.
- [13] Lobunina I.I. *Razrabotka i issledovanie korreliatsionnykh metodov analiza i povysheniia tochnosti obrabotki na shlifoval'nykh stankakh s priborami aktivnogo kontroliia. Diss. kand. tekhn. nauk* [Development and research of methods of correlation analysis and improve the accuracy of processing on grinding machines with active control devices. Cand. tech. sci. diss.]. Leningrad, SZPI publ., 1970. 17 p.
- [14] Barbashov N.N., Terent'eva A.D. *Primenenie aktivnogo kontroliia dlia povysheniia tochnosti obrabotki* [Application of active control to improve the accuracy of processing]. *Inzhenernyi vestnik. MGTU im. N.E. Baumana* [Engineering Bulletin. BMSTU]. 2015, no. 10. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/814701.html> (accessed 13 January 2016).
- [15] GOST R 50779.27–2007 (MEK 61649:1997). *Statisticheskie metody. Kriterii soglasiia i doveritel'nye intervaly dlia raspredeleniia Veibulla* [IEC 61649:1997 Goodness-of-fit tests, con-

fidence intervals and lower confidence limits for Weibull distributed data (MOD)]. Moscow, Standartinform publ., 2008. 16 p.

- [16] GOST R ISO 21747–2010. *Statisticheskie metody. Statistiki prigodnosti i vosproizvodimosti protsessa dlia kolichestvennykh kharakteristik kachestva* [ISO 21747:2006 Statistical methods — Process performance and capability statistics for measured quality characteristics (IDT)]. Moscow, Standartinform publ., 2012. 28 p.

Статья поступила в редакцию 08.06.2016

Информация об авторах

ТИМОФЕЕВ Геннадий Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

БАРБАШОВ Николай Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ТЕРЕНТЬЕВА Арина Дмитриевна (Москва) — ассистент кафедры «Теория механизмов и машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

TIMOFEEV Gennadiy Alekseevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: timga@bmstu.ru).

BARBASHOV Nikolay Nikolaevich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

TERENTYEVA Arina Dmitrievna (Moscow) — Teaching Assistant, Theory of Mechanisms and Machines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет 2-е издание учебника под редакцией В.М. Неровного «Теория сварочных процессов»

Изложены теоретические основы сварочных процессов. Представлены сведения об основах физики сварочных дугowych источников энергии, особенностях использования для сварки лучевой энергии и источников энергии, применяемых для сварки давлением. Рассмотрены тепловые процессы при сварке металлов и даны основные сведения по химической термодинамике, физической химии, необходимые для понимания металлургических процессов при сварке. Описаны основные термомеханические процессы и превращения в металлах при сварке. Приведены сведения о методах компьютерного моделирования сварочных процессов.

Содержание учебника соответствует курсам лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

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